

В.Х. Далека, В.І. Скуріхін, Д.О. Личов

Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Україна

ЗАКОНОМІРНОСТІ ЗНОШУВАННЯ КОНТАКТНОГО ПРОВОДУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА МІСЬКОМУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ

Розглянуто питання зміни форми поперечного перерізу контактного проводу системи електропостачання міського електротранспорту. Наведено математичні залежності зносу контактного проводу. Отримано математичну модель зношування контактного проводу, яка визначає його зношування в трьох проекціях при відповідному пробігу з урахуванням струму навантаження. Запропонована модель дозволить створити випробувальний пристрій для фізичного моделювання основних параметрів струмознімання в системі електропостачання електротранспорту.

Ключові слова: контактний провід, електричний та механічний знос, напружено-деформований стан, критерії якості струмознімання.

Постановка проблеми

Проблема надійності і економічності струмознімання міського електричного транспорту стала все сильніше проявлятися із зростанням вартості та обмежень усіх видів ресурсів. Це потребує удосконалення конструкції струмоприймачів, контактної мережі, вибору матеріалів для контактного проводу, а також проведення наукових досліджень [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Встановлення закономірностей зношування ковзних контактів на прикладі пар тертя «контактний провід – струмоприймач» було здійснено, зокрема, в роботах [2,3,4,5], але вони не враховують в повній мірі дугоутворювальні процеси у відповідній парі тертя. На базі відповідних рівнянь [4] можливо отримати залежності, які пов'язують електричні, механічні, фізико-хімічні та триботехнічні характеристики контактного проводу відносно до умов експлуатації міського електротранспорту.

Мета роботи

Встановити основні закономірності зношування контактного проводу для подальшого формування вимог до апаратних засобів дослідження роботи ковзного контакту «контактний провід – струмоприймач» з урахуванням струму навантаження.

Виклад основного матеріалу

Фрикційна взаємодія елементів трибосистеми «контактний провід – струмоприймач» являє собою нелінійний процес, який визначається великою

кількістю взаємозалежних факторів – як внутрішніх (фізико-хімічні властивості матеріалів пари тертя), так і зовнішніх (динамічні навантаження, наявність електричного струму в контакті, параметри зовнішнього середовища та ін.) [5, 6, 7].

Матеріалам властиві неоднорідність структури поверхневого шару і концентрація скупчення дефектів та локалізація внутрішніх напружень в наслідок механічного та електричного зносу. В результаті відбувається знос поверхні контактного проводу.

Зниження інтенсивності зношування повинно зводитися до анігіляції конфігураційної ентропії, відповідно вимог другого закону термодинаміки [8].

У процесі експлуатації геометрична форма контактного проводу змінюється і являє собою складну поверхню n -го порядку, яку при фізичному моделюванні можна спростити і подати у вигляді поверхонь другого порядку, що переходять з одного виду в інший, тобто зносу зі зменшенням геометричних параметрів (рис. 1) [9,10,11].

В рамках вирішення завдання забезпечення якісного струмознімання був виконаний комплекс досліджень із інтенсивності зношування контактного проводу для міського електричного транспорту. Основним критерієм зносу було прийнято мінімально допустимий переріз контактного проводу.

Припрацювання поверхні контактного проводу в процесі попередньої роботи і подальшої експлуатації контактної мережі міського електротранспорту можна розглядати в загальному випадку як макрорельєф, а в локальному – як мікрорельєф. Причому макрорельєф буде визначатись сукупністю мікрорельєфів.

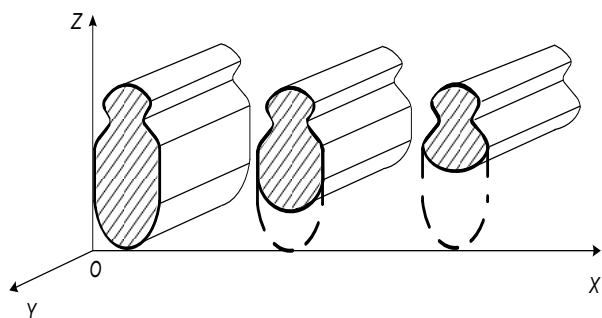


Рис. 1. Зміна геометричних параметрів поперечного перерізу контактної мережі від початкового (нового) до граничного (непридатного в експлуатації)

