
Stanovenie úspory energetických nákladov na pohon vlaku znížením jazdného odporu

Sergii Panchenko, prof., Dr.Sc. Tech.

Katedra automatizácie a počítačového riadenia vlakov, Fakulta informačných a riadiacich systémov a technológií, Ukrajinská štátna univerzita železničnej dopravy, Feuerbakh sq., 7, 61050, Charkov, Ukrajina.
E-mail: panchenko074@ukr.net

Juraj Gerlici, prof. Dr. Ing.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika.
E-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk, Tel.: +421 41 513 2550

Alyona Lovska, prof. Ing., Dr.Sc. Tech.*

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika.
E-mail: alyonaLovskaya.vagons@gmail.com

Vasyl Ravlyuk, doc. Ing., PhD.

Katedra konštrukcie vagónov a kvality produktov, Strojnícka a energetická fakulta, Ukrajinská štátna univerzita železničnej dopravy, Feuerbakh sq., 7, 61050, Charkov, Ukrajina.
E-mail: panchenko074@ukr.net

Ján Dižo, doc. Ing., PhD.

Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Strojnícka fakulta, Žilinská univerzita v Žiline, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, Slovenská republika.
E-mail: jan.dizo@fstroj.uniza.sk, Tel: +421 41 513 2560

Determination of savings of the energy costs to power a train by reducing the running resistance

Abstract: Examining the mechanical part of the braking systems of railway vehicles allowed us to find out that the brake blocks of the most freight cars are pressed by their upper ends against certain wheel surfaces when the brakes are released. This causes additional resistance to the movement of the train and also causes significant damage to the railway infrastructure of *Ukraine* in the case of freight traffic. To eliminate the friction between the brake block and the wheel when the train moves in the traction mode and when using inertia, it is advisable to use a modernized device developed according to the *UkrDAZT* technology, which allows to reduce the running resistance of the train. This leads to a reduction in the consumption of fuel and electricity for the propulsion of trains and at the same time allows to reduce the operating costs of rail transport for energy consumption.

Keywords: freight wagon, brake blocks, wear of blocks, efficiency of operation

ÚVOD

Potreba znižovania prevádzkových nákladov v podmienkach konkurencie na trhu dopravných služieb kladie požiadavky na organizáciu systému údržby a opráv nákladných koľajových vozidiel na základe skutočného stavu ich komponentov [1, 2]. Preto na základe analýzy štatistických údajov o počte

výskytov dopravných nehôd v dôsledku neuspokojivej činnosti brzdného systému nákladných vagónov boli zistené dva hlavné dôvody, ktoré vedú k výraznému zhoršeniu činnosti brzdného zariadenia:

- v pneumatickej časti dochádza k výraznému zhoršeniu kvality brzdného potrubia

- a v mechanickej časti je pozorované klinové dvojité opotrebovanie kompozitných brzdových klátikov.

Problém klinového opotrebovania brzdových klátikov vznikol už dávno, niekoľko desaťročí ho riešili vedci a odborníci z rôznych krajín. Uskutočnilo sa veľké množstvo štúdií a vyvinulo sa veľké množstvo rôznych zariadení na elimináciu javu abnormálneho opotrebovania brzdových klátikov. Medzi nimi však nie je dostatočne účinný.

V dôsledku nedokonalosti konštrukcie pákového prevodu nákladných vozňov sa pri odbrzdení podložky nakláňajú a dosadajú hornými koncami na valivú plochu kolies, čím pri pohybe vlaku vzniká škodlivé trenie, ktoré vedie k vzniku klinovo-dvojitého opotrebovania podložiek (obr. 1). To je spojené s výraznými nadmernými nákladmi na brzdové klátiky na železnici a zvýšenie trakčného odporu vo vlakoch v režime trakcie a dobehu vedie k nadmerným výdavkom nosičov energie na trakciu vlaku [3].



