

Transport engineering and management  
Transporto inžinerija ir vadyba

GELEŽINKELIO KELIO GEOMETRINIŲ PARAMETRŲ DINAMIKOS  
TYRIMAS TAIKANT KELIO KOKYBĖS INDEKSA

Vytautas Motiejus BUBNELIS<sup>1</sup>, Benas SLEPAKOVAS<sup>2</sup>, Laura ČERNIAUSKAITĖ<sup>3</sup>,  
Henrikas SIVILEVIČIUS<sup>4,\*</sup>

<sup>1,2,4</sup> *Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva*

<sup>3</sup> *Vilniaus technologijų ir dizaino kolegija, Vilnius, Lietuva*

Gauta 2018 m. spalio 19 d.; priimta 2018 m. spalio 24 d.

**Santrauka.** Geležinkelių transportas, konkuruodamas su kitomis transporto rūšimis, privalo gerinti keleivių ir krovinių vežimo kokybę. Norint greitai, efektyviai ir saugiai vežti keleivius ir krovinius, būtina taip prižiūrėti geležinkelio kelius, kad jų geometrinių parametrų nuokrypiai neviršytų leidžiamųjų nuokrypių. Apie tikrąją geležinkelio kelio būklę duomenys gaunami kelmačiu išmatavus septynių geometrinių parametrų sklaidą. Šiame darbe pateikta geležinkelio kelio geometrinių parametrų sklaidos nustatymo ir vertinimo metodika, kurioje įrodyta, kad kelio kokybės indeksas (KKI) yra septynių geometrinių parametrų dispersijų suma. Eksperimentiškai ištyrus dviejų geležinkelio kelių A (8 km) ir B (11 km) trijų metų laikotarpiu (nuo 2015 iki 2017 metų) visų 12 mėnesių KKI, nustatyta jų kokybės dinamika (kaita bėgant laikui). Šie duomenys rodo, kad ištyrinėtų A ir B ruožų kelio kokybė buvo gera, bet dėl didėjančios pervežtų krovinių suminės masės (megatonų skaičiaus) turi tendenciją blogėti.

**Reikšminiai žodžiai:** geležinkelio kelias, geometriniai parametrai, sklaida, dispersija, nuokrypiai, kelio kokybės indeksas (KKI), eksperimento duomenys, dinamikos įvertinimas.

## Įvadas

Pastaruoju metu traukinių eismas vis intensyvesnis ir jų greitis turi tendenciją didėti geležinkelio transportui konkuruojant su kitomis transporto rūšimis. Traukiniai juda vis greičiau, o dėl šios siekiamybės reikalingas ir geresnės kokybės geležinkelio kelias. Griežtinant reikalavimus kelio kokybei, greitųjų traukinių geležinkelio keliai daug geriau prižiūrimi ir skiriama daugiau lėšų jų techninei priežiūrai. Lopez-Pita, Texeira, Casas, Bachiller ir Ferreira (2008), tyrinėdami greitųjų traukinių geležinkelio kelių infrastruktūros priežiūros išlaidas Europoje, nustatė, kad išlaidos prižiūrėti ir remontuoti 1 km tokių kelių gali siekti 55 % visų infrastruktūros eksploatacijos išlaidų. Tačiau kontaktiniam tinkui tenka tik 20 % išlaidų. Kim ir Ham (2013) konstatuoja, kad paskutiniu metu traukinių greitis tik didėja ir būtina tirti didėjančio greičio pasekmes. Nagrinėjamas traukinio, judančio didesniu negu 400 km/h greičiu, ratams tenkančios apkrovos. Tyrimų metu nustatyta, jog jėga, veikianti ratą, didėja kvadratine greičio didėjimo funkcija. Padidinus traukinių greitį, geležinkelio kelias taip pat apkraunamas kvadratine išraiška

didesnėmis jėgomis. Taip pat vertinama tai, jog reikalinga speciali priežiūra greitųjų traukinių geležinkelio keliams ir riedmenims. Ypatingas dėmesys skiriamas geležinkelio kelio nuokrypiams nustatyti. Barbosa (2016) aprašė naują modelį, skirtą geležinkelio kelio nuokrypiams ir saugumui. Sukurta inercinė matavimo sistema, pritaikyta tiek kelio kokybės indeksui (KKI) nustatyti, tiek kiekybiniam modeliui sudaryti. Reikalingus kaštus geležinkelio kelio priežiūrai ir jos optimizavimą tyrinėjo Arasteh khouhy, Larsson-Kräik, Nissen ir Kumar (2014). Pagal Švedijos šiaurės geležines rūdos geležinkelio kelio (Malmbanan), naudojamo keleiviams ir kroviniams vežti, geometrijos duomenis vertinama kiekvienos linijos degradacijos sparta. Caetano ir Texeira (2016) pagrindine geležinkelio kelio irties priežastimi laiko pervežtų krovinių bendrąją masę. Autoriai kelio būklę vertina pagal tiesinį prognozavimo modelį. Geriausios kokybės yra neeksploatuotas naujas geležinkelio kelias, kurį eksploatuojant geometriniai kiekybiniai parametrai blogėdami kinta. Siūlydami balasto pamušimą kaip efektyvų būdą geležinkelio kelio būklei gerinti, kartu vertina ir balasto pamušimo efektyvumą,

