

## ТРАНСПОРТ

УДК 621.336: 621.331

**Босий Д.О.**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

**Антонов А.В.**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

**Косарев Є.М.**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

**Михайлов В.С.**

ПАТ «Українська залізниця»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ КОНТАКТНИХ ПІДВІСОК НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ СТРУМОЗНІМАННЯ

*Метою роботи є визначення рівня впливу параметрів контактних підвісок на показники якості струмознімання. Заради досягнення поставленої мети та вирішення задач у роботі використовувались теоретичні та експериментальні методи досліджень.*

*У роботі розглянуто наявні підходи дослідження та оцінки взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачем, представлені результати натурних експериментальних досліджень, що лягли в основу для побудови математичних моделей. На розроблених моделях взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами проведено моделювання та визначені основні напрями удосконалення конструкції контактної підвіски, для відповідності умовам впровадження швидкісного електрорухомого складу, досліджено розподіл струму в проводах контактної мережі та визначено вплив кількості струмоведучих струн у прольоті на струморозподіл. На основі отриманих результатів моделювання запропоновано шляхи удосконалення конструктивних параметрів контактної підвіски з метою покращення показників якості струмознімання.*

*Вперше встановлено залежності механічних характеристик швидкісних контактних підвісок від сили натиску струмоприймача, які дають змогу більш точно визначати параметри якості струмознімання, а саме еластичність контактного проводу та його відтискання по довжині прогону. Отримав подальший розвиток метод розрахунку взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем в усталеному режимі, який направлений на визначення відтискання та еластичності контактного проводу з урахуванням конструктивних особливостей контактних підвісок та їх електричних параметрів. Отримані в роботі результати дають змогу більш точно визначати показники якості струмознімання для швидкісних контактних підвісок електрифікованих залізниць з урахуванням їх конструктивних особливостей. Визначені основні параметри контактних підвісок, що погіршують показники якості струмознімання та запропоновані напрями їх нівелювання. Вказане дає змогу досягти мінімізації пошкоджень елементів контактної мережі та струмоприймачів під час впровадження швидкісного руху на електрифікованих залізницях України.*

**Ключові слова:** швидкісний рух, електротранспорт, контактна підвіска, струмоприймач, якість струмознімання, моделювання.

**Постановка проблеми.** Якість струмознімання охарактеризується цілою сукупністю показників, серед яких необхідно виділити відтискання контактного проводу та його еластичність вздовж прогону. Під час впровадження швидкісного руху, оновлення електрорухомого складу та інфра-

структури набуває важливості питання комплексного дослідження роботи контактних підвісок із метою визначення їх раціональних конструктивних параметрів. А оскільки спорудження контактної мережі на електрифікованих залізницях є довгостроковим фінансовим вкладенням, від

якого залежить якість надання послуг із транспортування вантажів та пасажирів, обґрунтування вибору конструктиву контактної мережі з метою впровадження швидкісного руху на електрифікованих залізницях є пріоритетним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений аналіз останніх публікацій [1–4] показує, що головною передумовою впровадження швидкісного руху на електрифікованих залізницях України є визначення найбільш раціональних параметрів контактних підвісок, які б давали змогу експлуатувати електрорухомий склад із відповідним швидкісним режимом та забезпеченням необхідного рівня потужності, що отримується з контактної мережі.

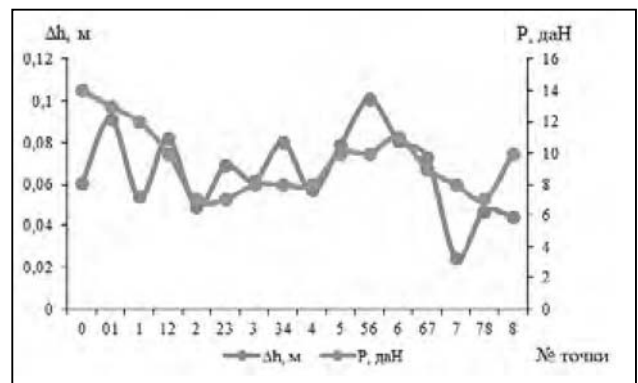
Питання забезпечення відповідної швидкісному режиму якості струмознімання комплексне і під час його розгляду необхідно враховувати як механічні параметри контактних підвісок, так і їхню здатність передавати необхідну потужність до електрорухомого складу. Наявні дослідження [5–8] розглядають питання підвищення якості струмознімання тільки в окремих напрямках і не враховують можливого впливу зміни конструктиву контактної мережі на її навантажувальну здатність і навпаки. Відсутність комплексного погляду на питання підвищення якості струмознімання може призвести до нераціонального використання технічного ресурсу обладнання та зайвих матеріальних витрат на експлуатацію електрифікованих ділянок залізниць.