Obr. 1. Klinovité opotrebované brzdové klátiky vozňov

Pri brzdení čiastočne opotrebované klátiky sú v hornej časti deformované trením, výrazne zvyšujú tvorbu tepla a rapídne zvyšujú teplotu kovu na jazdnej ploche kolies. Z tohto dôvodu sa účinnosť brzdenia vlakov zhoršuje. Pohyb vlakov je preto v súčasnosti väčšinou sprevádzaný hlasným klepaním kolies, čím sa zvyšuje aj merný odpor pohybu a spotreba energie potrebnej na pohyb trakciu vlaku, poškodzuje sa trať, vozne, aj náklad.

V posledných rokoch sa počet odstavených nákladných vozňov zvýšil v dôsledku vytvárania podmienok pre vysokoteplotné poškodenie jazdných plôch kolies dvojkolesí v dôsledku takých porúch, ako sú zvary, prstencové útvary, odlupovanie kovu, sieť tepelných prasklín a pod. To priamo súvisí s fenoménom klinoduálneho opotrebovania brzdových klátikov, ktorého výsledkom je nadmerné zahrievanie jazdnej plochy kolies pri brzdení vlaku [4].

S cieľom znížiť počet dopravných nehôd na železničiach na *Ukrajine* sa každoročne vykonáva analýza [5], podľa ktorej je vypracovaných množstvo opatrení, ktoré poskytujú príležitosť na zlepšenie situácie na železnici. Príčinou dopravných udalostí je v mnohých prípadoch porucha mechanickej časti

brzdy, ktorú pri údržbe nákladných vozňov nie je možné vždy spoľahlivo predvídať a včas odhaliť, tak, aby sa zabránilo núdzovým situáciám počas ich prevádzky.

Mnoho vedeckých prác sa venovalo problematike zlepšenia prevodu brzdového pákovia nákladných vagónov, najmä určovaniu prenosu výkonu pri klinovom dvojitém opotrebovaní brzdových klátikov nákladných vagónov, jeho prevencii a zvýšeniu normatívneho zdroja brzdových klátikov. Najmä v práci [6] pri vývoji podvozka novej generácie pre nákladné vagóny bolo navrhnuté zariadenie na vyberanie klátikov s automatickým nastavením vzájomnej polohy brzdových klátikov a jazdnej plochy kolies. V čínskej brzdovej pákovej prevodovke má pôvodná konštrukcia podvozka ZK-1 trojuholníkové zavesenie [7]. Vyrába sa na ojnici neodpruženej časti, ktorá zasa spočíva na kužeľových puzdrách cez gumu a na zabránenie pádu trojuholníka na železničnú trať sa aktívne používajú bezpečnostné laná alebo konzoly.

Môžeme uviesť ďalšie príklady publikovaných vedeckých prác [8-10], kde sa osobitná pozornosť venuje vplyvu negatívnych faktorov brzdového systému nákladných vlakov, ktoré vedú k neželaným udalostiam kvôli vyššie spomínanému klinovému opotrebovaniu brzdových klátikov. To všetko opäť zdôrazňuje relevantnosť práce, ktorej výsledky sú prezentované v tejto štúdií.

1 METODOLÓGIA

Na zníženie pohybového odporu a elimináciu trenia medzi brzdovým klátikom a kolesom pri pohybe vlaku je potrebné v prípade nákladných vozňov použiť zariadenie vyvinuté podľa technológie *UkrDAZT*, ktoré umožní znížiť prevádzkové náklady železničnej dopravy na spotrebu energie, ako aj náklady na mazivá na prevádzku dieselových lokomotív.

Na zdôvodnenie takýchto rozhodnutí použijeme ustanovenia teórie trakcie lokomotívy [11], ako aj niektoré štúdie faktorov, ktoré ovplyvňujú spotrebu zdrojov energie [11-13].

Celkový odpor vlaku pozostáva z hlavného odporu w_o a prídavného odporu W_d .

Údaje o pôvode hlavných odporových síl naznačujú, že tento odpor závisí od mnohých faktorov, ktoré sú v zložitom a často vzájomne prepojenom vzťahu.