\*Autorius susirašinėti. El. paštas [henrikas.sivilevicius@vgtu.lt](mailto:henrikas.sivilevicius@vgtu.lt)

nekeičiant balasto skaldos sluoksnio nauja medžiaga. Balasto ilgalaikiškumą ir jo savybių kitimą tyrinėję Ramūnas, Vaitkus, Laurinavičius, Čygas ir Šiukščius (2017) nustatė, kad dalelių kokybės vertinimas pagal dinaminę ir statinę apkrovas parodo dalelių sluoksnių patvarumą ir kietumą. Šios jų savybės identifikuojamos pagal Los Andželo ir Devalio skaldos stiprumo rodiklių vertes. Geležinkelio kelio balasto ir pobalastinių sluoksnių tyrinėjo Navikas, Bulevičius ir Sivilevičius (2016, 2018). Jie nustatė granitinio balasto ir pobalastinio sluoksnio iš KG-1 mineralinių medžiagų mišinio homogeniškumą. Čia pateiktas naujas pobalastinio sluoksnio homogeniškumo nustatymo metodas ir eksperimentiškai gauti jo kokybės rodiklių skaitiniai įverčiai, rodantys, kad biriosios medžiagos dėl neišvengiamos segregacijos, transportuojamos iš gamyklos į tiesiamą geležinkelio kelio statybvieta, tampa nehomogeniškos, t. y. praranda pradinį tinkamą vienalytiškumą.

Praktikoje naudojami aštuoni geležinkelio kelio kokybės indeksai (Liu et al., 2015). Pasaulyje taikomi skirtingi būdai, kaip nustatyti geležinkelio kelio būklę (Setiawan ir Rosyidi 2016). Geležinkelio kelio kokybei nustatyti taikomi šie metodai: trumpojo nuotolio geležinkelio kelio prognozavimo modelis, tiesinis prognozavimo metodas ir pilkasis sistemos teorinis modelis. Pilkąjį prognozavimo modelį pateikė Xin, Famurewa, Gao, Kumar ir Zhang (2016), kurio siekis – nustatyti esamą geležinkelio būklę. Tam naudojamos Furjė eilutės ir Markovo grandinė, leidžiančios prognozuoti geležinkelio kelio būklę. Autoriai teigia, kad šis modelis yra tikslesnis už tiesinio prognozavimo modelius. Pavojingas nuokrypių ribas ir jų vertinimo strategiją tyrinėjo Andrade ir Teixeira (2016). Jie analizavo Portugalijos geležinkelio kelių kokybės vertinimo strategijas. Buvo pasiūlytas kiekybinis geležinkelio kelio vertinimo modelis, pagal kurį pirmiausia nustatomi geležinkelio kelio geometrijos nuokrypiai, kurie lyginami su leidžiamaisiais nuokrypiais. Jeigu viršijamos leidžiamosios ribos (tolerancijos), tada koreguojamas traukinių važiavimo greitis. Kelio kokybės indekso (KKI) vertinimo metodas taikomas nustatant esamą geležinkelio kelio būklę ir planuojant bėgių kelio techninės priežiūros darbus Kinijoje. Trumpojo kelio nuotolio (TKN) prognozavimo modelį aprašo Xu, Sun, Lui ir Wang (2010). Pasiūlytas naujas geležinkelio kelio būklės prognozavimo metodas, pavadintas (TKN) modeliu SRPM–TQI (angl. *Short Range Prediction Model for Track Quality index*). Pagal TKN geležinkelio kelio prognozavimo modelį dažniausiai geležinkelio kelias skirstomas į 200 m ilgio atkarpas ir kiekvienai atkarpai nustatomas KKI. KKI nustatymo tobulinimo modelį TAN–TQI pagal Bajeso teoremą pateikė Bai, Liu, Sun, Wang (2014). Anot autorių, gauti rezultatai buvo tikslesni, palyginus juos su SRPM–TQI modelio rezultatais, dėl skirtingo prognozavimo efektyvumo. Be to, šiame tyrime siūloma sistema gali būti išplėsta iki kelių charakteristikų blogėjimo modelių analizės geležinkelio kelio būklei prognozuoti. Nuo geležinkelio kelio kokybinių parametru priklauso kelionės kokybė. Visapusišką kelionės traukiniu kokybės indeksą (CQI) pasiūlė Maskeliūnaitė ir Sivilevi-

