

APLIKÁCIA METÓD TEÓRIE ROZHODOVANIA PRI TVORBE VOZIDIEL

APPLICATION OF DECISION THEORY METHODS IN VEHICLE CREATION

Kateryna KRAVCHENKO¹, Juraj GERLICI², Oleksandr KRAVCHENKO³, Pavol ŠŤASTNIAK⁴

Abstrakt

Úroveň efektívnej práce podvozku je určovaná a hodnotená podľa značného množstva sledovaných parametrov, pretože vplyv týchto faktorov v rôznych režimoch jazdy koľajového vozidla je odlišný. Cieľom predkladanej štúdie je určiť vhodný spôsob rozhodovania pri tvorbe koľajového vozidla a s jeho pomocou identifikovať faktory, ktoré majú najvýraznejší vplyv na efektívnosť koľajového vozidla. Bola vytvorená objektívna funkcia, ktorá umožňuje výber najefektívnejšieho technického riešenia z určitého počtu alternatív. Zvažuje sa účinnosť selektívneho výberu charakteristík trakčných elektrických motorov (TEM) pre dvojkolesia, berúc do úvahy prerozdelenie zaťaženia a rozdiel adhézných podmienok.

Kľúčové slová

objektívna funkcia, trakčná sila, krútiaci moment, zvislé zaťaženie

Abstract

The level of effective bogie work is determined and evaluated according to a large number of monitored parameters because the influence of these factors in different modes of rolling stock is different. The aim of the present study is to determine the appropriate way of decision-making in the creation of rolling stock and with its help to identify the factors that have the most significant impact on the efficiency of the rolling stock. An objective function has been created that allows the selection of the most efficient technical solution from a number of alternatives. The effectiveness of the selective selection of traction electric motor (TEM) characteristics for two-wheelers is considered, taking into account the load redistribution and the difference in adhesion.

Keywords

objective function, traction force, torque, vertical load

¹ **doc. Kateryna Kravchenko, Ph.D.**, Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta. Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, SR. Tel.: +421 41 513 2660, e-mail: kateryna.kravchenko@fstroj.uniza.sk

² **prof. Dr. Ing. Juraj Gerlici**, Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta. Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, SR. Tel.: +421 41 513 2652, e-mail: juraj.gerlici@fstroj.uniza.sk

³ **prof. Oleksandr Kravchenko, Dr.Sc.Tech.**, Zhytomyr Polytechnic State University, Faculty of Computer-Integrated Technologies, Mechatronics and Robotics. Department of Automobiles and Automobile Economy, Chudnivska 103, 10005 Zhytomyr, Ukraine. Tel.: +38 050 91 38 228, e-mail: avtoap@ukr.net

⁴ **Ing. Pavol Šťastniak, Ph.D.**, Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta. Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, SR. Tel.: +421 41 513 2562, e-mail: pavol.stastniak@fstroj.uniza.sk

1 ÚVOD

Ekonomická efektívnosť prevádzky rušňa závisí od vhodne vyvodzovanej ťažnej sily. Dosiahnutie maximálneho ťažného účinku je náročná úloha z dôvodu vplyvu rôznych konštrukčných a prevádzkových faktorov na hnacom vozidle. Statické a dynamické prerozdelenie zaťaženia dvojkolesí, rozdiely vo vlastnostiach interakcie jednotlivých dvojkolesí s koľajnicami [1-9], rozdiel v charakteristikách motora a množstvo ďalších faktorov ovplyvňujú celkovú maximálnu realizovateľnú trakčnú silu. Prepojenie a vzájomná závislosť parametrov systému „vozidlo-koľajnica“, ktoré sa menia počas prevádzky, predurčuje potrebu integrovaného prístupu k analýze trakčných a adhézných vlastností počas jeho projektovania a ďalšieho praktického využitia. Vývoj opatrení na dosiahnutie maximálnej nožnej trakčnej sily realizovanej samostatným dvojkolesím je aktuálnou otázkou zvyšovania trakčných vlastností rušňov.