Pri výpočtoch uvažujeme nákladný vlak zložený z týchto vozidiel: dieselové lokomotívy radu *M62* a *2TE116*, elektrický elektrický rušeň *VL11* (jednosmerný), elektrický rušeň *VL80s* (striedavý), ako tie s najväčšou mernou hmotnosťou vo vozidlovom parku nákladných lokomotív na hlavných tratiach [14].

Je veľmi náročné nastaviť dostatočne presné hodnoty jednotlivých odporových prvkov a najmä také hodnoty, ktoré by boli vhodné pre rôzne prevádzkové podmienky koľajových vozidiel. Preto je v praxi pre výpočet hlavného odporu [15] potrebné použiť empirické vzorce získané ako výsledok značného počtu experimentálnych meraní odporu [11].

Základný odpor je určený vzorcom:

$$w_o = \frac{W_d}{(m_l + m_s) \cdot g}, \quad (1)$$

kde m_l je vypočítaná hmotnosť lokomotívy [t],

m_s je hmotnosť kompozície [t].

Dodatočný pohybový odpor W_d zahŕňa odporové sily z jazdy v stúpaní, pri pohybe v oblúkoch trate, pri pohybe z miesta, ako aj odporové sily vznikajúce pri nízkych teplotách vonkajšieho prostredia, pri pôsobení protismerného alebo bočného vetra.

Treba si uvedomiť, že v dôsledku nedokonalého vyhotovenia (spoje brzdové systému) podvozok sa takmer v každom nákladnom vagóne pri uvoľnení brzd nakláňajú klátiky a dosadajú hornými koncami na jazdnú plochu kolies, čo vytvára dodatočné trenie pri pohybe vlaku pri jazde [16]. Hodnota tohto typu odporu koľajových vozidiel je určená vzorcom:

$$W_{dg} = 1000 \cdot \varphi_{kt} \cdot \sum K_{dg}, \quad (2)$$

kde 1000 je konverzný faktor [$\text{kN} \cdot \text{N}^{-1}$],

K_{dg} je vypočítaný prítlak brzdových klátikov z dôvodu nedokonalého vyhotovenia HVP podvozok [$\text{kN} \cdot \text{nápr.}^{-1}$].

Vypočítaný koeficient trenia pre kompozitné brzdy je určený empirickým vzorcom [11, 17]:

$$\varphi_{kt} = 0,36 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150}, \quad (3)$$

kde V je rýchlosť [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$].

Veľkosť vypočítaných prídavných tlakov brzdových klátikov v dôsledku nedokonalnej konštrukcie HVP podvozok pri použití 4-nápravových nákladných vozňov ako súčasti vlaku je určená vzorcom:

$$\sum K_{dg} = K_{dg} \cdot 4 \cdot n_v, \quad (4)$$

kde K_{dg} je dodatočný vypočítaný tlak brzdových klátikov v dôsledku nedokonalnej konštrukcie HVP podvozok, $K_{dg} = 0,36 \text{ kN} \cdot \text{nápr.}^{-1}$,

n_v je počet vozňov v nákladnom vlaku, hmotnosť.

Špecifická hodnota prídavného odporu od tlaku brzdových klátikov v dôsledku nedokonalého vyhotovenia HVP vozíkov pri pohybe vlaku v trakčnom režime a v režime bez pôsobenia trakčnej sily [$\text{N} \cdot \text{kN}^{-1}$] pri použití 4-nápravového nákladných vozňov vo vlaku sa určuje podľa vzorca:

$$w_{dg} = \frac{1000 \cdot \varphi_{kt} \cdot \sum K_{dg}}{m_s \cdot g} = \frac{1000 \cdot \varphi_{kt} \cdot K_{dg} \cdot n_v}{m_s \cdot g}, \quad (5)$$

kde m_s je hmotnosť vlaku [t],

g je zrýchlenie voľného pádu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$]

n_v je počet vozňov v nákladnom vlaku, hmotnosť.