čius (2012), sistemiškai pateikė 4 grupių pagrindinius 49 kriterijus. Jie tyrinėjo traukinio elementų ir geležinkelio kelio techninę būklę (A kriterijų grupė), kelionės planavimą ir technologijas (B), kelionės kainą ir teikiamas paslaugas (C), taip pat kriterijus, susijusius su kelionės saugumu (D). Nustatyta, kad keleivių kelionės kokybė priklauso ne tik nuo vagono vidaus komforto įrenginių ir jų kokybės, bet ir nuo geležinkelio kelio KKI. Autoriai teigia, kad Xu et al. (2010) pateiktas trumpojo nuotolio kelio kokybės nustatymo modelis matematiškai yra nekorektiškas, nes, sumuojant standartinius nuokrypius, negaunamas bendrasis standartinis nuokrypis, skaitine reikšme lygus KKI. Todėl KKI yra kelmačiu išmatuotų septynių geometrinių parametru dispersijų sumos šaknis (Maskeliūnaitė ir Sivilevičius, 2014). Šiame darbe konstatuojama, kad matematiškai sumuoti standartinių nuokrypių negalima, o kelmačiu išmatuoto KKI skaitinė reikšmė turi dimensiją  $\text{mm}^2$ , nes ji yra dispersija.

Geležinkelio kelio kokybė vertinama kelio kokybės indeksu (KKI) pagal Lietuvos įmonės AB „Lietuvos geležinkeliai“ praktikoje naudojamą instrukciją (Savaeigio kelio matavimo..., 2012). Šioje instrukcijoje nurodyta, kad kas 25 cm matuojant kelmačiu (1 paveikslas) nustatomi ir sumuojami septyni geležinkelio kelių charakterizuojantys parametrai ir yra gaunamas bedimensis dydis.

Tyrimo tikslas: pateikti moksliai pagrįstą geležinkelio kelio kokybės nustatymo ir vertinimo metodiką, leidžiančią iš kelmačiu išmatuotų geometrinių parametru apskaičiuoti kelio kokybės indeksą KKI ir ištyrinėti šio indekso trejų metų atskirų mėnesių kitimo dinamiką.

## 1. Geležinkelio kelio kokybės vertinimas

Lietuvos geležinkelių kelių infrastruktūrą valdanti įmonė AB „Lietuvos geležinkeliai“ atlieka bėgių kelio priežiūros ir remonto darbus. Kas mėnesį atliekama kiekvieno geležinkelio kelio ruožo kontrolė, matuojant geležinkelio kelio geometrinių parametru nuokrypius savaeigiu kelio matavimo vagonu EM-140 (kelmačiu) (1 paveikslas). Kelmačio EM-140 pagrindiniai techniniai parametrai yra šie: masė – 74 t, važiavimo greitis 0–140 km/h, ilgis – 24 280 mm, plotis – 3100 mm, aukštis – 4250 mm.

Savaeigis geležinkelio kelio matavimo vagonas EM-140 skirtas geležinkelio kelio geometrinių parametru sklaidai (svyravimams, variacijoms) matuoti. Pagrindinis kelmačio EM-140 tikslas – patikrinti kelio geometrinių parametru atitiktį galiojančioms tolerancijoms (leidžiamiesiems nuokrypiais).

Kelmačio geometrinių parametru matavimo sistema susideda iš kelių matavimo sistemų: inercinės, dvigubos optinės ir navigacinės įrangos (2 paveikslas).

Visi kelmatyje esantys matavimo įrenginiai sumontuoti ant matavimo rėmo, kuris tvirtinamas prie kelmačio vežimėlio ašidėžių. Tokia konstrukcija užtikrina visų matavimo įrenginių lygiagretumą su bėgiais. Visi geometriniai kelio parametrai gaunami iš tiksliai išmatuotos kelio erdvinės kreivės (2 paveikslas). Kelmatyje sumontuota



1 paveikslas. Geležinkelio kelio kontrolės vagonas EM-140 (kelmačio) bendras vaizdas  
Figure 1. Track geometry recording car EM-140 general view

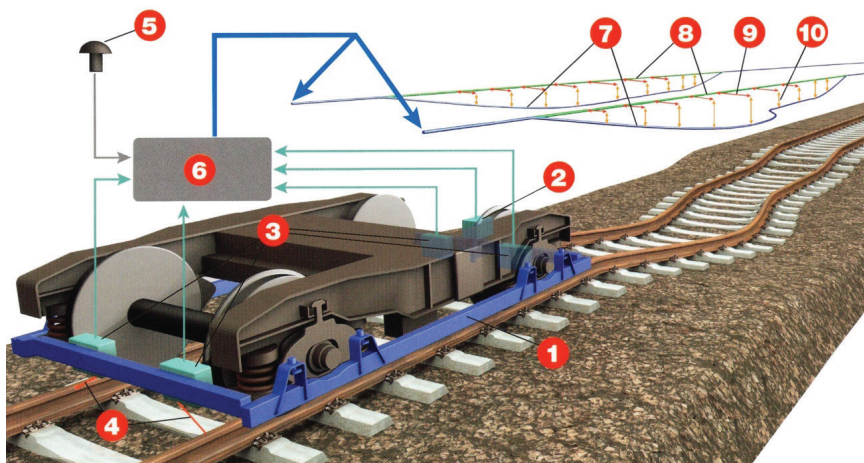
„Applanix POS TG“ precizinė matavimo įranga, skirta išilgai geležinkelio kelio geometriniams parametrams išmatuoti kas 25 cm. Matavimo sistemoje integruoti inerciniai jutikliai IMU (angl. *Inertial Measurement Unit*), globalinė padėties nustatymo sistema GPS (angl. *Global Positioning System*), optinė vėžės matavimo sistema OGMS (angl. *Optical Gauge Measurement System*). Ši sistema įvertina visų svyravimų kompensatorių duomenis, vibracijas ir nuokrypius. Skirtingi įrenginiai matuoja atskirus parametrus: OGMS (2 paveikslas, 4) lazerio spindulys matuoja plotį ir tiesinimą, IMU (2 paveikslas, 2) matuoja įdubų lygį ir perkrypas.