2 ANALÝZA PROBLEMATIKY

Zložitosť procesu vzájomného pôsobenia dvojkolesia s koľajnicou, zmena parametrov podvozku počas prevádzky, potreba uspokojiť množstvo protikladných konštrukčných riešení a výber vhodného riešenia si vyžaduje použitie efektívneho kritéria [1-9]. Toto kritérium umožní určiť racionálne riešenia na dosiahnutie maximálnej realizovateľnej trakčnej sily pre zvyšovanie účinnosti a konkurencieschopnosti hnacieho vozidla.

Ťažné vlastnosti lokomotívy sa predovšetkým hodnotia koeficientom využitia adhézneho hmotnosti η , koeficientom adhézie ψ_a , ťažnou silou na spriahadle F .

Koeficient využitia adhézneho hmotnosti η [5-7], ktorý je definovaný ako pomer najmenšieho statického zaťaženia P_{lim} ktoréhokoľvek z jeho dvojkolesí na koľajnice pri rozjazde a jazde v trakčnom režime na jeho priemernú hodnotu P . Tento kritérium sa dá ľahko vypočítať a merať. Nezohľadňuje však dynamickú povahu zmien vertikálneho zaťaženia, krútiaceho momentu, koeficientu adhézie v kontakte kolesa s koľajnicou v dôsledku kinematiky, jazdnej dynamiky a tretích podmienok.

Zvyčajne sa pri posudzovaní vplyvu konštrukcie vozidla na koeficient využitia adhézneho hmotnosti predpokladá, že statické zaťaženie a vyvinutá ťažná sila pre všetky dvojkolesia majú rovnakú hodnotu [8]. Vplyv dynamického faktora je vylúčený. V takom prípade je pre lokomotívy s vlastným pohonom dvojkolesia statický koeficient využitia adhézneho hmotnosti vyjadrený nasledovne [7]:

$$\eta = \frac{1}{1 + k\psi_o}, \quad (1)$$

kde k je koeficient odľahčenia dvojkolesia pri rozjazde za jazdných podmienok s obmedzenou ťažnou silou na adhéziu, ψ_o je koeficient adhézie medzi dvojkolesím a koľajnicami.

Toto kritérium má rovnaké nevýhody ako predchádzajúce. Tu sa však zohľadňuje vplyv dynamických faktorov na proces pohybu lokomotívy. Zároveň je komplikovanejšie, pretože okrem stanovenia vertikálnych síl je potrebné určiť aj ťažnú silu dvojkolesia.

Rozšíreným kritériom pre hodnotenie trakčného výkonu je realizovaný koeficient adhézie ψ_a [9-10]. Výhodou tejto metódy posudzovania je schopnosť zohľadniť pomocou pravdepodobno-teoretických metód celú škálu faktorov ovplyvňujúcich realizáciu ťažnej sily. V mnohých publikáciách sa ako kritérium na posúdenie trakčných vlastností rušňov použila ťažná sila na spriahadle F , ktorú môže lokomotíva dlhodobo realizovať bez šmyku [6, 7]. V takom prípade sa ťažná sila rušňa vyhodnocuje bezprostredne. Využíva sa pritom kritérium pomer plochy adhézneho zóny k ploche klzavej zóny kontaktnej plochy [11]. Týmto prístupom je na posúdenie trakčných vlastností potrebné vyriešiť kontaktný problém interakcie medzi kolesom a koľajnicou, ktorý je spojený s určitými ťažkosťami.

V [12, 13] sa na hodnotenie trakčných vlastností používa trakčný koeficient, ktorý je definovaný ako pomer skutočnej trakčnej sily k adhéznej hmotnosti lokomotívy. Medzi nevýhody tohto kritéria patrí skutočnosť, že pre rôzne spôsoby pohybu je ťažná sila lokomotívy premenlivá, preto by mal byť koeficient ťahu závislý od spôsobu pohybu, ako aj od trecích podmienok adhézie a stavu trate.