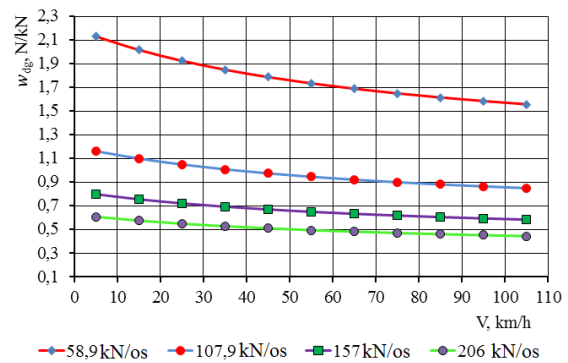
Vzhľadom na to, že zaťaženie nápravy vozňa je určené vzorcom:

$$q_v = \frac{m_s \cdot g}{4 \cdot n_v} \quad (6)$$

a berúc do úvahy vzorec (3), vzorec (5) má tvar:

$$w_{dg} = 360 \cdot \frac{V + 150}{2 \cdot V + 150} \cdot \frac{K_{dg}}{q_v}. \quad (7)$$

Závislosť špecifickej hodnoty prídavného odporu od tlaku brzdových klátikov v dôsledku nedokonalého vyhotovenia HVP podvozok od rýchlosti vlaku a zaťaženia nápravy vozňa pri použití 4-nápravových nákladných vozňov vo vlaku je znázornené na obr. 2.



Obr. 2. Závislosť špecifickej hodnoty prídavného odporu pri stlačení brzdových klátikov v dôsledku nedokonalnej konštrukcie HVP podvozok od rýchlosti vlaku a nápravového zaťaženia

Brzdňú silu nákladného vlaku tvorí:

- prítlak brzdových klátikov ku kolesu;
- premenou elektromotorov elektrických rušňov na generátory elektrického prúdu s návratom vyrobenej energie do siete trolejového vedenia (rekuperačné brzdenie).

Spotreba paliva na vlakovú prevádzku dieselového rušňa na úseku G_p je určená spotrebou paliva v párnom smere G_{pn} a nepárnom smere G_{np} .

Spotreba paliva podľa smerov sa určuje podľa vzorcov:

$$G_{pn} = \int_{\tau_s}^{\tau_s+1} G_{pn}(\tau) \cdot d\tau, \quad (8)$$

$$G_{np} = \int_{\tau_s}^{\tau_s+1} G_{np}(\tau) \cdot d\tau, \quad (9)$$

kde τ_s, τ_s+1 je čas pohybu nákladného vlaku na vybranom úseku trate so špecifickým profilom.

Merná spotreba paliva na meter prevádzkovej práce (10 000 tkm) je určená vzorcom:

$$b_p = \frac{\int_{\tau_s}^{\tau_s+l} G_{pn}(\tau) \cdot d\tau + \int_{\tau_s}^{\tau_s+l} G_{np}(\tau) \cdot d\tau}{(Q_{pn}^{br} + Q_{np}^{br}) \cdot l_k} \cdot 10^4, \quad (10)$$

kde Q_{pn}^{br} , Q_{np}^{br} je hmotnosť vlaku v jednom smere a obidvoch smeroch [t], hrubá,

l_k je vzdialenosť, ktorú prejde lokomotíva na čele nákladného vlaku v obidvoch smeroch a v jednom smere [km].

Spotreba elektrickej energie na prevádzku elektrického rušňa na úseku A_e je určená spotrebou elektrickej energie v obidvoch smeroch A_{pn} a v jednom smere A_{np} .

