

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 621.336.2:629.423.33

А. М. МУХА^{1*}, Д. В. УСТИМЕНКО^{2*}

^{1*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{2*}Каф. «Електротехніка та електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

МЕТОДИКА ОЦІНКИ НАГРІВАННЯ МІСЦЯ КОНТАКТУ КОНТАКТНОГО ПРОВОДУ ІЗ ВСТАВКОЮ СТРУМОПРИЙМАЧА

Мета. Основною метою нашої роботи є розробка методики оцінки температури нагрівання зони контактування контактної вставки струмоприймача (елемент контактної вставки струмоприймача, скорочено ЕКП – ЕКВС) для умов стоянки під час підготовки поїзда до рейсу з визначенням граничного струмового навантаження на цей вузол. **Методика.** Запропоновано розглядати контакт ЕКП – ЕКВС з точки зору класичної теорії електричного контакту й нагрівання однорідного тіла. **Результати.** Розглянуто особливості теплового стану вузла струмознімання ЕКП – ЕКВС в умовах підготовки електрорухомого складу до рейсу. У рамках дослідження розроблено методику оцінки температури нагрівання зони силового ковзного контакту в умовах підготовки поїзда до рейсу. Застосування методики сприятиме зменшенню кількості перепалювань контактної вставки струмоприймача завдяки точному вибору часу прогрівання/охолодження поїзда для визначеного струму обігріву/кондиціонування в разі підготовки електрорухомого складу до рейсу. **Наукова новизна.** Установлено, що причиною перепалювань контактної вставки струмоприймача на стоянках під час підготовки поїзда до рейсу є перевищення допустимої температури силового ковзного контакту внаслідок тривалої дії струму обігріву/кондиціонування. На відміну від стандартного підходу до встановлення тривалості обігріву поїзда, запропонована методика враховує додаткові фактори, а саме зношеність та стан контактної вставки струмоприймача. Ця методика базується на класичній теорії електричного контакту та теорії нагрівання однорідного тіла, що дозволяє досить точно оцінити тепловий стан силового ковзного контакту і є досить зручною для використання в умовах експлуатації. **Практична значимість.** Результати роботи мають практичну цінність, оскільки технологія підготовки поїзда до рейсу може бути доповнена розрахунком температури контакту ЕКП – ЕКВС відповідно до запропонованої методики. Це дозволить для конкретного поїзда в конкретних умовах застосовувати комплекс заходів із недопущення «перепалювань» контактної вставки струмоприймача у випадку вірогідного перевищення температури допустимого значення.

Ключові слова: контактний провід; контактна вставка; струм обігріву; перепалювання; допустима температура; електричний контакт

Вступ

У наземному електричному транспорті однією з найрозповсюдженіших схем передачі енергії на борт транспортного засобу є силовий

ковзний контакт. Цей тип контактів складається з контактної вставки струмоприймача і струмознімальних елементів, які встановлюються на полозах струмоприймачів електрорухомого складу. Умови роботи ковзного контакту є особливо

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

складними й характеризуються широким діапазоном температур навколишнього середовища, наявністю опадів у вигляді дощу та снігу, ожеледиці та паморозі, загазованістю навколишнього середовища і тощо.

Проводи, які використовують для контактної мережі, під час виготовлення протягують у холодному стані, що призводить до збільшення тимчасового опору до розриву й зменшення пластичності [10]. Під час нагрівання провід втрачає ці якості і тим більше, чим вища температура і час її впливу. Втрата міцності так чи інакше пов'язана зі строком служби контактного проводу. Тому відповідно до норм [17, 20] температура проводів контактної мережі у найбільш несприятливих умовах не повинна перевищувати гранично допустимого значення.

Досить частою проблемою під час підготовки поїзда до рейсу є перепалювання контактного проводу у випадку роботи електричної системи опалення вагонів або ж їх кондиціонування. Під дією високих температур мідний контактний провід втрачає механічні властивості і як наслідок, це призводить до його перепалювання, тобто до втрати цілісності й обриву.

Подібні ситуації призводять до суттєвих затримок у графіку руху поїздів, пов'язані з небезпекою ураження електричним струмом персоналу, вимагають додаткових ресурсів для відновлення контактної мережі. У зв'язку з цим аналіз теплового стану силового ковзного контакту й розробка методики розрахунку його температури в описаних умовах є актуальним завданням. Вирішення цього питання буде сприяти зниженню кількості випадків руйнування елементів контактної мережі й дозволить підвищити надійність роботи залізничного транспорту в цілому.

Мета

Основною метою нашої роботи є розробка методики оцінки температури нагрівання зони контактування контактного проводу з контактною вставкою струмоприймача («елемент контактного проводу – елемент контактної вставки струмоприймача», скорочено – ЕКП – ЕКВС) під час підготовки поїзда до рейсу з визначенням граничного струмового навантаження на цей вузол.

Для досягнення поставленої мети були поставлені такі задачі:

- визначити набір факторів та умов, що призводять до перепалювання контактного проводу;
- розробити методику розрахунку температури силового ковзного контакту ЕКП – ЕКВС.

Методика

Властивості будь-якого електричного контакту визначаються величиною площі контакту, якістю контактної поверхні й контактним тиском. Відомо, що фактична площа контакту складає незначну частку видимої площі дотику, а загальна площа розпадається на безліч окремих плям (α -плями). Таким чином, дискретний характер дотикання твердих тіл є основною причиною підвищеного електричного опору між поверхнями, що контактують [19, 23].

У разі передачі значних струмів через подібні системи в точці контакту виділяється значна кількість тепла, що за певних умов може представляти проблему. Проводи контактної мережі для різного типу підвісок можуть нагріватися струмом до 100...120 °С, при цьому механічні навантаження становлять від 10 до 21 кН. Короткочасний або тривалий нагрів викликає зниження міцності проводів, що призводить до значного зменшення коефіцієнта запасу міцності [23]. У роботі [6] обґрунтовано величини експлуатаційного термомеханічного навантаження на контактні дроти. Контактний провід, що піддається механічному й термічному навантаженню та зношується в процесі струмознімання, має коефіцієнт запасу 2,5. Результати досліджень [7, 23] використовують автори для визначення граничних умов навантаження для частково зношеного контактного проводу.

Для аналізу контактної пари ЕКП – ЕКВС є необхідним контроль стану контактних поверхонь, а також вимірювання їх фактичних геометричних розмірів. У роботі [30] запропоновано спосіб вимірювання, коли робочу поверхню контактного проводу захоплюють декількома камерами лінійного сканування і в режимі реального часу аналізуються локальний знос. Далі на підставі отриманої інформації проводять остаточний розрахунок зносу контактного проводу. Цей спосіб досить складний з точки зору технічної реалізації, найбільш повно він розкриває свій

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

потенціал за динамічного виміру зносу контактного проводу. В умовах станції в місцях екіпірування й підготовки поїздів більш раціональним є періодичне вимірювання геометрії контактного проводу в контрольних точках. Для цього цілком можна застосувати класичні вимірювальні інструменти, наприклад, мікрометр. Такий спосіб контролю зносу контактного проводу покладено в основу запропонованого методу.