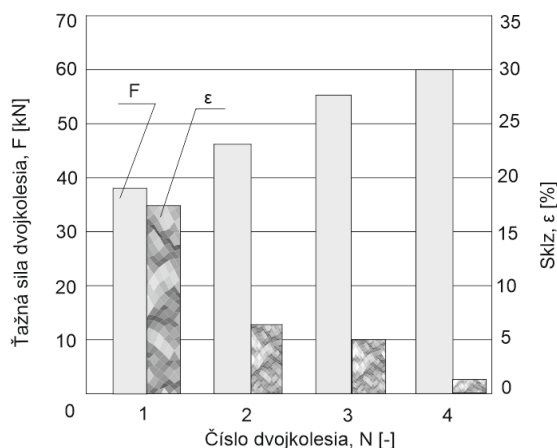
Vyššie uvedené kritériá neumožňujú posúdiť vzájomnú závislosť nerovnomerného rozloženia krútiacich momentov trakčného motora, koeficientov adhézie a vertikálneho zaťaženia dvojkolesia lokomotívy a podľa toho vypracovať účinné technické návrhy na zlepšenie trakčných vlastností rušňa.

Jedným zo spôsobov riešenia problému zvyšovania trakčných a adhézných vlastností je vytvorenie zariadení a konštrukcií podvozkov, ktoré umožňujú vyrovnanie statického zaťaženia dvojkolesí na koľajniciach kompenzáciou ich prerozdelenia v trakčnom režime. V tomto prípade sa predpokladá, že lokomotíva, ktorá má rovnaké statické zaťaženie z dvojkolesí na koľajnicu vo všetkých režimoch pohybu, má najlepšie ťažné vlastnosti. Existuje súbor opatrení, ako zvýšiť koeficient využitia adhéznej hmotnosti, ktorý charakterizuje mieru nerovnosti týchto zaťažení. Rovnosť zaťaženia dvojkolesí na koľajnice v skutočnosti neposkytuje extrém možnej ťažnej sily realizovanej lokomotívou, ktorá je spôsobená rozdielom v krútiacich momentoch a koeficientoch adhézie. Pri konštruovaní lokomotívy je preto potrebné zohľadniť všetky tri faktory (zaťaženie dvojkolesia na koľajnice, krútiaci moment a koeficient adhézie každého dvojkolesia) a vytvoriť také technické riešenia, ktoré umožňujú rezervu trakčných vlastností realizovať, čím sa zabezpečí energetická účinnosť lokomotívy.

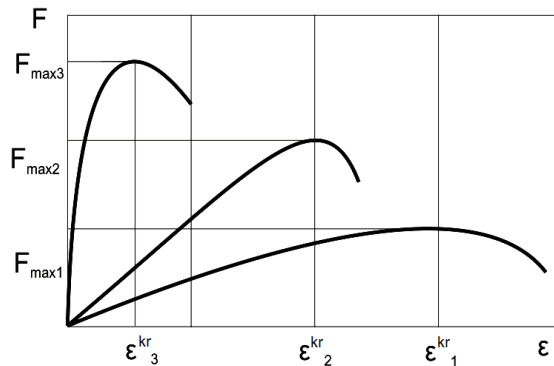
Z hľadiska použitia adhézných síl je prvé dvojkolesie z hľadiska adhézie v najhorších podmienkach, pretože má najväčší sklz (obr. 1), ktorý významne ovplyvňuje silové pôsobenie, opotrebenie kolies a koľajníc a bezpečnosť železničných koľajových vozidiel. Skl z 1. do i -tého dvojkolesia sa zníži a v tomto prípade je ťažná sila prvého dvojkolesia najmenšia [14].

To vedie k zníženiu ťažnej sily lokomotívy. Zabezpečenie maximálnej ťažnej sily realizovanej lokomotívou sa dosiahne realizáciou maximálnej ťažnej sily každým dvojkolesím. Požadovaná podmienka je možná, keď je maximálny sklz na všetkých dvojkolesiach minimálny $\varepsilon_i^{kr} \rightarrow \min$ (obr. 2).