Geležinkelių valdytojo padaliniuose įdiegta kelmačio EM-140 duomenų peržiūros ir analizavimo programa leidžia darbuotojams, atliekantiems kelio priežiūrą, ir vadovybei realiuoju laiku matyti informaciją apie kelio nuokrypius, analizuoti jų pokyčius ir atsiradimo priežas-

tis, planuoti kapitalinius kelių remonto darbus tuose kelio ruožuose, kuriuose kelio būklė yra prasčiausia. Iš kelmačio EM-140 gaunama operatyvi informacija padeda atlikti kiekvieno mėnesio kelio būklės kitimo analizę. Pagal ją operatyviai vykdomi prevenciniai kelio priežiūros darbai, kurie leidžia užtikrinti traukinių saugų eismą ir išvengti traukinių važavimo greičių mažinimo dėl netinkamo geležinkelio kelio būklės.

Geležinkelio kelių charakterizuojantys ir lemiantys KKI reikšmės didumą yra šie septyni geometriniai parametrai: vėžės plotis, bėgių padėtis vienas kito atžvilgiu pagal galvutės lygį, kairiojo bėgio paviršiaus įdubos, dešiniojo bėgio paviršiaus įdubos, kairės pusės bėgio padėtis plane, dešinės pusės bėgio padėtis plane ir bėgių perkrypa. Kelmačiu matuojant taip pat užrašomi papildomi parametrai ir žymos: važavimo greitis, kilometras, piketas, infrastruktūros objektų žymos (iešmas, tiltas, tunelis, šviesoforas, pervaža). Kelmatis, pateikdamas rezultatus grafiškai (4 paveikslas), šiuos parametrų pavadinimus sutrumpina taip: plotis – vėžės plotis, IDK – kairiojo bėgio paviršiaus įdubos, IDD – dešiniojo bėgio paviršiaus įdubos, TIEK – kairės pusės bėgio padėtis plane, TIED – dešinės pusės bėgio padėtis plane, bėgių padėtis vienas kito atžvilgiu pagal galvutės lygį – lygis, PER – perkrypa.

Kelmačiu išmatuotas geležinkelio kelio vieno kilometro ilgio ruožas (3 paveikslas) duomenų lentelėje padalytas 200 metrų ilgio atkarpomis, kurioms kiekvienai atskirai yra pateiktos septynių geometrinių parametrų dispersijos ir visos atkarpos dispersijų suma (paskutiniame stulpelyje). Lentelės pabaigoje pateiktos viso 1 km ilgio ruožo atskirų geometrinių parametrų dispersijos ir bendroji dispersija, vadinama KKI.



2 paveikslas. Kelmačio EM-140 važiuoklės ir matavimo įrenginių elementai: 1 – matavimo rėmas su fiksuota lygiagrečia su bėgiais padėtimi; 2 – inercinė matavimo sistema (IMU); 3 – optinė geometrinių parametrų matavimo sistema; 4 – lazerio spindulys; 5 – navigacinės sistemos antena (GPS); 6 – navigacijos kompiuteris (GPS); 7 – abiejų bėgių erdvinė kreivė, gauta atlikus matavimus išilgai kelio ir suderinta su GPS duomenimis; 8 – projektinis kelio profilis; 9 – kelio nuokrypiai plane, gauti iš erdvinės kreivės; 10 – vertikalieji kelio nuokrypiai, gauti iš erdvinės kreivės

Figure 2. Track geometry recording car EM-140 chassis and measuring equipment elements: 1 – measuring frame with fixed parallel position by track; 2 – *Inertial Measurement System* (IMU); 3 – optical geometric measurement system; 4 – laser beam; 5 – navigation antenna (GPS); 6 – navigation computer (GPS); 7 – the two-track spatial curve obtained from measurements along the track and matched to GPS data; 8 – design track profile; 9 – track deviations in the plan, obtained from the spatial curve; 10 – vertical road deviations obtained from the spatial curve

