

УДК 621.436:526

*Д-р техн. наук Горобець В. Л.
Канд. техн. наук Коваленко В. В.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ ПОЖЕЖ НА ЛОКОМОТИВАХ

Ключові слова: локомотиви, електровоз ВЛ-80к, затискачі контактів, трансформаторне мастило, передчасне руйнування, пожежа, хімічний склад.

Вступ

Безпеці руху поїздів приділяється багато уваги, як в нашій державі, так і за кордоном. В державах – лідерах європейського союзу, наприклад, Федеральне міністерство транспорту і цифровий інфраструктури Німеччини (BMVI) з особливою увагою перевіряє якість продукції, що постачається для потреб залізниць. За опублікованими даними [1] в Німеччині міністерством забраковано 140 нових складів поїздів, що неякісно виготовлені німецькими виробниками та мають дефекти. За даними німецьких вчених, більш ніж 75 % техногенних аварій пов'язано із застосуванням неякісного та неналежного типу металу в конструкціях та деталях виробів [1-2]. Реалізація пропозицій всіх узгоджених міждержавних документів дозволяє мінімізувати ризики порушень безпеки руху та забезпечує гарантований перевіз вантажів і пасажирів на залізницях будь якої держави.

Україна прагне долучитися до виконання всіх міжнародних нормативів, особливо затверджених Організацією співтовариства залізничних доріг (ОСЗД), які забезпечують підтримку якості та надійності продукції, застосованою АТ «Укрзалізниця», що сприяє стабілізації обстановки з безпекою руху по мережі Українських залізниць.

Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми

В процесі перевезень на залізницях виникають значні вібрації, які сприяють послабленню кріплень елементів у тому числі силового кола локомотивів, що за статистикою АТ «Укрзалізниця» спричиняє на них поже-

жі. Від цього піддаються небезпеці пожеж не тільки старі локомотиви, а і нові, нещодавно закуплені, кожен з яких коштує 4,5 млн. доларів США. На 2018 рік передбачено закупівлю фінансовим лізингом 25 тепловозів General Electric Transportation на суму 3,4 млрд. гривень [10].

Значний дефіцит локомотивів в локомотивному парку АТ «Укрзалізниця», майбутні закупівлі дорогих нових локомотивів, а також цінність людського життя взагалі та локомотивних бригад окремо, вказує робітникам компаній-власників залізничного транспорту на необхідність впровадження нових ефективних систем попередження пожеж на локомотивах. За статистикою Департаменту локомотивного господарства АТ «Укрзалізниця», більшість пожеж на локомотивах спричинено дією дуги в високовольтних камерах, резисторних групах, клемних з'єднаннях електричних кіл. Хоча конструкція, місце розташування та доступність для оглядання означених місць відрізняються на кожній окремій серії локомотивів, загальна закономірність виявлення найбільш небезпечних ділянок в електричній частині локомотивів підказує, що області з максимальним ризиком виникнення електричної дуги та пожежі з певними нюансами повторюються на будь-якій серії тягового рухомого складу. Виникає задача завчасного попередження пожеж та виникнення аварій і нещасних випадків на локомотивах та іншому рухомому тяговому складі залізниць, пов'язаних з наднебезпечним коротким замиканням і електричною дугою в високовольтних камерах, поблизу головного трансформатора з великим об'ємом масла, резисторних групах, клемних з'єднаннях електричних кіл. Наявний об'єм масла на локомотиві згідно світового досвіду загасити не можливо, навіть найсучаснішими системами пожежогасіння. Тому попередження пожеж є стратегічною задачею на залізничному транспорті.

Мета та задачі дослідження

Робота спрямована на дослідження причин пожеж на локомотивах, за статистикою АТ «Укрзалізниця», виявлення, на прикладі електровозів ВЛ-80к, головних факторів що впливають на виникнення пожеж та пошук шляхів попередження пожеж на локомотивах.

Матеріали, методика та результати досліджень

У роботі застосовано макроскопічні, фактографічні і аналітичні методи, дослідження хімічного складу деталей відповідальних за виникнення пожеж на електровозі ВЛ-80К.

Аналітичні дослідження причин виникнення пожеж на локомотивах за статистикою АТ «Укрзалізниця» виявили, що більшість цих пожеж спричинені перегрівом з'єднань в їх електричних колах. Типовим у цій статистиці є дослідження причин виникнення пожежі на вантажному електровозі ВЛ-80к-048. В процесі перевезення навантаженого поїзда цим локомотивом одночасно вийшли з ладу два контактних з'єднання, які були зруйновані за різними механізмами, але саме синхронність їх руйнування призвела до виникнення пожежі, яка спалила потужним полум'ям секцію електровозу [11].