Zníženie hodnoty kĺzania možno zabezpečiť správnym prerozdelením zaťaženia z dvojkolesia na koľajnice a zvýšením adhézie v dôsledku použitia abrazívneho materiálu pri kontakte kolesa s koľajnicou, ako aj v dôsledku regulácie krútiaceho momentu trakčného elektromotora.



Obr. 1 Rozjazd lokomotívy



Obr. 2 Distribúcia sklzu za dvojkoľesiami

3 OBJEKTÍVNA FUNKCIA A JEJ POUŽITIE

Na posúdenie trakčných vlastností bola autormi článku zostavená objektívna funkcia, ktorá zohľadňuje hlavné faktory ovplyvňujúce trakčné vlastnosti. Táto funkcia umožňuje vyhodnotiť účinnosť použitých technických riešení na zlepšenie trakčných a adhézných vlastností. Fyzikálnym významom funkcie je približovanie sa skutočnej trakčnej sily, ktorá je obmedzená charakteristikami trakčných elektromotorov, k maximálnej novej adhézii pre danú konštrukciu lokomotívy a prevádzkové podmienky. V takom prípade by hodnota kritického sklzu dvojkoľesia mala byť minimálna. Je vyjadrená nasledovne:

$$C = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{F_{si}}{F_{max i}} \right] = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n \frac{2M_i^{kr}(n, \Phi, I, L, R, \Delta_m) \mu \eta_p}{D P_i^v(\eta_{pi} \eta_{ki}) \psi_i^{max} \varepsilon_i^{kr}} \right], \quad (2)$$

kde N je počet dvojkoľesí lokomotívy a F_{si} je skutočná ťažná sila realizovaná i -tým dvojkoľesím vyjadrená ako:

$$F_{si} = \frac{2M_i^{kr}(n, \Phi, I, L, R, \Delta_m) \mu}{D} \eta_p, \quad (3)$$

kde μ je prevodový pomer trakčnej prevodovky; D je priemer valovej kružnice kolies; η_p – účinnosť trakčnej prevodovky; $M_i^{kr}(n, \Phi, I, L, R, \Delta_m)$ je krútiaci moment trakčného motora jednotlivého dvojkoľesia, ktorý závisí od otáčok trakčného motora n , magnetického toku Φ , intenzity prúdu trakčného motora I , dĺžky L a odporu R vodičov, Δ_m – odchýlka krútiaceho momentu trakčného motora od nominálnej hodnoty v rámci tolerancie odchýlky podľa GOST 2582-81 [15].

Maximálna možná trakčná sila $F_{max i}$ pre jednotlivé dvojkoľesia z hľadiska adhézie je vyjadrená ako:

$$F_{max i} = P_i^v(\eta_{pi} \eta_{ki}) \psi_i^{max} \varepsilon_i^{kr}, \quad (4)$$

kde P_i^v je zvislé zaťaženie dvojkoľesia, ktoré závisí od statického a dynamického prerozdelenia zaťaženia spôsobeného konštrukčnými parametrami rušňa η_{ki} a prevádzkovými faktormi η_{pi} [1-18]; ψ_i^{max} je maximálny koeficient adhézie dosiahnutý počas kritického sklzu ε_i^{kr} .

Pri navrhovaní rušňov sa predpokladá, že statické zaťaženie dvojkoľesí na koľajniciach je rovnaké. V skutočnosti sa jednotlivé hodnoty odlišujú. Je to spôsobené rôznymi konštrukčnými a prevádzkovými faktormi, ktorých rozsiahla analýza je uvedená vo vedeckých prácach [1-18]. V režime realizácie trakčnej sily sa tvoria najnepriaznivejšie podmienky, t.j. vznik preklzu na kolese s najmenším zaťažením, pričom ostatné vstupné podmienky sú rovnaké.