Spotreba elektriny podľa smerov sa určuje podľa nasledujúcich vzorcov:

$$A_{pn} = \int_{\tau_s}^{\tau_s+l} A_{pn}(\tau) \cdot d\tau, \quad (11)$$

$$A_{np} = \int_{\tau_s}^{\tau_s+l} A_{np}(\tau) \cdot d\tau. \quad (12)$$

Špecifická spotreba elektrickej energie na prevádzkový meter (104 tkm brutto) sa určuje podľa vzorca:

$$a_e = \frac{\int_{\tau_s}^{\tau_s+l} A_{pn}(\tau) \cdot d\tau + \int_{\tau_s}^{\tau_s+l} A_{np}(\tau) \cdot d\tau}{(Q_{pn}^{br} + Q_{np}^{br}) \cdot l_k} \cdot 10^4. \quad (13)$$

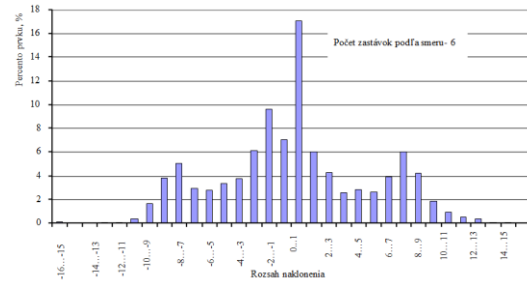
Na riešenie problémov súvisiacich s výpočtami ťahu použijeme metódu analytickej integrácie konečných rozdielov pomocou počítača.

2 VÝSLEDKY VÝSKUMU

Hlavné trakčné výpočtov využijeme na určenie spotreby energie na pohyb nákladného vlaku za podmienok profilu reálneho úseku regionálnej pobočky „Pivdenna Zaliznytsia“ JSC „Ukrzaliznytsia“ pri použití naftového rušňa (rušeň radu M62, resp. radu 2TE116) a elektrického rušňa (VL11 elektrický rušeň pre jednosmernú trakciu a VL80s elektrický rušeň pre striedavú trakciu) so základným vyhotovením (s typovým zariadením HSV) a novou verziou (s modernizovaným zariadením HSV) nákladnými vozňami vo vlaku [16].

Charakteristika profilu úseku regionálnej pobočky "Pivdenna Zaliznytsia" as "Ukrzaliznytsia" je znázornená na obr. 3 a obr. 4 [12, 13, 19]. Ako vyplýva z uvedených údajov, v jednom smere je profil sklonu trate 0 ÷ 1 ‰, v párnom smere je to podobne sklon 0 ÷ 1 ‰. Celková dĺžka okruhu, ktorý

prekoná nákladný vlak, je 344,502 km. Vlak má na úseku 6 zastávok v oboch smeroch.



Obr. 3. Histogram rozloženia stúpaní na trati v jednom smere



Obr. 4. Histogram rozloženia stúpaní na trati v obidvoch smeroch

Aby bolo možné vykonať výpočty trakcie, musia byť okrem charakteristík profilu úseku špecifikované aj ďalšie údaje, a to ako pri použití dieselového rušňa, tak aj pri použití elektrického rušňa:

- hmotnosť vlaku v hrubých tonách,
- počet vozňov vo vlaku,
- nakladacie vozne,
- technická rýchlosť,
- počet náprav vozna vo vlaku.

Na určenie týchto ukazovateľov použijeme referenčné ukazovatele železničnej prevádzky JSC "Ukrzaliznytsia" na rok 2021 [18].

Pomocou výkonových ukazovateľov železnice JSC "Ukrzaliznytsia" vygenerujeme začiatkové údaje pre realizáciu výpočtov trakcie [11, 19].

Ročný počet najazdených kilometrov nákladných vlakov $\sum NS$ pozostáva z najazdených kilometrov nákladných vlakov pri použití elektrickej lokomotívy $\sum NS_{et}$ a dieselovej lokomotívy $\sum NS_{dt}$.