В електричній схемі електровозу ВЛ-80к захист від короткого замикання кіл випрямних установок здійснюється диференційним блоком реле БРД [6, 7] (рис.1).

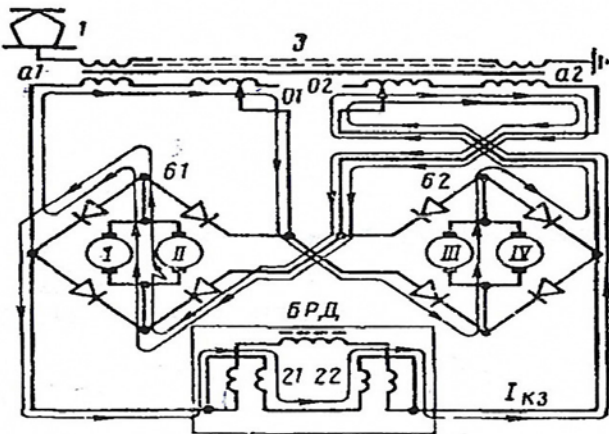


Рис. 1 - Спрощена схема протікання струму короткого замикання в електричних колах електровозу ВЛ-80к

На наведеній схемі струмові котушки диференційних реле 21 і 22 разом з дроселем увімкнені між двома точками ланцюга вторинних обмоток силового трансформатора, які мають рівні потенціали. Тому по струмовим котушкам при нормальній роботі схеми струм не протікає. Зрівняльний струм в струмових обмотках котушок реле 21 і 22 може виникнути у таких режимах, як: боксування однієї чи декількох колісних пар, відключення одного чи декількох тягових двигу-

нів, відключення випрямної установки та рух електровоза на неходових позиціях [6].

В нашому випадку обидва контактних затискача з різних причин (один з причин оплавлення, другий з причини термічного розтріскування контактної пластини) одночасно та у рівному ступені втрачали електропровідність, як за рахунок підвищення опору розтріснутого матеріалу, так і підвищення опору фазовим перетворенням і процесом плавлення другого зразка. Обидва ці процеси сприяли попаданню розплавленого металевого розчину на трансформатор, його резинові прокладки, з подальшим підпалом трансформаторного масла, що і стало причиною загального пожежу на секції електровозу ВЛ-80к № 48. Таким чином можна зробити висновок про те, що подібний випадок пожежі не міг бути попереджений ні існуючими видами блокувань електричних кіл, ні існуючими надпотужними методами пожежогасіння.

Затискачі, застосовані в електровозах ВЛ80к, тобто їх матеріал, згідно конструкторської документації повинен відповідати марці свинцевих латуней ЛС 59-1, що регулюється нині ГОСТ 15527 [3].

Попередні дослідження сплаву контактних затискачів електровозу ВЛ80к показали, що причинами виникнення пожежу було:

- зернограничне розтріскування матеріалу в області кріпильних болтів на ділянці затискача, що прилягає до конструкційної основи, яку не можна побачити при регулярних оглядах цього вузла. Як приклад, зовнішній вигляд зразка контактної пластини, в області її кріпильних болтів, по ланцюгу а1 схеми наведеної на рисунку 1, представлено на рисунку 3;

- перегрів матеріалу контактних затискачів в області кріпильних болтів, які мають набагато більший опір і створюють напруження в конструкції затискача, що веде до розкриття термічних тріщин на їх поверхні;

- прискорення процесів розкриття тріщин у контактних елементах за рахунок вібраційних навантажень цього вузла локомотиву в процесі його експлуатації.

В результаті розтріскування матеріалу затискачів зменшується ефективний переріз провідника, підвищується опір електричному струму, збільшується температура провідника і за рахунок цього знов збільшується опір електричному струму. При значних потужностях електричного струму, що споживає

допоміжне обладнання електровозу, ця температура досягає температур плавлення матеріалу. Контактний затискач № 01 за схемою на рисунку 2 [6], зовнішній вигляд якого представлено на рисунку 3, в процесі опалення проковує утворення електричної дуги

та потрапляння часток розплавленого металу на кондуїт проводів електромонтажу і гумові ущільнення виводів трансформатора, з подальшим займанням трансформаторного масла.