Podľa objektívnej funkcie (2) bol vyhodnotený vplyv odľahčenie predného dvojkoľesia a ďalšie prerozdelenie zaťaženia na dvojkoľesia z pôsobenia ťažnej sily v okamihu rozjazdu na trakčné vlastnosti posunovacieho rušňa TEM103. Hodnota cieľovej funkcie je $C = 0,88$ a následkom prerozdelenia zaťaženia z dvojkoľesia na koľajnice sú zníženie trakčné schopnosti rušňa o 12 %.

Prerozdelenie zvislých zaťažení negatívne ovplyvňuje nielen trakčné vlastnosti rušňa (tab. 1) [14], ale aj adhézne vlastnosti. Okrem prerozdelenia zvislých zaťažení závisia vlastnosti adhézie od hodnoty koeficientu adhézie, ktorý je ovplyvnený rôznymi faktormi, ako napr. hodnota a povaha vertikálnych, priečnych a pozdĺžnych síl v kontaktnej zóne kolesa s koľajnicou, geometria a materiál kolesa a koľajnice, stav povrchu kontaktných telies, kinematika dvojkoľesia, úroveň a štruktúra znečistenia kontaktu koleso–koľajnica, kontaktná teplota, rýchlosť jazdy a rozdiel krútiaceho momentu medzi dvojkoľesiami lokomotívy. Zvyčajne sa pri výpočte adhézných vlastností rušňa hodnotí vplyv týchto faktorov pomocou rovnakých koeficientov, okrem zvislého priemerného zaťaženia na všetky dvojkoľesia lokomotívy. V skutočnosti sú podmienky kontaktu kolies s koľajnicami rôzne a závisia od umiestnenia dvojkoľesia v podvozku.

Tab. 1 Rozloženie trakčných síl pri rozjazdi lokomotívy TEM103

Číslo dvojkoľesia N	1	2	3	4
Ťažná sila F [kN]	63	72,5	73,44	82,55

Podľa výskumu autorov [9] existuje účinok čistenia koľajníc kolesami prvého dvojkoľesia. V takom prípade môže byť koeficient adhézie prvého dvojkoľesia o 6–22 % (pre koľajníc zaliate vodou) a o 20–46 % (pre koľajníc zaolejšované) menší ako na poslednom dvojkoľesí. V tomto prípade pre posunovací dieselový rušeň TEM103 hodnota objektívnej funkcie C je 0,78. Získané výsledky naznačujú, že pri konštruovaní a ďalšej prevádzke rušňa je potrebné nevyrovnať, ale prerozdeľovať zaťaženie z dvojkoľesia na koľajníc.

K tomu sa na TEM103 používajú zaťažovacie zariadenia v spojení nadstavba/podvozok na prerozdeľovanie zaťaženia v režime realizácie maximálnych ťažných síl na elimináciu javu nakláňania [6]. Používanie zaťažovacích zariadení pre danú lokomotívu umožňuje zvýšiť hodnotu objektívnej funkcie, a teda zvýšiť jej ťažné vlastnosti o 4,4 %.

V prácach [6, 7, 16] je osobitne zaznamenaný negatívny vplyv rozdielu v krútiacom momente trakčných elektrických motorov (TEM) na trakčné vlastnosti rušňa, ako aj na spoľahlivosť jeho prevádzky a životnosť. V súlade s normou GOST 2582-81 [15] je pri výrobe trakčných elektrických strojov tolerancia odchýlky krútiaceho momentu v rozmedzí ± 5 %. V dôsledku toho sa trakčné motory nainštalované na rušni takmer vždy do istej miery líšia svojimi vlastnosťami. To spôsobuje rôznu trakčnú silu motorov a zhoršuje prevádzkové podmienky lokomotívy. Kombinácia týchto javov môže zvýšiť možnosť preklzu, čo negatívne ovplyvňuje nielen ťažné vlastnosti rušňa, ale zvyšuje aj spotrebu piesku, opotrebenie koľajníc a kolies a spotrebu elektrickej energie na pohon súprav.