Kelmačiui išmatavus tam tikrą geležinkelio kelio ruožą, duomenys pateikiami elektroninėje laikmenoje. KKI nustatymo algoritmas mums nežinomas ir negalime jo gauti dėl kelmačio gamintojo komercinės paslapties, yra pateiktos septynių geometrinių parametru dispersijos ir visos atkarpos dispersijų suma (paskutiniame stulpelyje), bet jis turi atitikti Lietuvos standartizacijos departamento standarto LST EN13848 visas dalis (2008, 2006, 2009, 2012, 2010). KKI nustatymo įranga pateikia tik bėgių geometrinių parametru kitimo grafikus (4 paveikslas) ir kiekvieno geometrinio parametro KKI skaitinį vertinimą (3 paveikslas). Gauta KKI eilutė su septyniais parametrais perkeliama į žiniaraštį elektroninėje pateiktyje. Iš šių septynių geometrinių parametru apskaičiuojamas KKI. Taip pat nustatoma atskirų geometrinių parametru atitiktis tolerancijos riboms (4 paveikslas), reikalingoms parenkant saugų traukinių judėjimo greitį.

Pirmą kartą (Maskeliūnaitė ir Sivilevičius, 2014) buvo moksliskai pagrįstas naujas požiūris, kad KKI skaitinė vertė atitinka septynių geometrinių parametru dispersijų sumą, bet ne standartinių nuokrypių sumą. Praktikoje kelio kokybės indeksas skaičiuojamas kiekvienai 200 metrų atkarpai, tačiau gali būti nustatomas įvairiems atkarpų ilgiams. Kelio kokybės indeksas gaunamas sumuojant kiekvieno geležinkelio kelio kilometro geometrinių parametru dispersijas pagal formulę:

$$KKI = \sigma_{Plotis}^2 + \sigma_{IDK}^2 + \sigma_{IDD}^2 + \sigma_{TIEK}^2 + \sigma_{TIED}^2 + \sigma_{Lygis}^2 + \sigma_{PER}^2, \quad (1)$$

čia KKI – kelio kokybės indeksas, t. y. visų geometrinių parametru dispersijų suma, mm<sup>2</sup>;  $\sigma_{Plotis}^2$  – vėžės pločio dispersija, mm<sup>2</sup>;  $\sigma_{IDK}^2$  – kairės pusės bėgio įdubos dispersija, mm<sup>2</sup>;  $\sigma_{IDD}^2$  – dešinės pusės bėgio įdubos dispersija, mm<sup>2</sup>;  $\sigma_{TIEK}^2$  – kairės pusės bėgio padėties plane dispersija, mm<sup>2</sup>;  $\sigma_{TIED}^2$  – dešinės pusės bėgio padėties plane dispersija, mm<sup>2</sup>;  $\sigma_{Lygis}^2$  – bėgių padėties vienas kito atžvilgiu pagal bėgių galvutės lygį dispersija, mm<sup>2</sup>;  $\sigma_{PER}^2$  – perkrypos dispersija, mm<sup>2</sup>.

Pagal šią formulę (1) kelmačiu išmatuotų geometrinių sklaidos įverčių suma vertinama KKI ir yra palyginama su tolerancijomis (1 lentelė). Atsižvelgiant į šį kelio būklės vertinimą priimami praktiniai geležinkelio kelio priežiūros sprendimai.

1 lentelė. Kokybinis kelio būklės įvertinimas kelio kokybės indeksu (Savaeigio kelio matavimo..., 2012)

Table 1. Qualitative railway condition assessment for the track quality index (Savaeigio kelio matavimo..., 2012)

Suminis KKI	Kelio apibūdinimas
0–20	Labai geras
21–34	Geras
35–44	Patenkinamas
≥45	Blogas

## 2. Kelmačiu išmatuotų tiriamųjų ruožų KKI duomenų apdorojimas

Suminis kelio kokybės indeksas skaičiuojamas kiekvieno kilometro ilgio atkarpai, sumuojant kiekvieno geležinkelio kelio geometrinio parametro sklaidos vertes (paskutinė 3 paveikslas eilutė). Prie kiekvieno kelio kilometre aptikto nuokrypio, dėl kurio sumažinamas nustatytas traukinių greitis arba traukinių eismas nutraukiamas, pridedami 45 KKI vienetai ir kilometras vertinamas kaip blogas. Suminis kelio kokybės indeksas, apibūdinantis vertinamos atkarpos kokybę nuo „Labai geras kelias“ iki „Blogas kelias“, gali kisti nuo 0 iki 45 ir daugiau (1 lentelė). Didesnis KKI skaičius rodo, kad kelias yra nestabilus ir jo geometrinių parametru kitimo amplitudė (sklaida) didelė. Tokie kelio ruožai įtraukiami į nestabilių kelių sąrašą ir vykdomi prevenciniai darbai. Vykdamas prevencinius geležinkelio kelio remonto darbus tam tikrose kelio atkarpose, gerinama viso kelio būklė, dėl kurių bendras viso kelio KKI mažėja. Tai leidžia pagerinti kelio kokybę neremontuojant viso kelio.