Враховавши напружено-деформований стан робочої поверхні контакту розглянемо зміну форми перерізу контактної мережі з математичної точки зору. Для цього спрямуємо вісь OY вздовж напрямку руху струмоприймача відносно контактної мережі, а OX і OZ у перпендикулярних напрямках для руху струмоприймача вздовж контактної мережі. Тоді згідно роботи [4] координати точок поверхні контактної мережі можна визначити за виразами:

$$x = f(y, z, c_1) \pm \sqrt{B(y, z, c_1)}; \quad (1)$$

$$y = f(x, z, c_2) \pm \sqrt{B(x, z, c_2)}; \quad (2)$$

$$z = f(x, y, c_3) \pm \sqrt{B(x, y, c_3)}; \quad (3)$$

де $f(y, z, c_1)$, $f(x, z, c_2)$, $f(x, y, c_3)$ – функції, що характеризують зношення в перерізах XOY , XOZ , YOZ , які виникають у процесі тертя контактної мережі з контактною вставкою;

c_1, c_2, c_3 – константи, які залежать від форми робочої поверхні контактної мережі;

$\pm \sqrt{B(y, z, c_1)}, \pm \sqrt{B(x, z, c_2)}, \pm \sqrt{B(x, y, c_3)}$ –

девіаторні частини тензора деформацій, що відповідають за зміну форми контактної мережі при взаємодії з контактною вставкою;

$B(y, z, c_1), B(x, z, c_2), B(x, y, c_3)$ – функції переміщення точок робочої поверхні вставки струмоприймача при русі у напрямках зазначених осей координат.

В результаті процесу тертя і зношення для визначення зміщення будь-якої точки з вихідної поверхні на поверхні необхідно провести розклад цих рівнянь в ряд Тейлора [12] і обмежитися похідними першого порядку, оскільки похідні вищого порядку не мають суттєвого впливу на

напружено-деформований стан контактної мережі.

Згідно роботи [13] деформацію матеріалу у будь-якій точці контактної мережі можна визначити скороченням будь-якого лінійного елемента поверхні, що проходить через цю точку. Координати елемента по відношенню до досліджуваної точки дорівнюють:

$$dx = \lambda l; \quad dy = \lambda m; \quad dz = \lambda n, \quad (4)$$

де λ – початкові розміри контактної мережі; l, m, n – спрямовуючі косинуси, які відображують умови навантаження при протіканні відповідних процесів тертя.

В результаті процесу тертя відбувається зміщення u_x, u_y, u_z елемента, тобто знос контактної мережі, вздовж осей координат OX, OY, OZ , яке можна визначити за виразами:

$$u_x = \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} f(y, z) dz dy}{\sqrt{f(y, z, c_1)}} = \frac{\partial A}{\partial y} \lambda m + \frac{\partial A}{\partial z} \lambda n + \frac{\int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} f(y, z) dz dy}{\sqrt{f(y, z, c_1)}}; \quad (5)$$

$$u_y = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial z} dz + \frac{\int_{x_1}^{x_2} \int_{x_1}^{x_2} f(x, z) dz dx}{\sqrt{f(x, z, c_2)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \lambda l + \frac{\partial A}{\partial z} \lambda n + \frac{\int_{x_1}^{x_2} \int_{x_1}^{x_2} f(x, z) dz dx}{\sqrt{f(x, z, c_2)}}; \quad (6)$$

$$u_z = \frac{\partial A}{\partial x} dx + \frac{\partial A}{\partial y} dy + \frac{\int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} f(y, x) dy dx}{\sqrt{f(x, z, c_3)}} = \frac{\partial A}{\partial x} \lambda l + \frac{\partial A}{\partial y} \lambda m + \frac{\int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} f(y, x) dy dx}{\sqrt{f(x, z, c_3)}}; \quad (7)$$

В системі рівнянь (5) – (7) знос контактної мережі по осях x, y, z визначаються з виразів згідно роботи [10]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + x = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + y = 0, \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + z = 0 \end{cases} \quad (8)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальні напруження вздовж осей координат;

$\tau_{xy}, \tau_{zx}, \tau_{yz}$ – дотичні напруження.