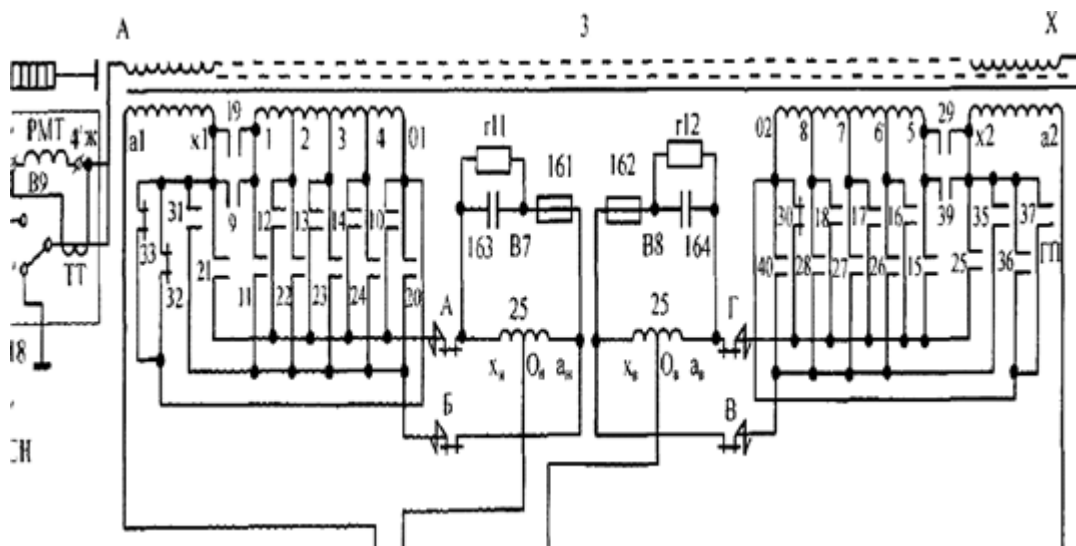


Рис. 2 – Фрагмент електричної схеми електровоза ВЛ-80к

Зі схеми видно, що одночасний вихід з ладу двох контактів ланцюгів a1 і 01 не призводить до блокування або включення будь-якого електричного захисту електровоза. Тому загоряння буде і надалі підтримуватися дугою, що збільшує потужність її струму, та поширюватися на сусідні ділянки конструкції локомотива. Але власно дуга, яка весь час підтримується, викликає загоряння великого об'єму трансформаторного масла, після чого пожежа набуває незворотних і катастрофічних наслідків.

Для аналізу хімічного складу контактних затискачів, пошкоджених при пожежі у два способи: перший – розплавленням, другий – виникненням термічних тріщин спрямованих у радіальних напрямках від отворів для кріпильних болтів, використовувався портативний аналізатор металів S1 TITAN, з технологією вимірювання SDD високої точності. Цей портативний прилад дозволяє аналізувати склад металів, визначати наряду з важкими і легкими елементами Mg, Al, Si, за допомогою рентгенівської трубки з напругою живлення до 50 кВ. Прилад був застосований саме для точної оцінки кількості легких елементів в сплавах, що досліджувалися. Для підтвер-

дження кількісних показників основних складових сплаву затискувачів та домішок до нього важких елементів було використано іскровий спектрометр Q2ION, фірми Брукер (Німеччина). Багатоосновний оптико-емісійний спектрометр призначено для комплексного рішення задач вхідного контролю якості матеріалів. Він має комплект еталонних зразків та забезпечує точність аналізу, що виконується, до сотих часток відсотку.

Досконале вивчення хімічного складу матеріалу контактних затискачів електровозу ВЛ-80к, із застосуванням еталонних зразків, спектрометричним методом за допомогою оптико-емісійного спектрометра Q2ION та портативного аналізатору металів S1 TITAN, показало, що обидва зразки затискувачів (з термічними тріщинами та того, що розплавився) мають значну зональну ліквідацію та невідповідність хімічного складу їх матеріалів вимогам нормативної документації. Відмічено також забрудненість сплавів домішками, що викликало мікроструктурну неоднорідність матеріалу затискувачів – дендритну ліквідацію.

Хімічний склад матеріалу контактних затискувачів визначено вимогами технічної конструкторської документації. Контактні затис-

качі мають бути виготовлені з свинцевих латуней ЛС59-1[6]. Хімічний склад цієї латуні,

за ГОСТ 15527-2004 [3], наведено в таблиці 1.