Однією з особливостей ковзного електричного контакту, утвореного контактним проводом та контактною вставкою струмоприймача, є відносно великі величини струмів за досить малих сил контактної натискання. Усе це разом призводить до виділення великої кількості тепла в контакті [13, 28], що у свою чергу викликає різного роду деградації.

У роботі [28] проведено аналіз взаємодії між пантографом і контактним проводом, у результаті було встановлено, що в процесі струмознімання температура контактної точки дуже швидко піднімається й може перевищувати гранично допустиме значення, регламентоване для контактної проводу. Результати [28] корелюються з отриманими результатами та висновками в роботі [13] під час експериментального дослідження роботи електричного контакту ЕКП – ЕКВС в статичному стані.

Сила натискання більшою мірою залежить від швидкості руху електрорухомого складу, а величина площі фактичного контакту між поверхнями контактної проводу та контактної вставки пантографа – від сили, з якою струмоприймач притискає контактну вставку до проводу. Оскільки абсолютно гладких поверхонь не існує, контакт між контактною вставкою та контактним проводом реалізується через так звані контактні містки [4], у результаті чого з'являється контактний опір, величина якого залежить від температури в контакті. Як наслідок протікання через контакт значних струмів з'являється електрична складова зносу, контактні містки плавляться, а матеріал контактної проводу втрачає міцність. Зміни контактної опору пантографа й контактної системи за різного електричного струму й нормальних сил були проаналізовані в статичному контактному стані [27, 29].

Робота [25] присвячена моделюванню контактної взаємодії між контактним проводом

і пантографом, де продемонстровано зв'язок між величиною натискання контактної вставки струмоприймача на контактний провід і величиною електричного опору цього вузла.

У ряді робіт [3, 21] показана низька термостійкість безстиківих мідних контактних проводів і втрата ними механічних властивостей уже за температур 100 °С та навантаження розтягування 11 кН/мм². Після 250 год роботи в такому режимі відбувається часткова рекристалізація, після 500 год – деформована структура повністю рекристалізується зі зниженням міцності проводу на 30 % і зменшенням величини його поперечного перерізу.

Під час розгляду механізмів, що призводять до втрати міцності контактним проводом, практично не враховують наявність другого контакту – контактної вставки, а властивості самої вставки, безумовно, впливають на властивості міцності проводу [9]. Пошкоджена поверхня контактної вставки призводить до збільшення контактної опору, а значить – до локального перегріву контактної проводу, при цьому від тривалості перегріву залежить ступінь його знеміцнення. Тому методика повинна врахувати геометрію та якість робочої поверхні як контактної проводу, так і контактної вставки.

У роботі [24] наведені результати моделювання взаємного теплового впливу елементів електричних контактів, причому така модель може застосовуватися і для електричної тяги. Модель підтверджує теплову поведінку системи ЕКП – ЕКВС.

Відомо, що підвищення температури призводить до погіршення механічних властивостей провідникових матеріалів (рис. 1), зміна яких значною мірою залежить від тривалості нагрівання [1].

Повільне (протягом 2 год) нагрівання твердотягнутої міді (крива 2, рис. 1) призводить до різкого зменшення межі міцності на розтяг за більш низької температури, ніж під час їх короткочасного (протягом 10 сек) нагрівання (крива 1, рис. 1). Повільне нагрівання твердотягнутого мідного стрижня діаметром 50 мм (крива 3, рис. 1) призводить до його рекристалізації в зоні $T = 200$ °С і далі до швидкого зменшення міцності до рівня міцності такого ж стрижня з м'якої міді (крива 4, рис. 1) у зоні $T = 300$ °С.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

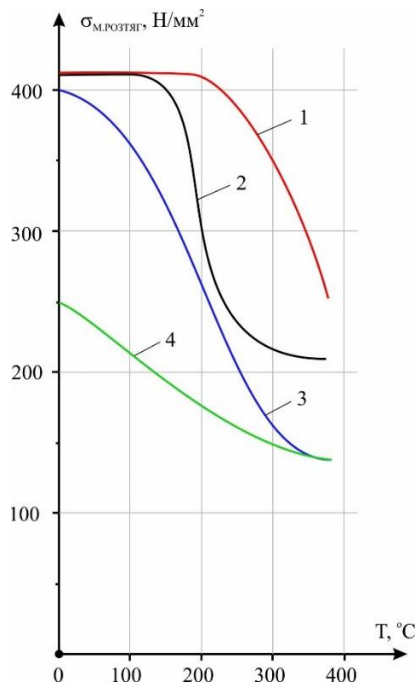


Рис. 1. Зміна механічних властивостей провідникових матеріалів залежно від температури й часу нагрівання – для твердотягнутого мідного дроту за його швидкого охолодження (1) й повільного (2) нагрівання; 3 – для твердотягнутого мідного стрижня діаметром 50 мм за повільного нагрівання; 4 – те ж для стрижня з м'якої міді

Fig. 1. Change of mechanical properties of conductive materials depending on temperature and time of heating – for a hard-drawn copper wire at its fast cooling (1) and slow (2) heating; 3 – for hard-drawn copper rod with a diameter of 50 mm with slow heating; 4 – is the same for a soft copper rod

З урахуванням вищевикладеного можна припустити, що до групи найбільшого ризику потрапляють ситуації, коли поїзд на стоянці готують до рейсу, при цьому для опалення в зимовий час або кондиціонування в літній час струмоприймач перебуває в піднятому стані. До особливостей такого режиму слід віднести: відсутність обдування місця контакту; тривале протікання струму обігріву через нерухомий контакт.

Усе це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого аналізу теплових процесів у точці контакту контактної провуду та контактної вставки струмоприймача, а також розробка методики розрахунку його теплової завантаженості саме для умов підготовки поїзда до рейсу.

Норми зимового температурного режиму в пасажирських поїздах далекого прямування складають від 18 до 20 °С, у приміських – від 11 до 13 °С. Опалення потрібно вмикати в разі, коли на вулиці температура повітря опускається нижче +10 °С [9, 17]. Для досягнення зазначених температур необхідно в разі електричного опалення вагонів під час підготовки їх до рейсу тримати струмоприймач у піднятому стані чимало часу, особливо після відстою вагонів. На пасажирських електровозах та електропоїздах постійного струму в разі живлення від струмоприймача ланцюгів електричного опалення поїзда під час стоянки тривалий струм становить 200...300 А і більше [24]. Розглянемо нагрівання контакту ЕКП – ЕКВС, через який проходить струм обігріву:

$$I_{об} = \frac{I_T}{k}, \quad (1)$$

де k – число рядів контактних вставок на положі струмоприймача.