Кількість поглинутої електричної та механічної енергії в процесі тертя виглядатиме таким чином

$$A = \mu FL + kIUt, \quad (9)$$

де μ – механічний коефіцієнт тертя;

F – механічне навантаження;

L – пробіг;

k – коефіцієнт пропорційності, який залежить

від електричних параметрів матеріалів тертя;

I – струм навантаження;

U – напруга контактної мережі;

t – час протікання струму в контакті «контактний провід - струмоприймач».

Кількість енергії в контакті «контактний провід - струмоприймач» залежить від інтенсивності енергії, що підводиться та розсіюється. Якщо інтенсивність підведеного потоку електричної та механічної енергії подати через похідну від поглинутої енергії за часом t , то отримаємо потужність тертя:

$$\frac{dA}{dt} = \mu FV + kIU, \quad (10)$$

де V – швидкість руху.

Якщо врахувати вираз (10), зміщення u_x, u_y, u_z вздовж осей координат OX, OY, OZ можна отримати математичну модель зношування контактної провуду:

$$u_x = \left(\mu F + \frac{kIU}{V} \right) \left(\frac{\partial L}{\partial y} m + \frac{\partial L}{\partial z} n \right) \lambda + \frac{\int_{y1}^{y2} \int_{z1}^{z2} f(y, z) dz dy}{\sqrt{f(y, z, c)}}; \quad (11)$$

$$u_y = \frac{\int_{x1}^{x2} \int_{z1}^{z2} f(x, z) dz dx}{\sqrt{f(x, z, c)}}; \quad (12)$$

$$u_z = \left(\mu F + \frac{kIU}{V} \right) \left(\frac{\partial L}{\partial x} l + \frac{\partial L}{\partial y} m \right) \lambda + \frac{\int_{x1}^{x2} \int_{y1}^{y2} f(y, x) dz dx}{\sqrt{f(y, x, c_3)}}; \quad (13)$$

Зміщення u_y (12) визначає координати точок при зміщенні u_x, u_z контактної провуду вздовж осей координат OX та OZ .

Розв'язуючи систему рівнянь (11) – (13) для визначених початкових умов та враховуючи геометрію вихідного стану контактної провуду, можна знайти зміщення u_x, u_z , а потім утворений переріз контактної провуду при відповідному пробігу та експлуатаційних навантаженнях рухомого складу. Графічна залежність представлена на рис. 2 ілюструє вищезазначене, де L, b, h – довжина, ширина, висота контактної провуду відповідно:

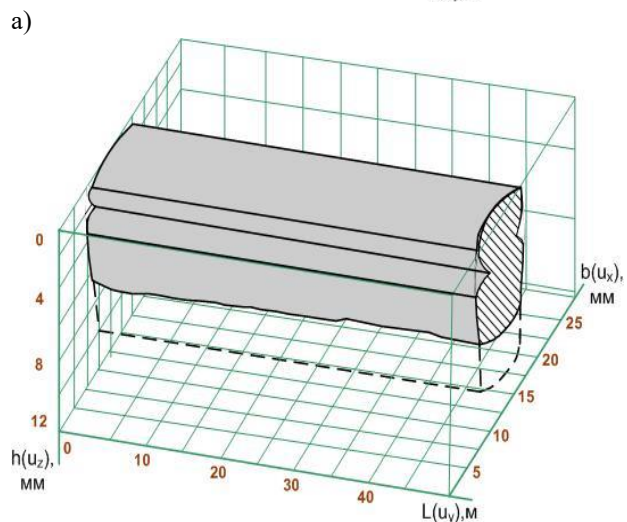
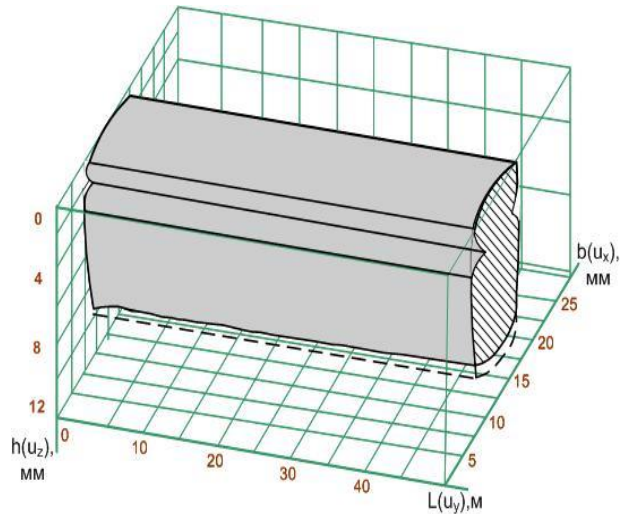


Рис. 2. Форма перерізу контактної провуду з урахуванням струму навантаження при пробігах:
а) 350 тис. км; б) 650 тис. км.