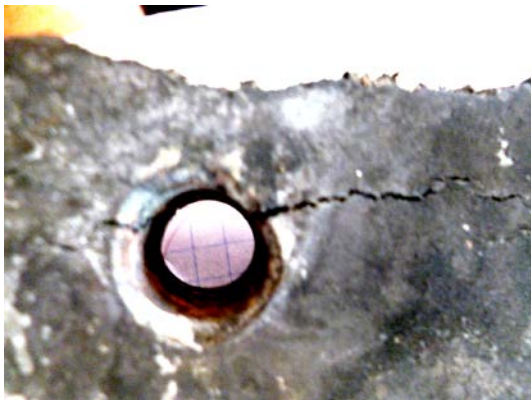


Рис.3 - Оплавлений та зламаний затискачі контактів електровозу ВЛ-80к після його пожежи

Табл. 1 - Хімічний склад свинцевої латуні ЛС59-1 за вимогами ГОСТ 15527-2004

Масова частка, %									Розрахункова щільність, г/см ² , приблизно
Елемент								Інші елементи	
Cu	Pb	Fe	Sn	Sb	Bi	P	Zn		
57-60	0,8-1,9	0-0,5	0-0,3	0-0,01	0-0,003	0-0,02	інше	0-0,75	8,4

За вимогами ГОСТ 15527 [3] загальна частка елементів олова та кремнію у латуні повинна бути не більше 0,5 %. Масова частка нікелю повинна не перевищувати 0,5 %, за рахунок масової частки міді.

Хімічний склад контактних затискачів вимірюваний за допомогою аналізатора металів S1 TITAN наведено в таблицях 2 і 3.

Як видно з наведених таблиць, хімічний склад матеріалу контактних затискачів не однаковий і має значні розходження, як по

основних, так і по додаткових легуючих елементах та домішках.

Досконале вивчення хімічного складу матеріалу затискувачів було зроблено із застосуванням еталонних зразків спектрометричним методом за допомогою багатоосновного іскрового оптико-емісійного спектрометра Q2ION з точністю до сотих відсотка. Результати вимірювань наведено у таблиці 4, де зразки № 1 і № 2 - з термічними тріщинами, а № 3 – той, що розплавився.

Табл. 2 – Хімічний склад контактного затискача, що розплавився

Cu	Zn	Fe	Si	Nb	Sn	Pb	Mn	Ni
59,28	38,61	0,62	0,19	0,19	0,21	0,63	0,14	0,07

Табл. 3 – Хімічний склад контактного затискача, що має термічні тріщини

Cu	Zn	Si	Fe	Ni	Sn	Nb	Pb	Sb	S	Cr	As	Zr
78,28	15,91	1,39	0,42	0,19	1,03	0,11	1,97	0,16	0,02	0,02	0,06	0,04

Табл. 4 – Хімічний склад матеріалу зразків контактних затискачів, % (мас.)

Зразок	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si	Al	S	As	Bi	Se	Cu
1	14.69	2.666	0.825	0.031	0.034	0.431	0.260	1.743	0.024	0.009	<0.005	<0.005	0.016	79.26
2	14.40	2.603	0.913	0.033	0.031	0.415	0.262	1.745	0.025	0.0054	<0.005	<0.005	0.018	79.54
3	37.88	0.422	0.210	0.045	0.158	0.704	0.078	0.081	0.122	<0.005	0.0082	<0.005	0.019	60.27

З аналізу даних таблиці 4 видно, що кількість цинку в наведених сплавах зразків затискувачів відрізняється більше ніж у два половини рази, що за умов однорідної структури знижує температуру плавлення на 140 °С. Підвищена кількість цинку у розплавленому зразку перед початком плавлення могла бути ще вищою по причині того, що в результаті плавлення цинк частково вигорає. Згідно наявним даним [4, 5], збільшення кількості цинку у металевому сплаві до 45-47 % підвищує тимчасовий опір розриву виробу, але відносно подовження досягає максимуму при 30-32 % цинку, а потім різко зменшується. Таким чином, обидва сплави мають невисоку пластичність, з відносним подовженням δ близько 40 %. При цьому, температури рекристалізації цих сплавів відрізняються майже на 50 °С, та складають для розплавленого зразка 315,7 °С, розтрісканого – 364,0°С.