**Постановка завдання.** Заради досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку задач: провести натурні експериментальні дослідження взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачами; визначити невідповідності наявних контактних підвісок швидкісному руху; запропонувати напрями удосконалення конструктиву контактних підвісок та обґрунтувати їх. Щоб вирішити задачу, у роботі необхідно використовувати теоретичні та емпіричні методи досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження. З метою визначення впливу конструктивних особливостей контактних підвісок на показники якості струмознімання були проведені натурні дослідження їх взаємодії зі струмоприймачами електрорухомого складу.

Натурні дослідження проводились із метою компенсованої ланцюгової контактної підвіски змінного струму ПБСМ-95+МФ-100 із ресорною струною в опорному вузлі за умови натягу несучого тросу  $T = 1800 \text{ даН}$  та контактного проводу  $K = 1000 \text{ даН}$  і використання струмоприймача

типу ТЛ-13У. Результати проведених досліджень наведені на рис. 1.



**Рис. 1.** Результати натурних досліджень взаємодії контактної підвіски ПБСМ-95+МФ-100 зі струмоприймачем ТЛ-13У

Проведені дослідження при динамічній взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем (рис. 1) показали задовільні результати (відтискання контактного проводу не перевищує 150 мм), що, власне, відповідає вимогам, які висуваються для контактної підвіски ПБСМ-95+МФ-100. Отримані результати співзвучні з результатами, які приводяться у відомих роботах [6; 9]. Але такі контактні підвіски морально застаріли і не дають змоги реалізовувати швидкості понад 120 км/год.

Досвід експлуатації високошвидкісних магістралей за кордоном показав, що забезпечення надійної взаємодії рухомого струмоприймача і контактної підвіски є більш складним технічним завданням, ніж забезпечення надійної взаємодії рухомого екіпажу з рейками [1; 2].

На теренах країн Європейської Співдружності давно експлуатуються швидкісні та високошвидкісні контактні підвіски [10; 11], які адаптовані для руху певного типу електрорухомого складу (окремо вантажні та пасажирські поїзди). В Україні на одних ділянках колії курсує електрорухомий склад різних типів і контактна мережа має задовольняти цілій сукупності вимог із метою забезпечення надійного струмознімання при різних швидкісних режимах.

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, при цьому процес взаємодії контактної підвіски та струмоприймача ускладнюється ще й передачею через ковзний контакт електричної енергії. Вказане зумовлює необхідність забезпечення стійкої роботи контактної мережі з урахуванням потужності, яка через неї передається.

Науковцями розроблений проект контактної мережі для забезпечення швидкості руху електро-рухомого складу до 200 км/год, але в роботі та типовому проекті відсутня інформація про врахування електричних навантажень, які сприймаються запропонованою контактною підвіскою [12].

У цій роботі було вирішено провести моделювання статичної взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачем із метою визначення основних нормованих показників якості струмознімання, за умови використання методу розрахунку взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем в усталеному режимі [9], який доповнений врахуванням електричних параметрів контактних підвісок.

Як контактні підвіски з метою моделювання їх взаємодії зі струмоприймачем використовувались такі: ПБСМ-95+МФ-100 з ресорною струною в опорному вузлі, з натягами несучого тросу  $T = 1800 \text{ даН}$  та контактного проводу  $K = 1000 \text{ даН}$ ; М-120+БрФ-120 з мірними струмопровідними струнами, за умови натягів несучого тросу  $T = 1800 \text{ даН}$  та контактного проводу  $K = 2000 \text{ даН}$ ; М-120+БрФ-120 із простими струнами та полегшеними фіксаторами, натягів несучого тросу  $T = 1800 \text{ даН}$  та контактного проводу  $K = 2000 \text{ даН}$ . Як арматура контактної мережі використовувались затискачі широкого поширення, які експлуатуються на залізницях України.