Tyrimo metu nustatyti dviejų pasirinktų geležinkelio kelio ruožų trejų metų, dvylikos mėnesių geometrinių parametru KKI (5 ir 6 paveikslai). Šiose diagramose pateikta geležinkelio kelio parametru būklės kitimo dinamika per trejus metus. Atlikę A kelio (8 km) ir B kelio (11 km) ruožų vertinimą nuo 2015 m. iki 2017 m. pabaigos, matome, kad A ir B ruožai yra geros būklės. KKI vidurkiai kinta nuo 21 iki 34 mm<sup>2</sup>. Tik kelis mėnesius kelio būklė buvo įvertinta patenkinamai. A kelio 2017 m. gegužės mėnesį užfiksuo-

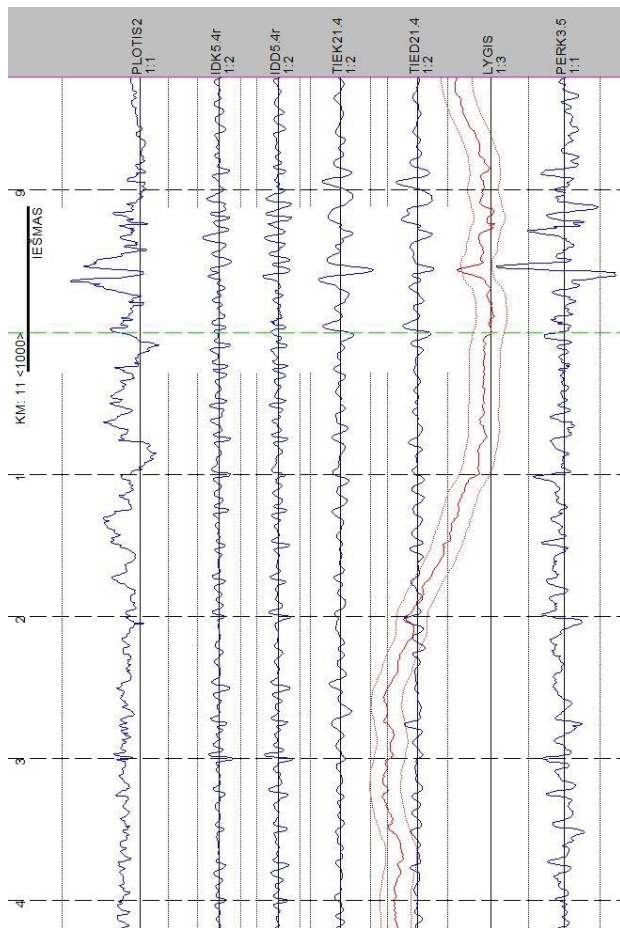
KKI (2.00)	Plotis	IDK	IDD	TIEK	TIED	LYGIS	PERK	VISO	
0	200	9.29	3.24	2.73	3.63	3.82	2.78	5.52	31.01
200	400	6.04	2.68	3.29	2.63	3.29	2.52	5.37	25.82
400	600	1.73	1.15	0.96	2.06	2.24	1.16	1.63	10.93
600	800	2.89	1.59	1.61	2.31	2.57	1.83	2.63	15.43
800	1000	2.52	1.41	1.63	2.48	1.97	1.26	1.88	13.15
355,0	356,0	8.08	2.17	2.21	2.68	2.86	2.02	4.47	24.49

3 paveikslas. Vieno kilometro ilgio geležinkelio kelio kas 200 m išmatuotų atkarpų visų septynių geometrinių parametru nuokrypių ir apskaičiuotų KKI reikšmių pavyzdys

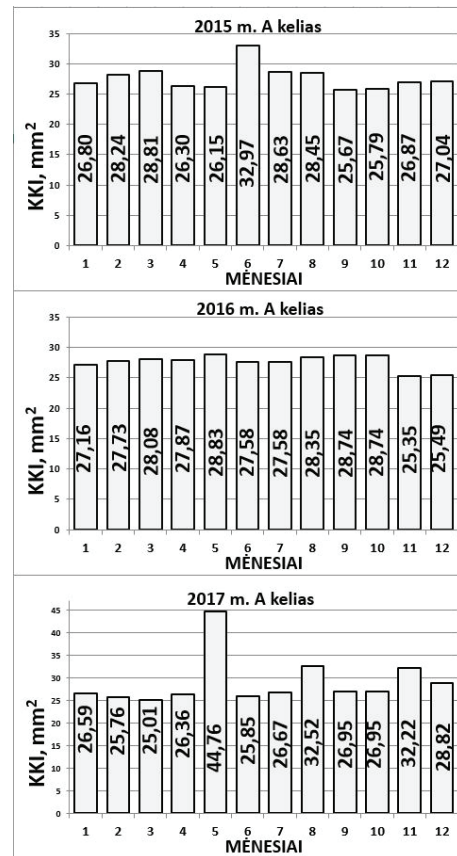
Figure 3. An example of the deviations of all 7 geometric parameters calculated values of the TQI for one kilometer long track, every 200 meters

tas arti ribinės reikšmės KKI, kai kelias įvertinamas kaip blogas, t. y.  $44,75 \text{ mm}^2$ , bet kitą mėnesį KKI reikšmė buvo užfiksuota  $25,85 \text{ mm}^2$ , todėl daroma prielaida, kad buvo atlikti kelio remonto darbai. Stulpelinėse diagramose (5, 6 paveikslai) matomos kai kuriais mėnesiais padidėjusios KKI vertės, tačiau kitą mėnesį – vėl sumažėjusios, todėl taip galima daryti prielaidą, kad buvo atlikti kelio būklės gerinimo darbai. Visais kitais mėnesiais kelio būklė išlieka stabili ir kelias įvertinamas kaip „geras“.