Елемент контактної провуду (ЕКП) має довжину, рівну ширині контактної вставки (рис. 2) [26]. За такої невеликої довжини нерухомого ЕКП виникає небезпека, що в разі проходження струму опалення/кондиціонування через контакт ЕКП – ЕКВС може виникнути нагрівання цього елемента до температури вище допустимого значення.

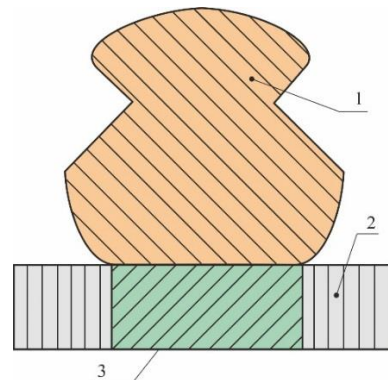


Рис. 2. Контакт ЕКП – ЕКВС:

1 – поперечний переріз ЕКП з урахуванням його зносу; 2 – поздовжній переріз струмознімальної контактної вставки; 3 – частина перерізу 2, що перебуває в контакті з ЕКП

Fig. 2. CWE – CSEP contact:

1 – cross section of CWE taking into account its wear; 2 – longitudinal section of the contact strip of pantograph; 3 – part of the section 2, which is in contact with the CWE

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

У зв'язку з цим постає завдання: розробити методику визначення розрахунковим шляхом температури нагрівання ЕКП за різних струмів обігріву/кондиціонування, що проходять через контакт ЕКП – ЕКВС. Цей розрахунок у першу чергу необхідно проводити для критичних умов роботи контакту. Критичні умови – це умови, що сприяють підвищеному нагріванню ЕКП. До таких умов належать:

- зношений контактний провід;
- зменшення натискання на контактний провід з боку струмоприймача;
- температура навколишнього середовища.

Пропонуємо розглянути контакт ЕКП – ЕКВС з точки зору теорії електричного контакту. За конструкцією нерухомий контакт ЕКП – ЕКВС можна віднести до плоских з'єднаних взаємно нерухомих контактів, аналогічно, наприклад, до болтових контактів [15].

Відповідно до класичної теорії про опір електричного контакту реальний опір твердих поверхонь відбувається в областях, що складаються з окремих плям (дотичних контактних виступів), які розташовані випадково на видимій поверхні дотикання. Для теоретичної оцінки факторів, що впливають на перехідний опір контакту R_n , широкого поширення набули контактні моделі, запропоновані Р. Хольмом, В. Мерло [6, 15]. Для практичних розрахунків використовують емпіричну формулу [16, 18]:

$$R_n = \frac{k_0}{F^n}, \quad (2)$$

де k_0 – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалів контактів, Ом·кг; n – коефіцієнт, що залежить від числа точок дотику контактних поверхонь; для плоского контакту $n=1$; F – сила, яка стискає контакти, або контактне натискання, кг.

Контактне натискання складається з трьох складових: статичного натискання струмоприймача, динамічної й аеродинамічної підйомної сили. У нерухомому стані присутнє тільки статичне натискання струмоприймача, яке створюється його робочими пружинами. У загальному випадку у струмоприймачів важкого типу статичне натискання повинно перебувати в межах 90...130 Н, у струмоприймачів легкого типу – 70...110 Н [11, 12].

Беремо, що дотичні площини ЕКП й ЕКВС паралельні одна одній.

Із формули (2) випливає, що електричний опір контакту ЕКП – ЕКВС обернено пропорційний натисканню на контактний провід і не залежить від площі їхнього дотикання. Число точок дотику збільшується в міру зростання натискання. Ця обставина є, поряд зі зменшенням висоти дотичних контактних виступів, однією з причин зменшення опору.

Розв'язок поставленої задачі передбачає тепловий розрахунок контакту з метою визначення температури нагрівання елемента контактного проводу за певних умов експлуатації й порівняння її з допустимою величиною.

Точно розрахувати тепловий процес практично неможливо через різноманіття каналів, по яких відбувається віддача тепла в навколишнє середовище. Розрахунок тепловіддачі ускладнений також нелінійною залежністю кількості тепла, що віддається від температури. У таких умовах доцільно вдатися до ряду припущень і широкого використання експериментальних даних.

Проведення дослідів із метою дослідження всіх видів тепловіддачі від контакту ЕКП – ЕКВС в навколишнє середовище, об'єднання їх в один еквівалентний вид і встановлення загального коефіцієнта тепловіддачі є проблематичними. Тому пропонуємо скористатися залежністю температури поверхні ЕКП від питомого значення потужності, котра виділяється в навколишнє середовище за рахунок конвекції й випромінювання (рис. 3) та наявна в аналогічному типі контактів [16].

Пропонуємо таку методику (алгоритм), розрахунку сталої температури контактного з'єднання ЕКП – ЕКВС:

1. Визначити тип електровоза чи електропоїзда.
2. Визначити тип струмоприймача, кількість рядів струмознімальних контактних пластин k на його полозі, матеріал вставки та її геометричні розміри.
3. З'ясувати тип контактного проводу, його знос у відсотках від початкового поперечного перерізу.
4. Знайти перехідний опір R_n одного контакту ЕКП – ЕКВС за мінімального натискання F на контактний провід з боку струмоприйма-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

ча. Для цього використовують розрахункову залежність (2).

5. Визначити значення струму I_T через струмоприймач під час обігріву/кондиціонування поїзда. Рекомендується брати $I_T = 300$ А (за результатами замірів у зимовий час в умовах локомотивного депо ТЧ8 м. Дніпро середнє значення струму перебувало на рівні 300 А).

6. Знайти струм обігріву/кондиціонування через контакт ЕКП – ЕКВС. Для цього використовують розрахункову залежність (1).

7. З'ясувати площу поверхні елементу ЕКП П₁, з якої віддається тепло за рахунок конвекції та випромінювання, з урахуванням зносу контактної провладу. Геометричні розміри контактної провладу з міді і її сплавів наведено в ІЕС 62917:2016 [22].