Ročný počet najazdených kilometrov nákladných vlakov v tisícoch vlak-km podľa použitej trakcie sa určuje podľa vzorcov:

- závislá (elektrická) trakcia:

$$\sum NS_{et} = \frac{\sum Q_{br}^{et}}{Q_{br}^{et}} \cdot 1000, \quad (14)$$

- nezávislá trakcia:

$$\sum NS_{dt} = \frac{\sum Q_{br}^{dt}}{Q_{br}^{dt}} \cdot 1000, \quad (15)$$

kde $\sum QI_{br}^{et}$, $\sum QI_{br}^{dt}$ je ročný prevádzkový obrat nákladu v nákladnej doprave, ktorý je realizovaný závislou a nezávislou trakciou v mil. tkm brutto,

\bar{Q}_{br}^{et} , \bar{Q}_{br}^{dt} je priemerná hmotnosť nákladného vlaku závislej a nezávislej trakcie, t brutto.

Priemerná hmotnosť nákladného vlaku podľa typov trakcie je určená vzorcami:

- závislá trakcia:

$$\bar{Q}_{br}^{et} = \frac{P_l^{et}}{S_l^{et} \cdot (1 - \beta_{pc})}, \quad (16)$$

- nezávislá trakcia:

$$\bar{Q}_{br}^{dt} = \frac{P_l^{dt}}{S_l^{dt} \cdot (1 - \beta_{pc})}, \quad (17)$$

kde P_l^{et} , P_l^{dt} je priemerná denná produktivita elektrickej lokomotívy a dieselovej lokomotívy, brutto tisíc [tkm],

S_l^{et} , S_l^{dt} je priemerný denný počet najazdených kilometrov, elektrický rušeň a dieselový rušeň, [km],

β_{pc} je koeficient pomocného kilometrového výkonu lokomotívy.

Koeficient pomocného kilometrového výkonu lokomotívy je určený vzorcom

$$\beta_{pc} = 1 - \frac{P_l}{S_l \cdot \bar{Q}_{br}^l}, \quad (18)$$

kde \bar{Q}_{br}^l je priemerná hmotnosť nákladného vlaku, [t] hrubá,

P_l je priemerná denná produktivita lokomotívy, [tkm] hrubá,

S_l je priemerný denný počet najazdených kilometrov lokomotívy [km].

Priemerný počet vozňov vo vlaku je určený vzorcom:

$$\bar{n} = \frac{\sum nS}{\sum NS} = \frac{\sum nS}{\sum NS_{et} + \sum NS_{dt}}, \quad (19)$$

kde $\sum nS$ je ročný celkový počet najazdených kilometrov nákladných vagónov, [tis. voz.km].

Priemerné zaťaženie nápravy nákladného automobilu podľa typov trakcie je určené vzorcami:

- nezávislá trakcia:

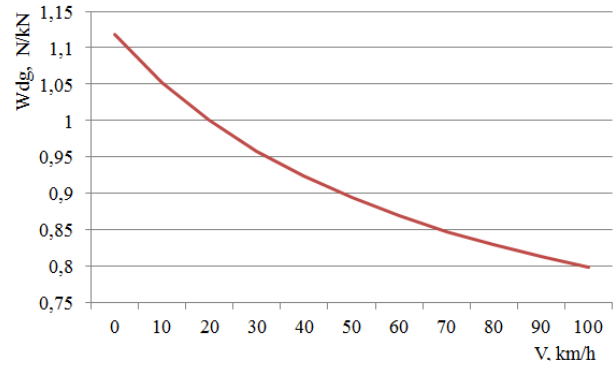
$$\bar{q}_{br}^{et} = \frac{Q_{br}^{et}}{4 \cdot \bar{n}}, \quad (20)$$

- závislá trakcia:

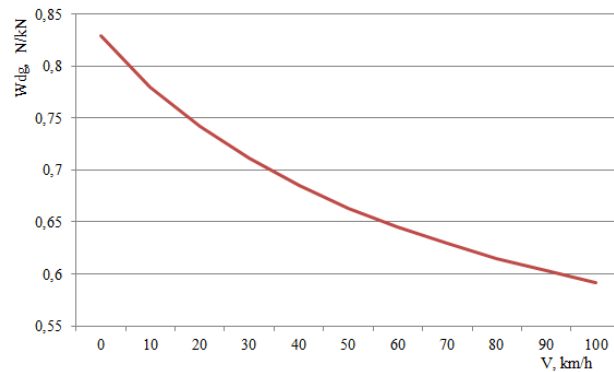
$$\bar{q}_{br}^{dt} = \frac{Q_{br}^{dt}}{4 \cdot \bar{n}}. \quad (21)$$

Výsledky stanovenia počiatočných údajov na vykonanie výpočtov trakcie sú uvedené v [18].