Зрівняльні результати відтискання контактного проводу для трьох типів контактних підвісок наведені на рис. 2, за умови натиску струмоприймача в 8 даН.

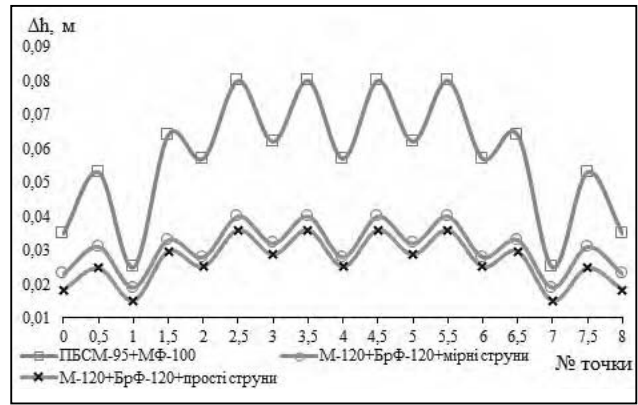


Рис. 2. Зрівняльні результати відтискання контактного проводу при  $P = 8 \text{ даН}$

З наведених результатів розрахунку відтискання контактного проводу по довжині прогону (рис. 2) видно, що наявна контактна підвіска ПБСМ 95+МФ-100 ділянок електрифікованих залізниць змінного струму володіє чітко вираженою нерівномірністю відтискання контактного проводу та еластичністю по довжині прогону. Крайні результати показують контактні підвіски для швидкісного руху. Необхідно зазначити, що запропонована полегшена контактна підвіска М-120+БрФ-120 має кращі показники якості струмознімання, ніж запропонована в роботі В.В. Божко, О.О. Краснова і С.В. Демченко [12].

Більш детально з'ясувати характер зміни відтискання контактного проводу та зміну еластичності по довжині прогону у разі змінного натиску струмоприймача можна з наведених на рис. 3, 4 тривимірних графіків.