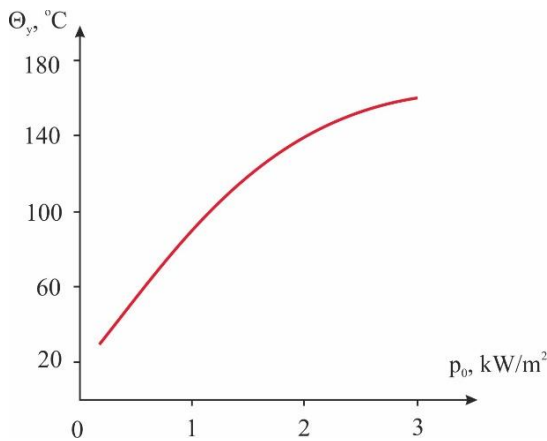


Рис. 3. Залежність температури контакту ЕКП – ЕКВС від питомої потужності з поверхні, що віддає тепло

Fig. 3. Dependence of temperature of CWE – CSEP contact on specific power from the surface giving off heat

Розмір (рис. 4) [26] характеризує фактичне значення висоти контактної провладу. Його зв'язок із площею поперечного перерізу контактної провладу встановлюють із таблиць, наведених у Додатку 3 Правил будови і технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць [14].

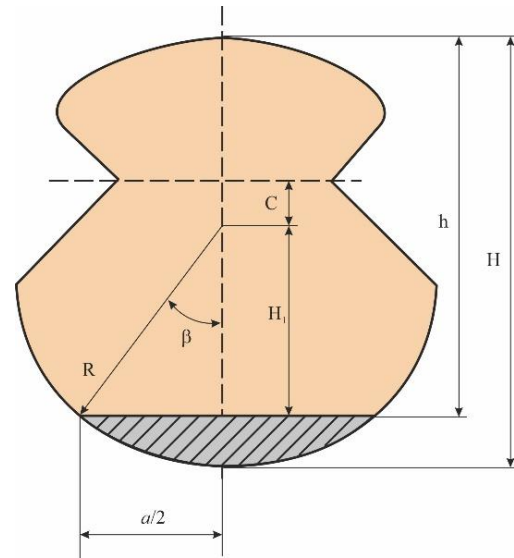


Рис. 4. Поперечний переріз контактної провладу з урахуванням його зносу

Fig. 4. Cross section of a contact wire taking into account its wear

Для частково зношеного контактної провладу на його робочій поверхні формується площадка шириною a (рис. 4), половину цього розміру $\frac{a}{2}$ визначають за таким виразом:

$$\frac{a}{2} = \sqrt{R^2 - H_1^2}, \quad (3)$$

де $H_1 = R - (H - h)$.

При цьому кут β й розмір $\frac{a}{2}$ пов'язані тригонометричним співвідношенням

$\beta = \arcsin\left(\frac{a/2}{R}\right)$. Позначивши через x довжину

дуги зношеної ділянки (на рис. 4 ця ділянка заштрихована), визначимо її величину:

$$x = \frac{2\beta \cdot 2\pi R}{360^\circ}. \quad (4)$$

Якщо через L_n позначити периметр фігури, утвореної поперечним перерізом нової контактної провладу, то периметр цієї ж фігури з деяким зносом буде визначатись як $L_n - x$, а значить, площа поверхні ЕКП з якої віддається тепло, може бути визначена так:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$$\Pi_1 = (L_n - x)l, \quad (5)$$

де l – ширина струмознімальної контактної вставки полоза струмоприймача.

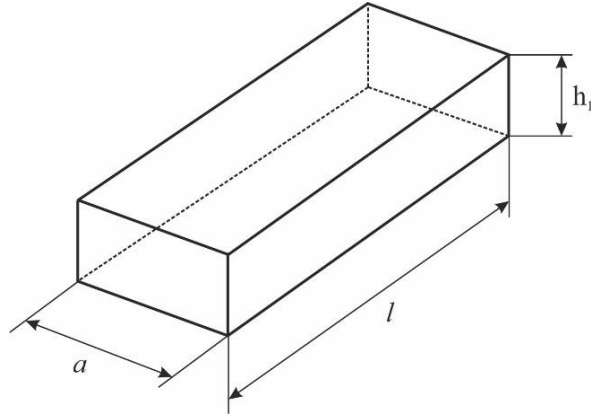


Рис. 5. Елемент контактної вставки струмоприймача (ЕКВС)

Fig. 5. Element of the contact strip of pantograph (ECSP)

8. Обчислити площу поверхні елемента контактної вставки полоза струмоприймача Π_2 , з якої віддається тепло за рахунок конвекції та випромінювання (рис. 5 [26]):

$$\Pi_2 = 2h_1 \cdot a + a \cdot l, \quad (6)$$

де h_1 – висота контактної вставки; $2h_1 \cdot a$ – торцеві поверхні ЕКВС; $a \cdot l$ – нижня поверхня ЕКВС.

9. Визначити потужність електричних втрат ΣP :

$$\Sigma P = P_k + P_p + P_v, \quad (7)$$

де P_k – потужність електричних втрат у контакті ЕКП – ЕКВС:

$$P_k = I_{06}^2 \cdot R_{\Pi}; \quad (8)$$

P_p – потужність електричних втрат у тілі ЕКП:

$$P_p = I_{06}^2 \cdot R_p = I_{06}^2 \cdot \rho_p \frac{l}{S_{ЕКП}}, \quad (9)$$

тут ρ_p – питомий опір матеріалу контактного проводу; $S_{ЕКП}$ – площа поперечного перерізу ЕКП з урахуванням його зношення; P_v – потужність електричних втрат у тілі ЕКВС:

$$P_v = I_{06}^2 \cdot R_v = I_{06}^2 \cdot \rho_v \frac{h_1}{S_{ЕКВС}}, \quad (10)$$

де ρ_v – питомий опір матеріалу контактної вставки; $S_{ЕКВС}$ – площа поперечного перерізу ЕКВС з урахуванням зношення.

10. Знайти питому потужність тепловіддачі p_0 :

$$p_0 = \frac{\Sigma P}{\Pi_1 + \Pi_2}. \quad (11)$$

11. Розглядаючи ЕКП й ЕКВС як єдину конструкцію з поверхнею тепловіддачі $\Pi_1 + \Pi_2$, за графіком на рис. 3 визначити температуру Θ_y поверхні вказаної конструкції.

12. Гранично допустиму температуру $\Theta_{\text{доп}}$ для обраного типу контактної проводу взяти з табл. 4 Правил будови і технічного обслуговування контактної мережі електрифікованих залізниць [27].

13. Знайти співвідношення між Θ_y і $\Theta_{\text{доп}}$. Зробити висновки та надати рекомендації.

Приклад використання методики.

Відповідно до приведеної методики виконано розрахунок усталеного значення температури контактної з'єднання ЕКП – ЕКВС:

1. Розрахунок виконано для пасажирського електровоза ЧС2.