Pre zabezpečenie maximálnej ťažnej sily sa v praxi používa individuálne riadenie trakčnej sily každej nápravy [17]. V takom prípade sa ťažná sila na dvojkoľesia vyrovná v závislosti od skutočného vertikálneho zaťaženia a preklzu dvojkoľesia. V náročnejších režimoch jazdy, napr. rozjazd, jazda po dlhých stúpaniach a klesaniach, vyrovnanie zaťaženia vedie k tomu, že najmenej zaťažené dvojkoľesia sa snažia vyvinúť rovnaké úsilie ako najviac zaťažené dvojkoľesia. Stanovenie cieľa úplného vylúčenia preklzu ako javu znamená vedomé nedostatočné využitie ťažného výkonu, najmä pri zlých adhézných vlastnostiach koľajníc. V [18] navrhli nevyrovnávať elektrické zaťaženie trakčného motora, ale naopak ho rozložiť na trakčné motory, berúc do úvahy skutočné podmienky adhézie pod každým dvojkoľesím.

Regulácia trakčného motora každej nápravy umožňuje stratiť elektrické zaťaženie na najmenej zaťaženom dvojkoľesí a podľa toho sa zníži aj celková trakčná sila. Navrhuje sa selektívny výber charakteristík trakčných elektrických motorov pre dvojkoľesia lokomotívy s priradením na rozdiel

v ich krútiacom momente, ako aj na prerozdelenie zaťaženia z dvojkoľesí na koľajnice a rozdiel adhézných podmienok pre každé dvojkoľesie. V takom prípade musí byť splnená podmienka:

$$M_{lim} < M_i \quad (5)$$

kde M_{lim} – krútiaci moment trakčného motora najmenej zaťaženého dvojkoľesia; M_i – krútiaci moment i -toho dvojkoľesia.

Účinnosť diferencovaného výberu sa zvažuje v tabuľke 2 pre posunovací dieselový rušeň – TEM103. Údaje sú uvedené pre každé dvojkoľesie pre najhorší prípad montáže trakčných elektromotorov a pre selektívny výber trakčných elektromotorov. Vykonaný selektívny výber umožňuje znížiť frekvenciu a rozsah trakčného elektrického motora a zvýšiť trakčné vlastnosti o 4,9 % ($C = 0,917$).

Tab. 2 Rozdelenie krútiaceho momentu na dvojkoľesia dieselového lokomotívy TEM103

Číslo dvojkoľesia		1	2	3	4
Prinajhoršom umiestnení trakčných motorov	[%]	+3,8	-5	-5	+3,8
Hodnota objektívnej funkcie $C = 0,873$					
Navrhnutý selektívny výber trakčných motorov	[%]	-3,8	+5	+5	-3,8
Hodnota objektívnej funkcie $C = 0,917$					

4 ZÁVER

Na posúdenie vlastností trakcie a adhézie lokomotív a na výber najvýhodnejšieho technického riešenia sa navrhuje použiť vyvinutú objektívnu funkciu. Objektívna funkcia zohľadňuje vzájomne závislú povahu vertikálnych zaťažení, rozdiel v krútiacom momente trakčného motora a nerovnomerné rozloženie koeficientov adhézie na dvojkoľesia lokomotívy. Podľa objektívnej funkcie sa navrhuje selektívny výber trakčných elektromotorov pre dvojkoľesia lokomotívy, čo znamená inštaláciu trakčného elektromotora s najnižším krútiacim momentom na dvojkoľesie s najmenším zvislým zaťažením a najhoršími adhéznymi podmienkami, teda na odľahčenom dvojkoľesí. A naopak, na najviac zaťaženom dvojkoľesí inštalovať motor s najvyšším krútiacim momentom.

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014–2020 pre projekt: Inovatívne riešenia pohonných, energetických a bezpečnostných komponentov dopravných prostriedkov, s ITMS kódom projektu 313011V334, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja.