Kelmačiu išmatuoto geležinkelio kelio geometrinių parametrų grafinio vaizdo fragmente (4 paveikslas) parodyta septynių geležinkelio parametrų kiekvieno geometrinio parametro nulinė linija, t. y. idealaus kelio linija. Nuo jos į abi puses pagal kelio kategoriją atidedamos tolerancijų ribos, gavus išmatuotą kelio liniją, nustatoma kelio atitiktis tam tikrai kelio kategorijai. Kiekvienos kategorijos kelias turi skirtingas tolerancijos ribas. Jeigu matuojant nustatoma, kad kelio geometrijos nuokrypiai viršija tolerancijos ribas, mažinamas traukinių judėjimas iki tokios greičio ribos, kurio tolerancijos ribos neviršija gautų faktinių nuokrypių reikšmių. Kairėje pusėje nurodytas kelio pikeetas. Jeigu yra specifinių kelio statinių (iešmų, tiltų ar kitų statinių), jie taip pat pažymimi grafike.



4 paveikslas. Kelmačiu išmatuotas geležinkelio kelio geometrinių parametrų grafinio vaizdo fragmentas  
Figure 4. Geometric view fragment measured by Track geometry recording car



5 paveikslas. A geležinkelio kelio (8 km ilgio ruožo) 2015–2017 m. kiekvieną mėnesį apskaičiuoto vidutinio KKI reikšmės  
Figure 5. The average of the TQI values calculated for each month of the A track (8 km long) in 2015–2017

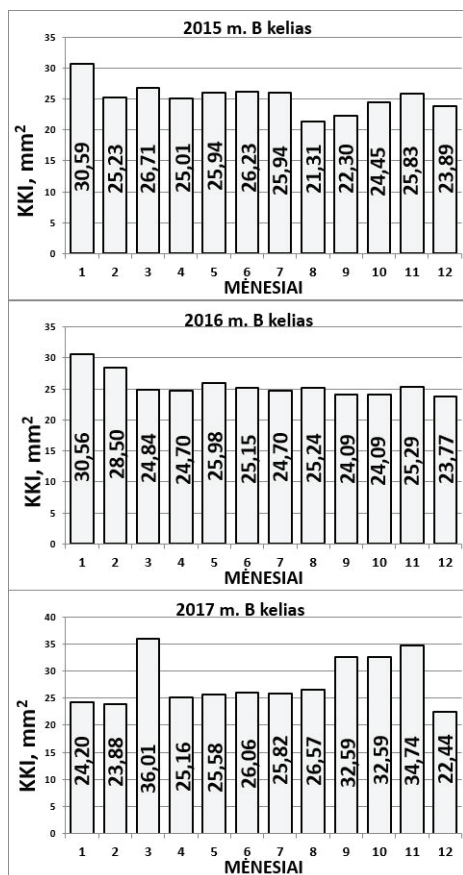
Vienų metų visų 12 mėnesių  $\overline{KKI}_{vid}$  vidutinė reikšmė skaičiuojama pagal (2) formulę:

$$\overline{KKI}_{vid} = \frac{\sum_{i=1}^{12} KKI_i}{12}, \quad (2)$$

čia  $KKI_i$  –  $i$ -tojo mėnesio kelmačiu išmatuotas geležinkelio kelio arba jo ruožo KKI,  $\text{mm}^2$ ;  $i$  – metų mėnesio numeris,  $i = 1, 2, \dots, 12$ .

Per tris mėnesius A kelio didžiausios KKI reikšmės buvo 5 ir 6 metų mėnesį. To priežastimi galėjo būti vėlyvo pavasario polaidžio poveikis, kai kelio konstrukcijoje ištirpusios ledo linzės ją susilpnino ir dėl to, tikėtina, išsikraipė ir bėgių kelias. B kelio ruože 2015 ir 2016 m. didžiausios KKI reikšmės buvo metų pradžioje, t. y. viduržiemį, o 2015 m. – kovo mėnesį ir rudenį (9, 10 ir 11 mėnesiais). To priežastimi galima taip pat laikyti kelio konstrukcijos hidrodinaminius pokyčius, kai ji atšyla pavasarį arba dėl lietingo rudens įmirksta. Šios būklės geležinkelio kelio konstrukcija yra silpniausia, dėl ko ji sparčiai deformuojasi ir padidėja bėgių kelio geometrinių parametrų nuokrypiai nuo reikiamų reikšmių.