Висновки

1. Отримана математична модель зношування контактної провладу в трьох проекціях (11-13), що забезпечує можливість визначити переріз контактної провладу при відповідному пробігу рухомого складу міського електротранспорту з урахуванням струму навантаження.

2. За допомогою математичної моделі можливо визначити та отримати силові, кінематичні, динамічні, енергетичні та геометричні параметри, необхідні для проектування контактної мережі і струмоприймачів і можуть бути досліджені на спеціальних пристроях.

Література

1. Сидоров, О. А. Методы исследования износа контактных пар устройств токосъема монорельсового электрического транспорта [Текст] : Монография / О. А. Сидоров, С. А. Ступаков. Омск, 2009. – 155 с.
2. Deutzer, M. (2009) *Elektrische Bahnen*, 3, 128–134.
3. Biesenack, H., Pintscher, F. (2005) *Elektrische Bahnen*, 3, 138 – 146.
4. Гершман, И.С. Совместимость материалов при трении с токосъёмом [Текст] / И.С. Гершман // *Трение и износ*. – 2000. – Т.21. – №5. – С. 540-543.
5. Judge, T. (2008) Remote monitoring of the technical state. *Railway Age*, 8, 33 – 36.
6. EN 50405. EUROPEAN STANDARD. (2006) Railway applications, current collection systems, pantographs, testing methods for carbon contact strips, 16.
7. Dr. D. Wehrhahn Meßsysteme für die Qualitätssicherung. Online contact line measuring system OVHWizard for monitoring the contact line position during travel [Электронный ресурс] // *RTR Russia Edition I, October 2012*.
8. Колесов, С.М. Матеріали та взаємодія контактної підвіски і струмоприймача [Текст] / С.М. Колесов, І.С. Колесов. – Д.: Вид-во: Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. ак. В. Лазаряна, 2006. – 284 с.
9. Скуріхін, В.І. Визначення зносостійкості контактної провладу методом повного факторного експерименту [Текст] / В.І. Скуріхін // *Технологический аудит и резервы производства*. - Вып. №1/2(15), 2014 – С. 26-30.
10. Далека, В. Х. Структуризація системної моделі транспортних систем для формування проектів ресурсозбереження [Текст] / В.Х. Далека, К. О. Сорока, Д. О. Личов // *Комунальне господарство міст: Наук.-техн. сб.* – Харків.: ХНУМГ, 2015. – Вип. 121. – С. 6 – 11.
11. Далека, В. Ф. Оценка влияния условий эксплуатации на технический ресурс подвижного состава [Текст] / В.Ф. Далека, Н.В. Белоус // *Системы обработки информации*. Зб. наук. праць. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ, 2000. – Вип. 3(9). – С. 29-31.
12. Слободян, М. С. Модель динамики электрического контакта [Текст] / М. С. Слободян, С. М. Слободян // *Приборы и системы: Управление, контроль, диагностика*. - 2010. - № 2. - С. 42 - 47.
13. Шавкун, В. М. Моделирование процессов износа контактного провладу городского электротранспорта [Текст] / В. М. Шавкун, В. И. Скуріхін, Н. В. Гарбуз //

Научное периодическое издание CETERIS PARIBUS – М.: №3(3)/2015. – С. 29 - 32.