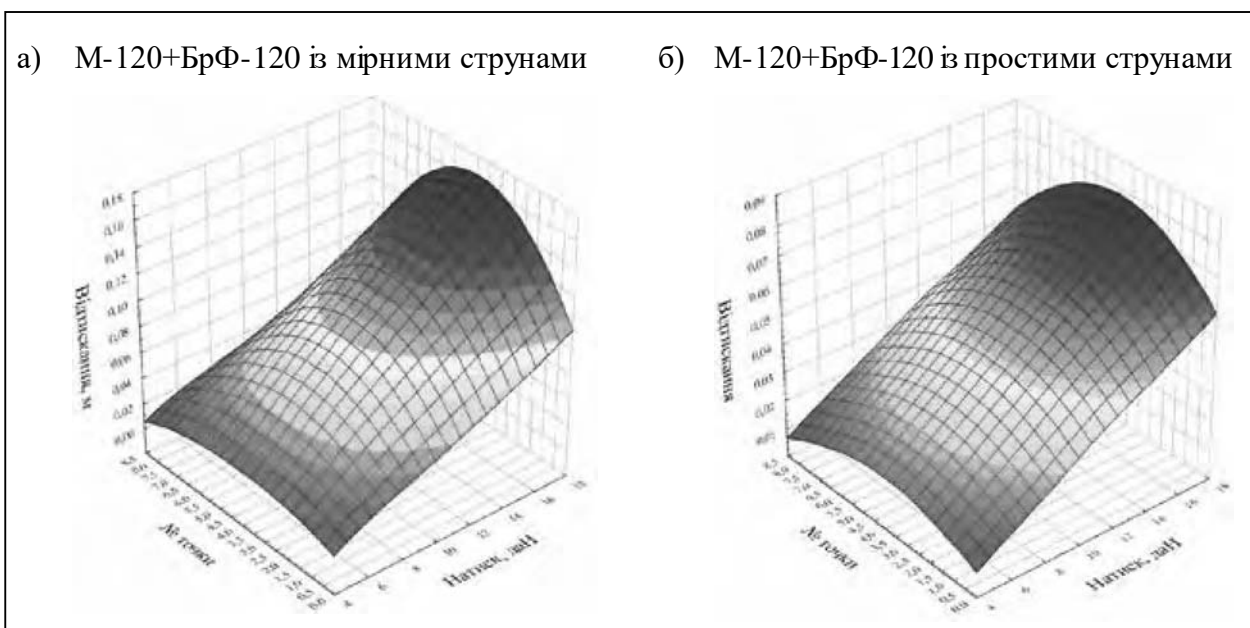


Рис. 3. Відтискання контактного проводу вздовж прогону за умови змінного натиску струмоприймача

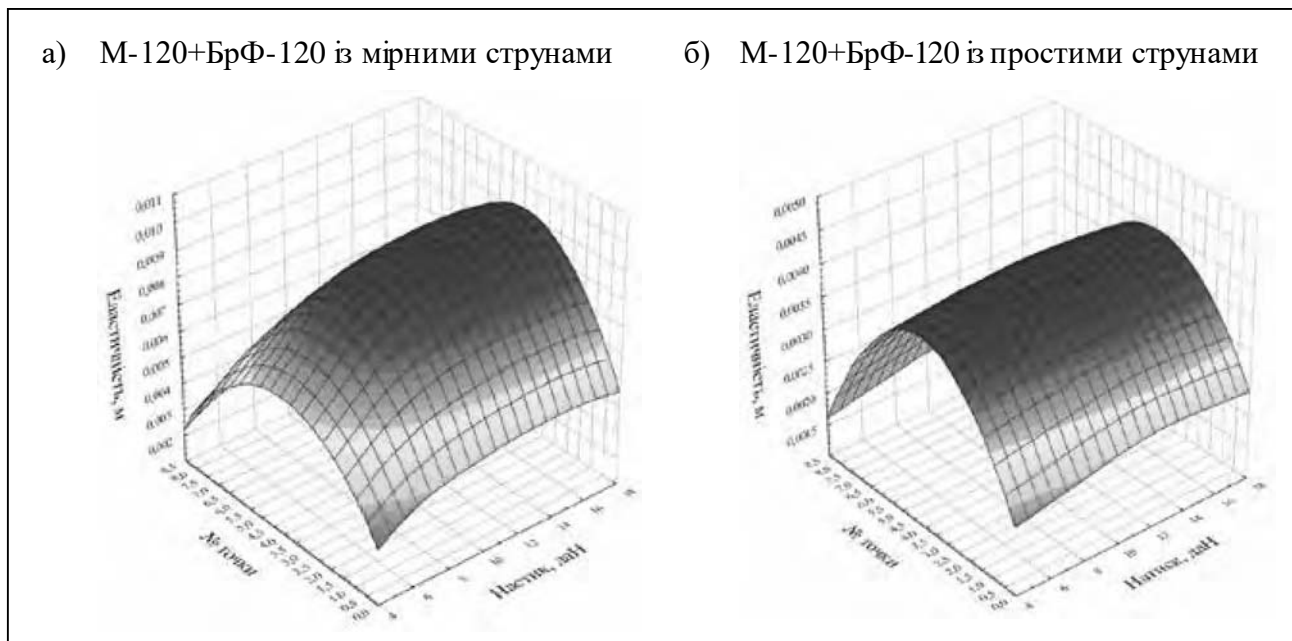


Рис. 4. Еластичність контактної проводи вздовж прогону за умови змінного натиску струмоприймача