Výsledky výpočtu merného odporu z prídavného trenia horných častí kompozitných brzdových klátikov o valivý povrch kolies pri pohybe vlaku s rušňami rôznych typov v trakčnom režime a vo voľnobehu sú vypočítané podľa vzorca (5) a výsledky výpočtu sú znázornené na obr. 5 a obr. 6.



Obr. 5. Závislosť hodnoty prídavného merného odporu od prídavného trenia pri jazde vlaku s hmotnosťou 2505 t brutto s dieselovým rušňom 2TE116 v trakčnom režime a v režime voľnobehu



Obr. 6. Závislosť hodnoty merného odporu od prídavného trenia pri pohybe vlaku s hmotnosťou 3378 t brutto s elektrickými rušňami VL11 a VL80s v trakčnom režime a v režime naprázdno

ZÁVER

Použitie modernizovaného zariadenia vyvinutého pomocou technológie UkrDAZT v nákladných vozňoch umožňuje znížiť jazdný odpor vlakov v dôsledku absencie dodatočného trenia medzi brzdovým klátikom a kolesom pri jazde vlaku v režime trakcie a voľnobehu. Táto okolnosť vedie k zníženiu spotreby paliva a elektrickej energie potrebnej na pohyb vlaku, čo umožňuje znížiť prevádzkové náklady železničnej dopravy na spotrebu energie, ako aj náklady na mazivá na prevádzku dieselových rušňov.

Výsledky výpočtov trakcie týkajúce sa stanovenia mernej spotreby energie s rôznymi typmi trakčných koľajových vozidiel pri používaní modernizovaného zariadenia na rovnomerné opotrebenie brzdových klátikov vyvinutého podľa technológie UkrDAZT

zabezpečujú zníženie mernej spotreby paliva na meter prevádzky-práce (104 tkm brutto) pri použití:

- dieselovej lokomotívy radu M62 o 8,9 %,
- dieselovej lokomotívy radu 2TE116 o 19,7 %,
- jednosmernej elektrickej lokomotívy o 8,0 %,
- striedavej elektrickej lokomotívy o 7,25 %.

Pod'akovanie

Tento výskum podporil projekt VEGA 1/0513/22: *Výskum vlastností železničných brzdoých komponentov v simulovaných prevádzkových podmienkach na zotrvačnikovom brzdovom stave. Tento výskum podporila Kultúrna a vzdelávacia grantová agentúra MŠ SR v projekte č. KEGA 031ŽU-4/2023: „Rozvoj kľúčových kompetencií absolventa študijného programu Vozidlá a motory.“*