References

1. Sidorov, O. A., Stupakov, S. A. (2009) *Metody issledovaniya iznosa kontaktnykh par ustroystv tokos"ema monorel'sovogo `elektricheskogo transporta: Monografiya*. Omsk, 155.
2. Deutzer, M. (2009) *Elektrische Bahnen*, 3, 128–134.
3. Biesenack, H., Pintscher, F. (2005) *Elektrische Bahnen*, 3, 138 – 146.
4. Gershman, I.S. (2000) *Sovmestimost' materialov pri trenii s tokos"jomom. Trenie i iznos*, 21, 5, 540-543.
5. Judge, T. (2008) Remote monitoring of the technical state. *Railway Age*, 8, 33 – 36.
6. EN 50405. EUROPEAN STANDARD. (2006) Railway applications, current collection systems, pantographs, testing methods for carbon contact strips, 16.
7. Dr. D. Wehrhahn Meßsysteme für die Qualitätssicherung. Online contact line measuring system OVHWizard for monitoring the contact line position during travel. *RTR Russia Edition I, October 2012*.
8. Kolesov, S.M., Kolesov, I. S. (2006) *Materiali ta vzaemodija kontaktnoi pidviski i strumprijmacha*. D.: Vid-vo: Dnipropetr. nats. un-tu zalizn. transp. im. ak. V. Lazarjana, 284.
9. Skurihin, V.I. (2014) *Viznachennja znosostijkosti kontaktnogo provodu metodom povnogo faktornogo eksperimентu. Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*, 1/2(15), 26-30.
10. Daleka, V. H., Soroka, K. O., Lychov D. O. (2015) *Strukturizatsija sistemnoi modeli transportnih sistem dlja formuvannja proektiv resursozberezhennja. Komunal'ne gospodarstvo mist: Nauk.-tehn. sb. Harkiv.: HNUMG*, 121, 6 – 11.
11. Daleka, V. F., Belous, N. V. (2000) *Otsenka vlijaniya uslovij `ekspluatatsii na tehniceskij resurs podvizhnogo sostava. Sistemi obrobki informatsii. Zb. nauk. prats'. Harkiv: NANU, PANM, HVU*, 3(9), 29-31.
12. Slobodjan, M. S., Slobodjan, S. M. (2010) *Model' dinamiki elektricheskogo kontakta. Pribory i sistemy: Upravlenie, kontrol', diagnostika*, 2, 42 - 47.
13. Shavkun, V. M., Skurihin, V. I., Garbuz, N. V. (2015) *Modelirovanie protsessov iznosa kontaktnogo provoda gorodskogo `elektrotransporta. Nauchnoe periodicheskoe izdanie CETERIS PARIBUS*, 3(3), 29 - 32.

Рецензент: д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричного транспорту М.Ф. Смирний, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

Автор: ДАЛЕКА Василь Хомич
доктор технічних наук, професор
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
E-mail – dalekavf@ukr.net
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3074-5500>

Автор: СКУРІХІН Владислав Ігорович
кандидат технічних наук., доцент
Харківський національний університет міського
господарства ім. О.М. Бекетова,
E-mail – vladscu@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7415-7105>

Автор: ЛИЧОВ Дмитро Олександрович
старший викладач
Харківський національний університет міського
господарства ім. О.М. Бекетова,
E-mail – dimalychov@gmail.com
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3231-5985>

THE REGULARITIES OF WEAR OF A CONTACT WIRE DURING OPERATION ON THE CITY ELECTRIC TRANSPORT

V. Daleka, V. Scurikhin, D. Lychov

O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine

The problem of reliability and efficiency of current collection of urban electric transport has become increasingly apparent with the increase in the cost and limitations of all types of resources. This requires improving the design of current collectors, contact network, selection of materials for the contact wire, as well as research. The materials of the inherent heterogeneity of the structure of the surface layer and the concentration of clusters of defects and the localization of internal stress as a consequence of the mechanical and electrical wear. As a result, the surface of the contact wire is worn. In the framework of the challenge of ensuring quality of current collection was made complex research of intensity of wear of the contact wire for electrical transport. The main wear criterion was the minimum allowable cross-section of the contact wire.

This article describes the features of the influence of physical processes occurring in the friction pair "contact wire-current collector" taking into account the influence of factors such as mechanical load, mileage, speed, current flow time for urban electric transport. Equations are presented that describe the process of displacement along the axes that is, the wear of the contact wire using the method of decomposition of the function into an infinite sum of power functions (Taylor series), the theory of friction and wear, the theory of physical and chemical processes. On the basis of the corresponding equations obtained dependences that relate electrical, mechanical, physico-chemical and tribological characteristics of the contact wire relative to the operating conditions of urban electric transport. A mathematical model of the wear dynamics of the contact wire is obtained, which determines its wear, that is, a section is formed during operation, taking into account the influence of factors such as mechanical load, mileage, speed, time of flow of current in the friction pair "contact wire – current collector". It is shown that the use of the proposed model will create a test device for physical modeling of the main parameters of the current collector of the electric power supply system of electric transport.

Keywords: contact wire, electrical and mechanical wear, stress-strain state, current removal quality criteria.