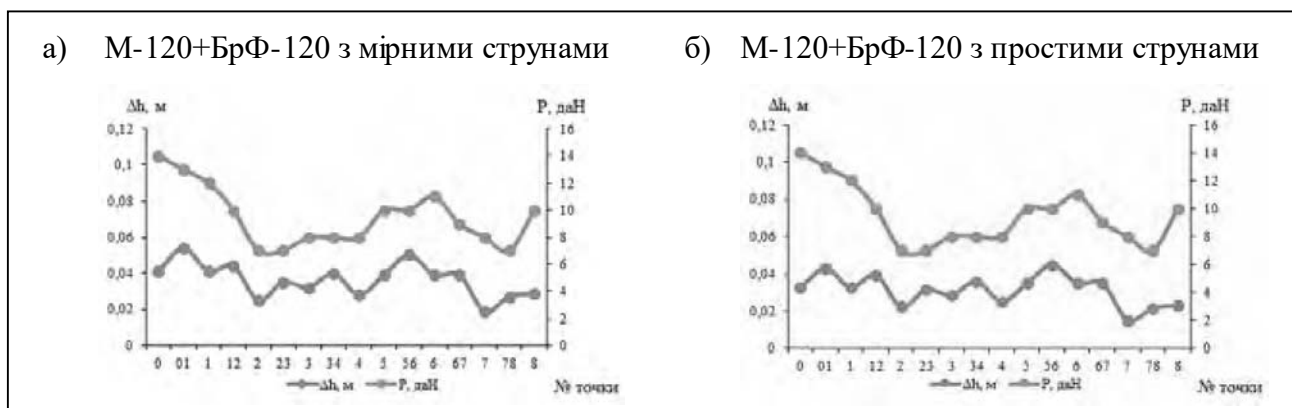


Рис. 5. Результати моделювання взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачем ТЛ-13У

Отримані результати (рис. 3, 4) свідчать, що такі показники, як відтискання та еластичність при одному й тому ж значенні натиску, для різних конструкцій контактних підвісок мають різне значення.

Із використанням кривої натиску струмоприймача по довжині прогону (рис. 1) було проведено моделювання динамічної взаємодії контактних підвісок зі струмоприймачем (рис. 5), з якого видно, що полегшена контактна підвіска М-120+БрФ-120 з простими струнами та полегшеними фіксаторами володіє кращими показниками якості струмознімання, ніж аналогічна контактна підвіска з мірними струнами.

З метою підтвердження отриманих результатів і можливості їх використання були проведені додаткові дослідження струморозподілу в контактній підвісці. Дослідження проводилось на математичній моделі з використанням методу вузлових

потенціалів [13; 14]. У процесі моделювання прогін контактної підвіски (рис. 6) замінювався електричною схемою з відповідними параметрами віток (проводів контактної мережі), що визначались за допомогою виразів Ф. Поллячека і Дж. Карсона (1), параметрами генеруючих джерел та навантаження.

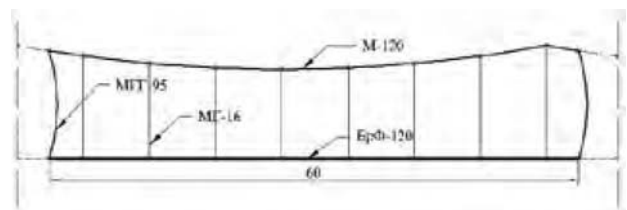


Рис. 6. Типовий прогін контактної підвіски

Повний власний опір проводів контактної мережі:

$$z = r_a + j\omega \left( L - \frac{\mu}{2} \cdot 10^{-4} \right), \quad (1)$$

де  $r_a$  – активний опір проводу, Ом/км (у разі застосування мідних чи алюмінієвих проводів дорівнює опорі проводу постійному струму);

$\omega$  – кутова частота,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\infty$  – магнітна проникність проводу (для мідних чи алюмінієвих  $\mu = 1$ );

$L$  – індуктивність проводу, Гн/км.

Розрахунковий вираз потенціалів у вузлах схеми в матричній формі:

$$\vec{V} = |G|^{-1} \cdot \vec{B}, \quad (2)$$

де  $|G|^{-1}$  – матриця провідностей віток схеми, (провідності проводів контактної підвіски), См.

$\vec{B}$  – вектор задаючих струмів (струми фідерів тягових підстанцій та споживаний струм електрорухомого складу), А.

Таким чином, з огляду на знання потенціалу у вузлах схеми та опори віток були отримані залежності зміни струморозподілу в проводах контактної мережі (рис. 7).