EURÓPSKA ÚNIA
Európsky fond regionálneho rozvoja
OP Integrovaná infraštruktúra 2014 – 2020



MINISTERSTVO
DOPRAVY A VÝSTAVBY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



Literatúra

- [1] MELNIK, R., CHUDZIKIEWICZ, A., KOZIAK, S., OPALA, M., DIŽO, J. Dynamic properties and wear analysis of a rail vehicle with wheels' self-lubricating coatings. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2021, **23**(1), B22–B32. ISSN 1335-4205.
- [2] DIŽO, J., BLATNICKÝ, M. Assessment of dynamic properties of a carriage using multibody simulation considering rigid and flexible tracks. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, **659**(1), 012052. ISSN 1757-8981.

- [3] GORBUNOV, M., KARA, S., NOZHENKO, O., FOMIN O., VAICIŪNAS, G., PETRENKO, V. Creation of the image of the new generation freight car bogie. In: *Transport Means 2018, Proceedings of the 22nd International Scientific Conference*. Kaunas: Kaunas University of Technology, 2018, 1277–1283. ISSN 1822-296 X.
- [4] SAPRONOVA, S., TKACHENKO, V., FOMIN, O., GATCHENKO, V., MALIUK, S. Research on the safety factor against derailment of railway vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, 6(7-90), 19–25. ISSN 1729-3774.
- [5] EVSTRATOV, A. S. *Crews of diesel locomotives*. Moskva: Mashinostroenie, 1987.
- [6] KRAVCHENKO, K.O. *The grounds of increase backlogs of locomotive hauling qualities and its realization by the management of sliding in the system of wheel with a rail*. Luhansk: 2010. Ph.D. thesis. Volodymyr Dal East-Ukrainian National University.
- [7] FUFRYANSKY, N. A., DOLGANOV, A. N., NESTRAKHOV, A. S. *Development of locomotive traction*. 2nd ed. Moskva: Transport, 1988.
- [8] KONYAEV, A. N., SPIRYAGIN, I. K. Ways to improve the traction qualities of diesel locomotives 2TE10L. In: *Collected works "Locomotive building"*. 1971, 3, 19–24.
- [9] GORBUNOV, N. I., SLASHCHEV, V. A., TKACHENKO V. P. Investigation of the phenomenon of rail cleaning by locomotive wheels. *Design and manufacture of transport vehicles*. Luhansk: East Ukrainian national university. 1989, 21, 77–80.
- [10] MINOV, D. K. *Improving the traction properties of electric and diesel locomotives with electric transmission*. Moskva: Transport, 1965.
- [11] GOLUBENKO, O. L. *Coupling of a wheel with a rail*. Luhansk: Volodymyr Dal East Ukrainian national university, 1990.
- [12] ROSENFELD, V. E., ISAEV, V. P., SIDOROV, N. N. *The theory of electric traction*. Moskva: Transport, 1983.
- [13] KAMAEV, V. A. *Construction, calculation and design of locomotives*. Moskva: Mashinostrojenie, 1981.
- [14] SCHLUENEGGER, X. Using the adhesion coefficient. *World Railways*. 1990, 9, 15–21.
- [15] GOST 2582-81. *Rotating electrical machines for rail and road vehicles. General specifications*. Moskva: IPK Izdatel'stvo standartov, 1998.
- [16] FEDYAEV, V. N. *The influence of the electrical and mechanical subsystems of the mainline diesel locomotive on the implementation of the ultimate tractive effort*. Bryansk: Bryansk State Technical University, 2006.
- [17] OSTROVSKY, V. S. *The system of adaptive axle-based traction control of a single-phase-direct current electric locomotive*. Moscow, 1997. Ph.D. thesis. Moscow state university of means of communication.
- [18] NOVIKOV, V. M., LUTSENKO, A. A. Calculation of the traction load redistribution system when starting the locomotive 2TE116. *Bulletin of Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*. 2008, 5, Part 2, 46–52.