2. Струмоприймач типу 10PP2, у якого три ряди струмознімальних контактних вставок на полозі ($k=3$). Матеріал, із якого виготовлені контактні вставки, – графіт; поперечний переріз – квадрат зі стороною 30 мм.

3. Тип контактної проводу БрФ–100 (бронзовий із номінальною площею поперечного перерізу 100 мм²). Контактний провід має гранично допустимий знос, тобто залишкова площа поперечного перерізу на 30 % менша за номінальну ($S_{ЕКП} = 70$ мм²).

4. Мінімальне значення зусилля натискання струмоприймача типу 10PP2 на контактний провід $F = 8$ кг [15].

Коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалів контактів $k_0 = 2 \times 10^{-3}$ Ом·кг [14].
Перехідний опір R_{Π} контакту ЕКП – ЕКВС:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

$$R_n = \frac{k_0}{F^n} = \frac{2 \times 10^{-3}}{8} = 0,25 \times 10^{-3} \text{ Ом.}$$

5. Візьмемо тривалий струм під час стоянки $I_T = 300 \text{ А.}$

6. Струм, що протікає через один контакт ЕКП – ЕКВС:

$$I_{об} = \frac{I_T}{k} = \frac{300}{3} = 100 \text{ А.}$$

7. Скориставшись формулами (3 – 5), визначаємо площу поверхні елементу ЕКП Π_1 . Для гранично зношеного контактного проводу $H = 11,8 \text{ мм}$, $h = 7,79 \text{ мм}$, $R = 6,5 \text{ мм}$ [14], тоді $H_1 = R - (H - h) = 6,5 - (11,8 - 7,79) = 2,49 \text{ мм}$;

$$\frac{a}{2} = \sqrt{R^2 - H_1^2} = \sqrt{6,5^2 - 2,49^2} = 6 \text{ мм};$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{a/2}{R}\right) = \arcsin\left(\frac{6}{6,5}\right) = 67^\circ;$$

$$x = \frac{2\beta \cdot 2\pi R}{360^\circ} = \frac{2 \cdot 67^\circ \cdot 2 \cdot \pi \cdot 6,5}{360^\circ} = 15,19 \text{ мм.}$$

Експериментально встановлено, що периметр поперечного перерізу нового контактного проводу БрФ–100 дорівнює $L_n = 40,5 \text{ мм}$. Тоді периметр гранично зношеного контактного проводу (зношеність до 70 % від номінальної площі поперечного перерізу) буде дорівнює $(L_n - x) = 40,5 - 15,19 = 24,96 \text{ мм}$. Таким чином, $\Pi_1 = (L_n - x)l = 24,96 \cdot 30 = 748,8 \text{ мм}^2$, де $l = 30 \text{ мм}$ – ширина контактної вставки струмоприймача.

8. Максимально допустиме зношування графітової контактної вставки по висоті 20 мм, тобто $h_1 = 10 \text{ мм}$ (рис. 5). Площа поверхні ЕКВС Π_2 , з якої віддається тепло:

$$\Pi_2 = 2h_1 \cdot a + a \cdot l = 2 \cdot 10 \cdot 12 + 12 \cdot 30 = 600 \text{ мм}^2.$$

9. Потужність електричних втрат ΣP визначаємо, скориставшись формулами (7 – 10):

– потужність електричних втрат у контакті ЕКП – ЕКВС:

$$P_k = I_{об}^2 \cdot R_n = 100^2 \cdot 0,25 \times 10^{-3} = 2,5 \text{ Вт};$$

– потужність електричних втрат у тілі ЕКП:

$$P_p = I_{об}^2 \cdot \rho_p \frac{l}{S_{ЕКП}} = 100^2 \cdot 0,1 \frac{0,03}{70} = 0,4 \text{ Вт},$$

де $\rho_p = 0,1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ – питомий електричний опір бронзи;

– потужність електричних втрат у тілі ЕКВС:

$$P_v = I_{об}^2 \cdot \rho_v \frac{h_1}{S_{ЕКВС}} = 100^2 \cdot 8 \times 10^{-6} \frac{0,01}{360 \times 10^{-6}} = 0,22 \text{ Вт},$$

де $\rho_v = 8 \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ – питомий електричний опір графітової контактної вставки; $S_{ЕКВС} = a \cdot l = 0,012 \cdot 0,03 = 360 \times 10^{-6} \text{ м}^2$ – площа поперечного перерізу ЕКВС з урахуванням зношення;

$$\Sigma P = P_k + P_p + P_v = 2,5 + 0,4 + 0,22 = 3,12 \text{ Вт.}$$

10. Питома потужність тепловіддачі p_0 :

$$p_0 = \frac{\Sigma P}{\Pi_1 + \Pi_2} = \frac{0,00312}{(748,8 + 600) \times 10^{-6}} = 2,31 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$$

11. За графіком на рис. 3 визначаємо температуру поверхні вказаної конструкції – $\Theta_y = 150^\circ \text{С}$.

12. Гранично допустиме значення температури контактного проводу, що виконаний з бронзи, $\Theta_{доп} = 120^\circ \text{С}$.

13. Співвідношення

$\Theta_y = 150^\circ \text{С} > \Theta_{доп} = 120^\circ \text{С}$ – вказує на те, що контактний провід перегрівается і втрачає свої механічні властивості.

Для усунення можливості перегрівання контактного проводу в місці контакту з контактними вставками струмоприймача рекомендуємо під час обігріву чи кондиціонування поїзда на стоянці піднімати два струмоприймачі. У тако-

му випадку $I_{об} = \frac{I_T}{2k} = \frac{300}{2 \cdot 3} = 50 \text{ А.}$

Якщо провести аналогічні розрахунки для незношеного контактного проводу (середній знос по площі поперечного перерізу не пере-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

вищує 15 %) і нової контактної вставки, отримаємо:

$$\Sigma P = 2,9 \text{ Вт}; P_1 = 1180,8 \text{ мм}^2; P_2 = 876,6 \text{ мм}^2;$$

$$P_0 = \frac{\Sigma P}{P_1 + P_2} = \frac{0,0029}{(1180,8 + 876,6) \times 10^{-6}} = 1,41 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}.$$

Із графіка на рис. 3 $\Theta_y = 117^\circ \text{C}$;

$\Theta_y = 117^\circ \text{C} < \Theta_{\text{доп}} = 120^\circ \text{C}$ – контактний провід не перегрівається.

Результати

Зазначена проблема перепалювання контактної провуду в місцях підготовки поїздів до рейсу пояснюється його локальним перегріванням і втратою механічної міцності.