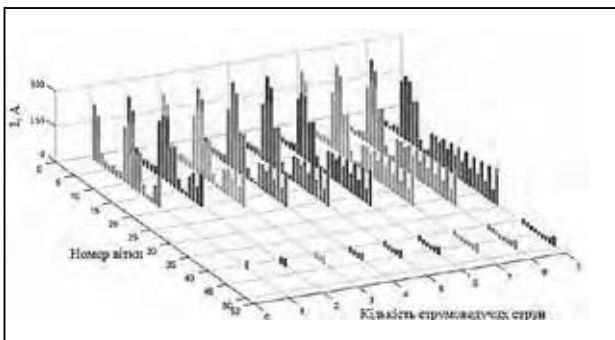


Рис. 7. Графічне зображення зміни струморозподілу у проводах контактної підвіски (вітки з 42-ї до 50-ї відображають мірні струни)

Отримані результати (рис. 7) свідчать, що наявність струмопровідних струн у прольоті не здій-

снює суттєвого впливу на перерозподіл струмів між проводами, що підтверджує змогу використовувати полегшену контактну підвіску М-120+БрФ-120 із простими струнами та полегшеними фіксаторами.

#### Висновки.

1. Проведені натурні експериментальні дослідження взаємодії ланцюгової контактної підвіски змінного струму зі струмоприймачем дали змогу визначити нерівномірність натиску струмоприймача по довжині прогону і, відповідно, нерівномірність відтискання та еластичності.

2. Моделювання зміни струморозподілу в прогоні контактної підвіски показало незначний вплив наявності струмопровідних струн на перерозподіл струмів між проводами, що визначило відсутність необхідності використання для швидкісних ланцюгових контактних підвісок змінного струму мірні електропровідні струни.

3. Отримані результати моделювання взаємодії швидкісних ланцюгових контактних підвісок зі струмоприймачем ТЛ-13У на розроблених математичних моделях дало змогу визначити основні напрями удосконалення конструкції контактної підвіски з метою відповідності впровадження швидкісного електрорухомого складу.

4. Вперше встановлено залежності механічних характеристик швидкісних контактних підвісок від сили натиску струмоприймача, які дають змогу більш точно визначати показники якості струмознімання.

5. Отримав подальший розвиток метод розрахунку взаємодії контактної підвіски зі струмоприймачем в усталеному режимі, який спрямований на визначення відтискання та еластичності контактного проводу з урахуванням конструктивних особливостей контактних підвісок та їх електричних параметрів.

#### Список літератури:

1. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Schneider E. Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance. Second Edition. Wiley, John & Sons, 2009. 994 p.
2. Zhou N., Zhang W. Investigation on dynamic performance and parameter optimization design of pantograph and catenary system. Finite Elements in Analysis and Design. 2011. № 47. P. 288–295.
3. Lee J.H., Park T.W. Development and Verification of a Dynamic Analysis Model for the Current-Collection Performance of High-Speed Trains Using the Absolute Nodal Coordinate Formulation. Trans. Of the KSME. 2012. № 36(3). P. 339–346.
4. Тюрнин П.Г., Миронос Н.В. Обеспечение качественного токосяема [Текст]. Токосяем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / Под ред. Н.В. Мироноса, П.Г. Тюрнина. М.: Интекст, 2010. С. 15–19.
5. Купцов Ю.Е. Беседы о токосяеме и его надежности, экономичности и о путях совершенствования. Москва: Модерн-А, 2001. 256 с.
6. Вологин В.А. Взаимодействие токоприемников и контактной сети [Текст]. М.: Интекст, 2006. 256 с.
7. Павличенко М.Е. Совершенствование конструкции верхнего узла токоприемника. Вісник ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. 2008. № 24. С. 78–79.

8. Antonov A.V., Sychenko V.G. Resource Evaluation of Friction Pair “Contact Wire – Contact Strip”. Archives of Transport. 2017. Vol. 44. Issue 4. P. 7–14.
9. Фрайфельд А.В. Проектирование контактной сети [Текст] / А.В. Фрайфельд, Б.Г. Брод. М.: Транспорт, 1991. 355 с.
10. Яндович В.Н. Сравнительный анализ контактных подвесок в странах Евросоюза и Украины: организация надежного токосъема / В.Н. Яндович, В.Г. Сыченко, А.В. Антонов. Электрификация транспорта. 2014. № 7. С. 67–77.
11. Дьяков В.О. Контактна мережа електрифікованих залізниць. Улаштування контактної мережі / В.О. Дьяков, Д.О. Босий, А.В. Антонов. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017.
12. Божко В.В., Краснов О.О., Демченко С.В. Особенности конструкции контактной сети переменного тока для скоростного движения 160–200 км/год для железных дорог Украины. Электрификация транспорта. 2015. № 9. С. 8–14.
13. Костін М.О., Шейкіна О.Г. Теоретичні основи електротехніки. Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2006.
14. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. Учебник для вузов. Москва, Россия: Энергия, 1975.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНЫХ ПОДВЕСОК НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ТОКОСЪЕМА