LITERATÚRA

- [1] FOMIN, O. - GERLICI, J. - GORBUNOV, M. - VATULIA, G. - LOVSKA, A. - KRAVCHENKO, K. (2021): *Research into the Strength of an Open Wagon with Double Sidewalls Filled with Aluminium Foam*. In: *Materials*, 14 (12), 3420.
- [2] PANCHENKO, S. - VATULIA, G. - LOVSKA, A. - RAVLYUK, V. - ELYAZOV, I. - HUSEYNOV, I. (2022): *Influence of structural solutions of an improved brake cylinder of a freight car of railway transport on its load in operation*. In: *EUREKA: Physics and Engineering*, 6. pp. 45–55.
- [3] NECHVOLODA, S. I. - ROMANYUKHA, M. O. - NECHVOLODA, K. S. (2007): *Problems of uneven wear of brake pads in freight cars*. In: *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 86. pp. 50-56.
- [4] LOVSKA, A. O. - RAVLYUK, V. G. (2022): *Study of non-normative wear of brake pads and its effect on the braking efficiency of freight trains*. In: *Collection of scientific works "Rail Rolling Stock"*, 25. pp. 30-50.
- [5] *Analysis of the state of traffic safety in the structure of JSC "Ukrzaliznytsia" in 2019*. Joint-stock company "Ukrainian railway" Department of traffic safety. 198 p.
- [6] RADZYHOVSKY, A. A. - OMEL'YANENKO, I. A. - TYMOSHINA, L. A. (2008): *System approach to the design of trolleys for cars with increased axial loads*. In: *Wagon park*, 8. pp. 10-16.
- [7] BLOKHIN, E.P. - ALPYSBAEV, K.T. - PANASENKO, V.YA. - GARKAVI, N.YA. - KLIMENKO, I.V. - GRANOVSKY, R.B. - FEDOROV E.F. (2012): *Bogies ZK1 of gondola cars built in China*. In: *Wagon park*, 9. pp. 12-14.
- [8] MARTYNOV, I. E. - NECHVOLODA, K. S. (2020): *On the method of complete elimination of*

wedge-shaped wear of brake pads of freight cars. In: *Wagon park*, 4. pp. 36-39.

- [9] VAKKALAGADDA, M. R. K. - SRIVASTAVA, D. K. - MISHRA, A. - RACHERLA, V. (2015): *Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways*. In: *Original Research Article*, 328-329. pp. 64-76.
- [10] VERNERSSON, T. (1999): *Thermally induced roughness of tread braked railway wheels. Part 1: Brake rig experiments*. In: *Wear*, 99. pp. 96-105.
- [11] BOBIR, D. V. - KAPITSA, M. I. - SERDYUK, V. N. (2022): *Theory of locomotive traction. Traction calculations for industrial railway transport: a study guide*. Dnipro, 113 p.
- [12] KALABUKHIN, YU. E. (2009): *Methodology and results of evaluation of technical and economic performance indicators of the mainline locomotive when moving a freight train*. In: *Bulletin of the Eastern Ukrainian National University named after V. Dalya*, 2(132). pp.157-163.
- [13] KALABUKHIN, YU. E. (2011): *Results of the study of the influence of operational factors on the traction and energy indicators of the use of locomotive traction in freight traffic*. In: *Collection of scientific works of the Ukrainian State Academy of Railway Transport*, 122. pp. 66-75.
- [14] TARTAKOVSKY E. D. - AGULOV A. F. - FALENDYSH, A. P. (2009): *Theory and design of locomotives. Selection and calculation of the main components of locomotives: a study guide*. Kharkiv, Part 2, 150 p.
- [15] BABAEV, A. M. - DMYTRIEV, D. V. (2007): *Principle of operation, calculations and basics of operation of railway rolling stock brakes*. Kyiv, 176 p.
- [16] RAVLYUK, V. G. (2019): *Study of the features of dual wear of pads in the brake system of freight cars. Science and progress of transport*. In: *Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2 (80). pp. 111–126.
- [17] RAVLYUK V. G. - LOVSKA A. O. - DEREVYANCHUK Y. V. - AFANASENKO I. M. (2016): *Tasks and methodical recommendations for the course project in the discipline "Automatic rolling stock brakes"*. Kharkiv, 48 p.
- [18] *Integrated report of JSC "Ukrzaliznytsia" (management report) for 2020*. URL: <https://www.uz.gov.ua/files/file/about/investors/UZ%20Integrated%20Report%202020%20>
- [19] KALABUKHIN, YU. E. (2010): *Improvement of the methodology for determining the technical and economic indicators of the operation of traction rolling stock taking into account the life cycle*. Diss. Dr. Tech. Sciences: 05.22.07. Kharkiv, 420 p.