Латуні, що містять близько 1 % свинцю називаються автоматними, вони легко обробляються та в даному випадку застосовуються для виготовлення контактних затискачів. Кількість цинку в них повинна перевищувати 32 %, що сприяє потраплянню шкідливих легкоплавких включень свинцю у середину зерен та збереженню високих фізико-механічних показників латуні і підвищенню її оброблюваності. Але у випадку застосування сплаву з вмістом цинку близько 14,5 %, відповідне підвищення концентрації свинцю сприяє утворенню легкоплавких евтектичних включень по границях α -розчину мідно-цинково-свинцевого сплаву та виникненню термічних і корозійних тріщин в контактних затискачах під час їх експлуатації. До недоліків латуней відноситься їхня схильність до корозійного розтріскування, що відбувається у вологій атмосфері при збереженні в металі після його деформації залишкових напружень. Розтріскування відбува-

ється через корозію латуней по межах зерен у зонах нерівномірного розподілу залишкових напружень. Це особливо характерно для сплавів з вмістом цинку більше 20 %, тобто для розплавленого зразка контактного затискача.

Для усунення схильності латуней до корозійного розтріскування досить відпалити деформований напівфабрикат виробу при температурах, нижчих за температуру рекристалізації цього металу. Звичайні температури відпалу латуней – 270-300 °С. Після відпалу вони стають нечутливими до впливу вологості атмосфери. Але при наступному навантаженні чутливість до корозійного розтріскування поновлюється.

Тимчасовий опір розриву латуней ефективно підвищують алюміній, олово і, меншою мірою, марганець. Домішки свинцю призводять до зниження міцності латуней. Відносне подовження збільшується при введенні заліза і марганцю. Всі інші елементи зменшують відносне подовження латуней. Алюміній і марганець, олово і нікель, фосфор і кремній підвищують їх корозійну стійкість.

Майже усі легуючі та домішкові елементи сплавів, які досліджувалися, знижують питому електропровідність виготовлених з них виробів. Наприклад, підвищення вмісту цинку з 14,5 % до 37,88 % (див. табл. 4) знижує електропровідність більше ніж на 10 %. Збільшення у сплаві концентрації марганцю, заліза, олова та алюмінію на значення вказані в таблиці 4 зменшує цей показник на 2 %, стосовно кожного окремого вищезгаданого елемента. Означене зменшення електропровідності має кумулятивний ефект. Елементи, що утворюють із міддю тверді розчини, найбільш сильно знижують її електропровідність (закон Курнакова). До числа елементів, що найбільш сильно знижують електропровідність міді, відносяться фосфор і кремній.

Аналізуючи хімічний склад сплавів (табл. 4) також необхідно зазначити, що сплав розтріснутого зразка контактного затискача (перший і другий номери в таблиці) не задовольняє вимогам відповідного ГОСТу до мідно-цинкових сплавів (латуней) [3] за сумарною концентрацією олова та кремнію і перевищує цей показник в шість разів, або на 600 % (відносних).

Таким чином, доведено, що в комутованих пристроях електричних кіл локомотивів використовуються деталі, хімічний склад яких не відповідає вимогам діючих стандартів, що

викликає випадки пожеж на цих рухомих одиницях. Таких негативних наслідків можна зазнати в результаті роз'єднання постійних електричних контактів в електричних ланцюгах локомотивів у процесі їх циклічних механічних навантажень під час експлуатації.

Автори роботи пропонують впровадження додаткових сигнальних та контрольних систем для попередження руйнування електричних ланцюгів і виникнення пожеж в локомотивах на ранніх стадіях розвитку несправностей, а також внесення до інструкцій з експлуатації вимог щодо додаткового технічного огляду систем для попередження руйнування та займання локомотивів. Контролююча система, що пропонується, реагує на перевищення критичної температури для кожного окремого вузла електричної схеми локомотива, де є найбільша вірогідність виникнення короткого замикання та електричної дуги. Необхідно також відмітити, що навіть на пряму не пов'язані із станом електричних кіл локомотивів випадки їх пожеж, так чи інакше, супроводжуються тепловим перегрівом силових елементів [8].

Проведені дослідження дозволяють рекомендувати:

1. При побудові локомотивів неухильно дотримуватися вимог технічної документації до їх складових.

2. У регламентні роботи з технічного діагностування тягового рухомого складу для продовження строку його експлуатації [6, 7, 9] внести додаткові роботи з діагностування температурного стану контакторних та резисторних груп, що допоможе попередити їх передчасний вихід із ладу та виникнення пожеж на локомотивах.

Висновки

1. Теоретичний, нормативно-технічний, візуальний, металографічний, спектральний та рентгеноспектральний аналізи пошкоджених зразків контактних затискачів, а також аналіз стану електричних схем локомотивів дозволяють зробити попередні висновки щодо можливостей виникнення пожеж на даній рухомій одиниці.