*Целью работы является определение степени влияния параметров контактных подвесок на показатели качества токосъема. Для достижения поставленной цели и решения задач в работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследований.*

*В работе рассмотрены существующие подходы исследования и оценки взаимодействия контактных подвесок с токоприемниками, представлены результаты натурных экспериментальных исследований, которые легли в основу построения математических моделей. На разработанных моделях взаимодействия контактных подвесок с токоприемниками проведено моделирование и определены основные направления совершенствования конструкции контактной подвески для соответствия условиям внедрения скоростного электроподвижного состава, исследовано распределение тока в проводах контактной сети и определено влияние количества токоведущих струн в пролете на токораспределение. На основе полученных результатов моделирования предложены пути совершенствования конструктивных параметров контактной подвески для улучшения показателей качества токосъема.*

*Впервые установлены зависимости механических характеристик скоростных контактных подвесок от силы нажатия токоприемника, которые позволяют более точно определять параметры качества токосъема, а именно эластичность контактного провода и его отжатие по длине пролета. Получил дальнейшее развитие метод расчета взаимодействия контактной подвески с токоприемником в установившемся режиме, который направлен на определение отжатия и эластичности контактного провода с учетом конструктивных особенностей контактных подвесок и их электрических параметров. Полученные в работе результаты позволяют более точно определять показатели качества токосъема для скоростных контактных подвесок электрифицированных железных дорог с учетом их конструктивных особенностей. Определены основные параметры контактных подвесок, ухудшающие показатели качества токосъема и предложены направления их нивелирования. Указанное позволяет достичь минимизации повреждений элементов контактной сети и токоприемников при внедрении скоростного движения на электрифицированных железных дорогах Украины.*

**Ключевые слова:** скоростное движение, электротранспорт, контактная подвеска, токоприемник, качество токосъема, моделирование.

### INVESTIGATION OF CONTACT DETERMINATION PARAMETERS INFLUENCE ON THE QUALITY INDICATORS OF STRUCTURE

*The purpose of the work is to determine the level of influence of the contact pendants parameters on the quality indicators of the screw-picking. The theoretical and experimental methods of research were used to achieve the set goal and to solve the problems in the work.*

*The paper considers existing approaches of studying and assessing the contact pendants interaction with current collectors and presents the results of field experiments, which formed the basis for constructing mathematical models.*

*On the developed models of contact pendants interaction with current collectors, simulation was carried out. The main directions of improvement of the contact suspension design for the conformity to the conditions of introduction the high-speed electric-engine composition were determined. The current distribution in the*

---

wires of the contact network is investigated and the influence of the number of current-carrying strings in the span on the current distribution is determined.

On the basis of the obtained modeling results, ways of improving the design parameters of the contact suspension are proposed for improving the quality of the screw capability. For the first time, the dependencies of the mechanical characteristics of high-speed contact suspensions on the pressure of the current collector were determined, which allow more accurately determine the quality parameters of the snap-in, namely the elasticity of the contact wire and its pressing over the length of the run. The method for calculating the interaction of the contact suspension with the current collector in the steady state, which is aimed at determining the pressure and elasticity of the contact wire, taking into account the structural features of the contact pendants and their electrical parameters, has been further developed. The results obtained in the work allow to more accurately determine the quality of screw-picking quality for high-speed contact pins of electrified railways, taking into account their design features. The basic parameters of contact pendants are determined which deteriorate quality of screw quality and suggested directions of their leveling. The specified allows to achieve minimization of damage to the elements of the contact network and current collectors when introducing high-speed traffic on the electrified railways of Ukraine.

**Key words:** high-speed movement, electric transport, contact pendant, current collector, quality of a snap, modeling.