Результати даної роботи, а саме методологія, дозволяють в умовах експлуатації оперативно визначати тепловий стан ковзного контакту ЕКП – ЕКВС під час підготовки поїзда до рейсу [26]. Стандартний підхід визначення тривалості обігріву/кондиціонування базується на усереднених значеннях навантажень на систему і тому не враховує деяких факторів, наприклад, стан контактної провуду, стан контактної вставки струмоприймача, кількість вагонів у поїзді тощо. Запропонована методика базується на класичній теорії електричного контакту й теорії нагрівання однорідного тіла, що дозволяє досить точно оцінити тепловий стан силового ковзного контакту і є досить зручною для використання в умовах експлуатації.

Методика не вимагає значних розрахунків, за вихідні дані виступає інформація, доступна до вимірювання та контролю силами станції або депо. Необхідно відзначити, що в розрахунках формула (2) не враховує ступінь забрудненості робочої поверхні контактної провуду, а отже, в умовах реальної експлуатації величина може дещо перевищувати розрахункове значення.

Особливістю методики можна вважати необхідність мати залежність температури контакту ЕКП – ЕКВС від питомої потужності з поверхні, що віддає тепло. Отримання такої залежності є окремим завданням, яке може бути вирішене в перспективі.

До недоліків слід віднести обмеженість застосування цієї методики тільки умовами підготовки поїзда на стоянці.

Робота має прикладний аспект, оскільки дає можливість удосконалення типового технологічного процесу – технології підготовки поїзда до рейсу. При цьому представлений матеріал є частиною більш ґрунтовної роботи, спрямованої на підвищення ефективності та надійності роботи електрифікованого залізничного транспорту, а саме вирішення проблем, пов'язаних із передачею електроенергії на борт транспортної засоби за допомогою силового ковзного контакту.

Наукова новизна та практична значимість

1. Аналіз результатів розрахунку дає можливість розробити заходи щодо запобігання перегріву зазначеного елемента контактної провуду. Розрахунок необхідно проводити за умов, що сприяють перегріву цього елемента.

2. Установлено, що основними факторами, що визначають величину струму, за якого може відбутися перепалювання контактної провуду, є: тип рухомого складу, тип контактної провуду, матеріал контактної вставки струмоприймача.

3. Запропонована методика враховує ступінь зношеності контактної провуду та стан контактних вставок струмоприймача на відміну від наявих підходів під час розрахунків теплового стану контакту.

4. Доповнивши стандартні інструкції з підготовки поїзда до рейсу запропонованою методикою оцінки теплового стану вузла струмознімання ЕКП – ЕКВС, можна розраховувати на зниження кількості випадків руйнування елементів контактної мережі, що дозволить підвищити надійність роботи залізничного транспорту в цілому.

Висновки

На базі класичної теорії електричного контакту та теорії нагрівання однорідного тіла розроблено методику розрахунку температури нагрівання місця контакту контактної провуду з контактною вставкою струмоприймача в умовах підготовки поїзда до рейсу. У цих умовах

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

мають місце такі особливості роботи ковзного контакту:

– контакт ЕКП – ЕКВС нерухомий, що погіршує умови тепловіддачі в навколишнє середовище, оскільки він не обдувається;

– через контакт протікає тривалий час струм, що витрачається на обігрів чи кондиціонування (близько 300 А).

Критичним для роботи контакту ЕКП – ЕКВС в означених умовах є стан контактного проводу та контактної вставки. Розрахунки показують, що для бронзового контактного проводу, залишкова площа поперечного перерізу якого зменшилась на 30 % порівняно з її номінальною величиною, температура контакту

складе $\Theta_y = 150^\circ\text{C}$, а це перевищує гранично допустиме значення на 20 % та однозначно призводить до деградації контактного проводу (втрата міцності і, як наслідок, обрив).

Робота має чітко виражений прикладний характер і спрямована на вдосконалення типового технологічного процесу – технології підготовки поїзда до рейсу. Оцінка теплового стану вузла струмознімання ЕКП – ЕКВС в процесі підготовки поїзда до рейсу – це ще один фактор, що сприятиме зниженню кількості випадків руйнування елементів контактної мережі та дозволить підвищити надійність роботи залізничного транспорту в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров Г. Н. *Теория электрических аппаратов : учебник для вузов*. Санкт-Петербург : Издательство СПбГТУ, 2000. 540 с.
2. Беляев И. А. *Машинисту о контактной сети и токосъеме*. Москва : Транспорт, 1986. 128 с.
3. Берент В. Я. Совершенствование проводов контактной сети. *Вестник ВНИИЖТ*. 2012. № 3. С. 40–45.
4. Большаков Ю. Л., Гершман И. С., Сыченко В. Г. Перспективные направления создания современных углеродных материалов для вставок токоприемников электротранспорта. *Електрифікація транспорту*. 2013. № 5. С. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i5.24302>
5. *ДСТУ ГОСТ 32204:2016. Токоприемники железнодорожного электроподвижного состава*. [Чинний від 2016-10-01]. Москва : Стандартинформ, 2014. 24 с.
6. *ДСанПіН 7.7.2-015-99. Експлуатація рухомого складу залізничного транспорту для пасажирських перевезень* : постанова ГДСЛУ № 15 від 09.02.1999.
7. Емельянова М. Н. Обоснование механической величины эксплуатационной термомеханической нагрузки на провода контактной сети. *Известия Транссиба*. 2014. № 2 (18). С. 55–60.
8. Захарченко Д. Д. *Тяговые электрические аппараты*. Москва : Транспорт, 1991. 247 с.
9. Ли В. Н., Матыцын Е. В. Определение качества изготовления угольных вставок токоприемников. *Електрифікація транспорту*. 2012. № 3. С. 71–73. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i3.17996>
10. Марквардт К. Г. *Контактная сеть : учебник для вузов железнодорожного транспорта*. Москва : Транспорт, 1994. 335 с.
11. Мерл В. *Электрический контакт. Теория и применение на практике*. Москва–Ленинград : Госэнергоиздат, 1962. 80 с.
12. Таев И. С. *Основы теории электрических аппаратов : учебник для вузов*. Москва : Высш. шк., 1987. 352 с.
13. Паранин А. В., Акиншин Н. А., Батрашов А. Б. Экспериментальное исследование работы электрического контакта «контактный провод – токосъемная пластина» в статическом положении. *Транспорт Урала*. 2013. № 4 (39). С. 93–96.
14. *Правила устройства и технического обслуживания контактной сети электрифицированных железных дорог : ЦЕ-0023* : утвержденных Приказом Укрзалізничці от 20.11.2007г. № 546-Ц. Киев.
15. Раков В. А. *Пассажирский электровоз ЧС2*. Москва : Транспорт, 1976. 320 с.
16. Тепловой расчет контактного соединения проводников. URL: <http://elektroas.ru/teplovoj-raschet-kontaktного-soedineniya-provodnikov> (дата звернення 19.06.2020).
17. Укрзалізниця готує швидкісні поїзди на зиму. URL: https://lb.ua/society/2012/10/25/175908_ukrzaliznitsya_gotovit_skorostnie.html (дата звернення 19.06.2020).
18. Хольм Р. *Электрические контакты*. Москва : Иностранная литература, 1961. 464 с.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