2. Дослідження хімічного складу зразків контактних затискачів локомотивів показало, що жоден з застосованих при їх виготовленні металевих сплавів не відповідає вимогам діючої технічної документації на цей виріб.

3. Аналіз і дослідження стану електричної схеми електровоза ВЛ-80к показало, що одночасне синхронне підвищення опору на ко-

тактних затискачах 01 і а1 у електросхемі цього локомотива сприяє тому, що блок диференційних реле БРД не спрацьовує, як захисний вимикач електричного струму, та не може попередити виникнення пожежі.

4. Невідповідність хімічного складу матеріалу контактних затискачів електровозу ВЛ-80к вимогам його конструкторській документації може спричинити позапланове спрацювання блоку диференційних реле БРД на відключення струму в процесі експлуатації, що може викликати аварійну ситуацію та стати причиною виникнення пожежі на електровозі, яка впливає на безпеку руху поїздів та може стати причиною техногенної аварії без людських жертв, так і із загибеллю людей на транспорті.

5. Пропонована система попередження пожеж на локомотивах не дублює, а доповнює існуючі протипожежні захисні системи.

6. Великі фінансові втрати, пов'язані з виникненням пожеж тягового рухомого складу, потребують невідкладного впровадження додаткових ефективних систем протипожежної безпеки, спрямованих, в першу чергу, на попередження аварійних ситуацій такого характеру.

Література

1. Шимко В. Бюрократи створили дефіцит / газета «Магістраль» № 33 від 1–7 травня 2013 р – С. 11.

2. Морозов В. Н. Безопасность движения поездов / В. Н. Морозов. Тринадцатая научно-практическая конференция «Безопасность движения поездов». Труды 18–19 октября 2012 г., Москва, Россия. – С. 1–4.

3. ГОСТ 15527-2004. Сплавы медно-цинковые (латуни), обрабатываемые давлением. Марки. Дата введения 2005-07-01 – 6 с.

4. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка / Ю.М. Лахтин. – М.: Машиностроение, 1983. –359 с.

5. Лившиц Б. Г. Металлография / Б. Г. Лившиц – М. Металлургия, 1990. – 336 с.

6. Электровоз ВЛ 80 к. Руководство по эксплуатации – М., «Транспорт», 1978. – 432 с.

7. Положення про планово-попереджувальну систему ремонту і технічного обслуговування тягового рухомого складу (електровозів, тепловозів, електро та дизель-поїздів): Наказ Мін. трансп. та зв'язку

України від 30.06.2010 р. № 093. – Київ : Укрзалізниця, 2010. – 25 с.

8. Горобець В. Л., Дослідження причин передчасного руйнування колінчастого валу тепловозу 2ТЕ116 / В.Л. Горобець, В.В. Коваленко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету імені академіка В. Лазаряна» № 4 (76), 2018. – С. 101–110.

9. Пат.112526 Україна МПК: G08B17/10, Система захисту електричних ланцюгів тягового рухомого складу / Коваленко В. В., Горобець В. Л., Заяць Ю. Л. та інші. (Україна) ; заявник та патентовласник Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – № u201605128; заявл. 11.05.2016; опубл. 26.12.2016, Бюл. № 24/2016. – 5 с.

10. Мельник В. Что дадут Украине американские тепловозы (сайт «Бизнес Цензор») [Електр. ресурс].- Режим доступу: <https://biz.censor.net.ua/resonance/3044084/>. – Назва з екрану.

11. Звіт про НДР «Дослідження технічного стану контактних затискачів пошкодженого локомотиву ВЛ-80к, № 048». – На замовлення Служби локомотивного господарства Південної залізниці, лист № 064 від 15.05.2013 р. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2013. – 33 с.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Горобець Володимир Леонідович,

д. т. н., професор, завідувач кафедри «Безпека життєдіяльності», Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010.

Тел.: +38 056 793 19 08.

E-mail: vgor5650@gmail.com;

ORCID 0000-0002-6537-7461.

Коваленко Валентина Володимирівна,

к. т. н., с. н. с., провідний науковий співробітник ГНДЛ «Технології та системи безпеки на транспорті» кафедри «Безпека життєдіяльності» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010.

Тел.: +38 050 489 07 72.

E-mail: kovalenkovv@upp.diit.edu.ua;

ORCID 0000-0002-1196-7730.