19. Яндович В. Н., Сыченко В. Г., Антонов А. В. Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины : организация надежного токосъема. *Електрифікація транспорту*. 2014. № 7. С. 67–77. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i7.42304>
20. EN 50119:2020. *Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines*. European Standard, CELENEC, 2020. 108 p.
21. Grandin M., Wiklund U. Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. *Tribology International*. 2018. Vol. 121. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004>
22. IEC 62917:2016 – *Railway applications – Fixed installations – Electric traction – Copper and copper alloy grooved contact wires*. DS, 2016. 102 p.
23. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. *Contact Lines for Electric Railways : Planning, Design, Implementation, Maintenance, 3rd Edition*. Wiley Publishers, 2017. 994 p.
24. Plesca A. Thermal analysis of sliding electrical contacts with mechanical friction in steady state conditions. *International Journal of Thermal Sciences*. 2014. Vol. 84. P. 125–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.009>
25. Shimanovsky A., Yakubovich V., Kapliuk I. Modeling of the Pantograph – Catenary Wire Contact Interaction. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 134. P. 284–290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.009>
26. Ustymenko D., Kuznetsov V., Marenych O., Kovzel M., Mukha A., Sinkevych O., Tryputen M., Mohammad Ahmad Diab Al Said Ahmad. Development of a Method of Calculating the Temperature of a Survey Assembly When Preparing a Train Dispatch. *IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (Lviv – Slavske, 25–29 February 2020). P. 600–605. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235502>
27. Wang W., Dong A., Wu G., Gao G., Zhou L. Study on Characterization of Electrical Contact between Pantograph and Catenary. In *Proceedings of the 2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts* (Minneapolis, 11–14 September 2011). P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2011.6034815>
28. Wu G., Wei W., Gao G., Wu J., Zhou Y. Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*. 2016. Vol. 24. P. 132–138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0099-1>
29. Xuan G., Wenzheng L., Zhongping Y., Yifei W. The study on electrical temperature characteristics of high-speed pantograph. *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*. 2014. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941014>
30. You C. X. A Study on Dynamic Measurement System of Contact Wire Wear in Electrified Railway. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 154. P. 210–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.06.032>

А. М. МУХА^{1*}, Д. В. УСТИМЕНКО^{2*}

^{1*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

^{2*}Каф. «Електротехніка і електромеханіка», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 47, ел. пошта ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ НАГРЕВА МЕСТА КОНТАКТА КОНТАКТНОГО ПРОВОДА СО ВСТАВКОЙ ТОКОПРИЕМНИКА

Цель. Основной целью нашей работы является разработка методики оценки температуры нагрева зоны контакта контактного провода с контактной вставкой токоприемника (элемент контактного провода – элемент контактной вставки токоприемника, сокращенно – ЭКП – ЭКВТ) для условий стоянки при подготовке поезда к рейсу с определением предельной токовой нагрузки на данный узел. **Методика.** Предложено рассматривать контакт ЭКП – ЭКВТ с точки зрения классической теории электрического контакта и нагрева однородного тела. **Результаты.** Рассмотрены особенности теплового состояния узла токосъема ЭКП – ЭКВТ в условиях подготовки электроподвижного состава к рейсу. В рамках исследования разработана методика оценки температуры нагрева зоны силового скользящего контакта в условиях подготовки поезда

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

к рейсу. Применение методики будет способствовать уменьшению количества пережигов контактного провода благодаря точному выбору времени прогрева/кондиционирования поезда для определенного тока обогрева/кондиционирования при подготовке электроподвижного состава к рейсу. **Научная новизна.** Установлено, что причиной пережигов контактного провода на стоянках при подготовке поезда к рейсу является превышение допустимой температуры силового скользящего контакта в результате длительного действия тока обогрева/кондиционирования. В отличие от стандартного подхода по установлению продолжительности обогрева поезда, предложенная методика учитывает дополнительные факторы, а именно износ и состояние контактного провода, состояние контактной вставки токоприемника. Данная методика базируется на классической теории электрического контакта и теории нагрева однородного тела, что позволяет достаточно точно оценить тепловое состояние силового скользящего контакта, и является достаточно удобной для использования в условиях эксплуатации. **Практическая значимость.** Результаты работы имеют практическую ценность, поскольку технология подготовки поезда к рейсу может быть дополнена расчетом температуры контакта ЭКП – ЭКВТ в соответствии с предложенной методикой. Это позволит для конкретного поезда в конкретных условиях применять комплекс мер по недопущению пережигания контактного провода в случае возможного превышения температурой допустимого значения.

Ключевые слова: контактный провод; контактная вставка; ток обогрева; пережиг; допустимая температура; электрический контакт

A. M. MUKHA^{1*}, D. V. USTYMENKO^{2*}

1*Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail mukha.andrii@gmail.com, ORCID 0000-0002-5629-4058

2*Dep. «Electrical Engineering and Electromechanics», Dnipro National University named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 47, e-mail ustimenko.1979@gmail.com, ORCID 0000-0003-2984-4381

ESTIMATION METHODOLOGY OF HEATING THE CONTACT PLACE OF CONTACT WIRE WITH CONTACT STRIP OF PANTOGRAPH

Purpose. The main purpose of our work is to develop a method for assessing the heating temperature of the contact area of contact wire with contact strip of pantograph (the contact wire element – the contact strip element of pantograph, in abbreviated form – CWE – CSEP) for parking conditions when preparing the train for the trip with the determination of the maximum current load on given node. **Methodology.** We proposed to consider the CWE – CSEP contact from the point of view of the classical theory of electrical contact and heating of a homogeneous body. **Findings.** The features of thermal state of the current collection unit of CWE – CSEP in the conditions of preparing the electric rolling stock for the trip are considered. Within the framework of the study a methodology for assessing the heating temperature of the zone of power sliding contact in the conditions of train preparation for the trip has been developed. The application of the methodology will help reduce the number of burnings through of the contact wire due to the precise choice of the heating/conditioning time of the train for a certain heating/conditioning current when preparing the electric rolling stock for the trip. **Originality.** It has been established that the reason for burnings through the contact wire in stalls when preparing the train for the trip is the excess of permissible temperature of the power sliding contact as a result of prolonged action of the heating/conditioning current. In contrast to the standard approach for determining the duration of the train heating, the proposed methodology takes into account additional factors, namely, the wear and condition of the contact wire, condition of contact strip of the pantograph. This methodology is based on the classical theory of electrical contact and the theory of heating a homogeneous body, which allows accurate assessment of the thermal state of a power sliding contact, and is convenient enough for use in operating conditions. **Practical value.** The results of the work are of practical value, since the technology of preparing a train for a trip can be supplemented by calculating the temperature of the CWE – CSEP contact in accordance with the proposed methodology. This will allow applying a set of measures to prevent burnings through of the contact wire in case of possible temperature exceeding the permissible value for a specific train in specific conditions.

Keywords: contact wire; contact strip; heating current; burning through; permissible temperature; electrical contact

REFERENCES

1. Aleksandrov, G. N. (2000). *Teoriya elektricheskikh apparatov: uchebnik dlya vuzov*. Saint Petersburg: Izdatel'stvo SPbGTU. (in Russian)
2. Belyaev, I. A. (1986). *Mashinistu o kontaktной seti i tokoseme*. Moscow: Transport. (in Russian)
3. Berent, V. Ya. (2012). Upgrading catenary wires. *VNIIZHT Scientific Journal*, 3, 40-45. (in Russian)
4. Bolshakov, Y. L., Gershman, I. S., & Sichenko, V. G. (2013). Perspective directions of development of modern carbon materials for electric surface inserts. *Electrification of Transport*, 5, 19-24. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i5.24302> (in Russian)
5. *Tokopriemniki zheleznodorozhnogo elektropodvizhnogo sostava, 24 DSTU GOST 32204-2016* (2014). (in Ukrainian)
6. *Ekspluatatsiya ruxomogo skladu zalizny`chnogo transportu dlya pasazhy`rs`ky`x perevezhen`*. *DerzhSanPin 7.7.2-015-99* (1999). (in Ukrainian)
7. Emelianova, M. N. (2014). Substantiation of mechanical value of operating thermo-mechanical loads on the overhead contact system wires. *Journal of Transsib Railway Studies*, 2(18), 55-60. (in Russian)
8. Zakharchenko, D. D. (1991). *Tyagovye elektricheskie apparaty*. Moscow: Transport. (in Russian)
9. Lee, V. N., & Matytsyn, Ye. V. (2012). Determination of the quality of manufacturing carbon inserts pantographs. *Electrification of Transport*, 3, 71-73. DOI: <https://doi.org/10.15802/etr.v0i3.17996> (in Russian)
10. Markvardt, K. G. (1994). *Kontaktная set: uchebnik dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. Moscow: Transport. (in Russian)
11. Merl, V. (1962). *Elektricheskiy kontakt. Teoriya i primeneniye na praktike*. Moscow-Leningrad: Gosenergoizdat. (in Russian)
12. Taev, I. S. (1987). *Osnovy teorii elektricheskikh apparatov: uchebnik dlya vuzov* Moscow: Vysshaya shkola. (in Russian)
13. Pararin, A. V., Akinshin, N. A., & Batrashov, A. B. (2013). Experimental studies of operation of electrical contact «catenary wire-collecting plates» in static position. *Transport Urala*, 4(39), 93-96. (in Russian)
14. *Pravila ustroystva i tekhnicheskogo obsluzhivaniya kontaktной seti elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog : TsYe-0023, No. 546-Ts* (2007). Kiev. (in Russian)
15. Rakov, V. A. (1976). *Passazhirskiy elektrovoz ChS2*. Moscow: Transport. (in Russian)
16. Teplovoy raschet kontaktного soedineniya provodnikov. Retrieved from <http://elektroas.ru/teplovoj-raschet-kontaktного-soedineniya-provodnikov> (in Russian)
17. Ukrzaliznytsia hotuie shvydkisni poizdy na zymu. Retrieved from https://lb.ua/society/2012/10/25/175908_ukrzaliznytsya_gotovit_skorostnie.html (in Ukrainian)
18. Kholm, R. (1961). *Elektricheskie kontakty*. Moscow: Inostrannaya literatura. (in Russian)
19. Yandovich, V. N., Sychenko, V. G., & Antonov, A. V. (2014). The comparative analysis of the catenaries in the European union and Ukraine: The organization of a reliable current collection. *Electrification of Transport*, 7, 67-77. (in Russian)
20. *Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines, 108 EN 50119:2020* (2020). (in English)
21. Grandin, M., & Wiklund, U. (2018). Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. *Tribology International*, 121, 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004> (in English)
22. *Railway applications-Fixed installations-Electric traction-Copper and copper alloy grooved contact wires, 102 IEC 62917:2016* (2016). (in English)
23. Kiessling, F., Puschmann, R., Schmieder, A., & Schneider, E. (2017). *Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance, 3rd Edition*. Wiley Publishers. (in English)
24. Plesca, A. (2014). Thermal analysis of sliding electrical contacts with mechanical friction in steady state conditions. *International Journal of Thermal Sciences*, 84, 125-133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.05.009> (in English)
25. Shimanovsky, A., Yakubovich, V., & Kapliuk, I. (2016). Modeling of the Pantograph-Catenary Wire Contact Interaction. *Procedia Engineering*, 134, 284-290. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.009> (in English)
26. Ustyenko, D., Kuznetsov, V., Marenych, O., Kovzel, M., Mukha, A., Sinkevych, O., Tryputen, M., & Mohammad, Ahmad Diab Al Said Ahmad. (2020). Development of a Method of Calculating the Temperature

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

- of a Survey Assembly When Preparing a Train Dispatch. *IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)* (pp. 600-605). Lviv-Slavske, Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235502> (in English)
27. Wang, W., Dong, A., Wu, G., Gao, G., & Zhou, L. (2011). Study on Characterization of Electrical Contact between Pantograph and Catenary. *In Proceedings of the 2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts* (pp. 1-6). Minneapolis, USA. DOI: <https://doi.org/10.1109/HOLM.2011.6034815> (in English)
28. Wu, G., Wei, W., Gao, G., Wu, J., & Zhou, Y. (2016). Evolution of the electrical contact of dynamic pantograph–catenary system. *Journal of Modern Transportation*, 24(2), 132-138. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-016-0099-1> (in English)
29. Xuan, G., Wenzheng, L., Zhongping, Y., & Yifei, W. (2014). The study on electrical temperature characteristics of high speed pantograph. *2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/ITEC-AP.2014.6941014> (in English)
30. You, C. X. (2019). A Study on Dynamic Measurement System of Contact Wire Wear in Electrified Railway. *Procedia Computer Science*, 154, 210-220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.06.032> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.02.2020

Прийнята до друку: 30.07.2020