Kad kelio būklė gerėtų ir nereikėtų mažinti traukinių važiuojimo greičių, būtina operatyviai vykdyti prevencinius kelio priežiūros darbus. Kelio būklės prastėjimas priklauso



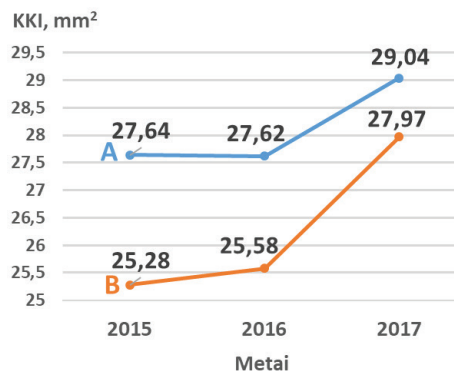
6 paveikslas. B geležinkelio kelio (11 km ilgio ruožo) 2015–2017 m. kiekvieną mėnesį apskaičiuoto vidutinio KKI reikšmės  
Figure 6. The average of the TQI values calculated for each month of the B track (11 km long) in 2015–2017

nuo eksploatacinės priežiūros darbų kokybės ir kelio degradacijos spartos. Jam įtakos turi vagonai su ratų pažeidimais, pervežtų tonų skaičius, meteorologinės sąlygos (Navikas ir Sivilevičius, 2017).

Palyginus dviejų kelių atkarpų KKI metinius vidurkius (7 paveikslas) pastebima, kad B tirtuo ruožo geometriniai parametrai buvo stabilesni: metinis  $KKI_{vid}$  kito nuo 25,28 mm<sup>2</sup> (2015 m.) iki 27,97 mm<sup>2</sup> (2017 m.). A kelio jis atitinkamai buvo 27,64 mm<sup>2</sup> ir 29,04 mm<sup>2</sup> (7 paveikslas).

## Išvados

1. Eksploatuojamo geležinkelio kelio geometrinių parametų nuokrypiai nuo leidžiamųjų reikšmių, rodančių kokybinę kelio būklę, nustatomi savaeigiu kelmačio vagonu, kas 25 cm važiavimo kryptimi matuojant septynis parametrus milimetrais. Lietuvoje naudojamas savaeigis EM-140 modelio kelmatis kiekvienai 200 m ilgio atkarpai, iš matavimo elektroninių ir grafinių signalų pagal viešai nepateiktą algoritmą leidžia nustatyti KKI, o kelias vertinamas pagal kiekvieno kilometro KKI, t. y. pagal 200 m gretimų atkarpų aritmetinį vidurkį.
2. Autoriai įrodė, kad KKI skaitinė reikšmė yra septynių geometrinių parametų sumos dispersija, o ne bedimensis dydis, kaip pateikta K/259 instrukcijoje, arba



7 paveikslas. A ir B geležinkelio kelių EM-140 kelmačiu išmatuotų metinių KKI kitimo dinamika  
Figure 7. A and B the railways roads measured by track geometry recording car EM-140, the yearly dynamics of the TQI

standartinis nuokrypis, kaip teigia kai kurie straipsnių autoriai.

3. Naudojant dviejų geležinkelio kelių 2015–2017 m. kiekvieną mėnesį kelmačiu išmatuotų bandomųjų ruožų KKI reikšmės nustatyta, kad abiejų ruožų (A ruožo 8 km ir B ruožo 11 km) geometrinių parametų nuokrypiai nuo leidžiamųjų verčių rodo gerą kelių būklę, tačiau ji turi tendenciją blogėti. Neatlikus reikiamų geležinkelio kelio geometrinių parametų atstatymo darbų arba juos atlikus nepakankama apimtimi, KKI kitimo dėl aplinkos orų sezoniskumo ir kelių vežtų krovinių suminės masės didėjimo, kelias spartėjančiai deformuojasi ir degraduoja. Siekiant didesnio saugaus ir komfortiško traukinių greičio, privalu stebėti KKI kitimo dinamiką, tam veiksmingiau naudojant kelmačio duomenis ir tobulinant geležinkelio kelių monitoringo sistemą.

## Literatūra

- Andrade, A. R., & Teixeira, P. F. (2016). Exploring different alert limit strategies in the maintenance of railway track geometry. *Journal of Transportation Engineering*, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000867](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000867)
- Arasteh khouhy, I., Larsson-Kräik, P., Nissen, A., & Kumar, U. (2014). Cost-effective track geometry maintenance limits. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(2), 611–622. <https://doi.org/10.1177/0954409714542859>
- Bai, L., Liu, R., Sun, Q., Wang, F., & Wang, F. (2014). Classification-learning-based framework for predicting railway track irregularities. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 230(2), 598–610. <https://doi.org/10.1177/0954409714552818>
- Barbosa, R. S. (2016). Evaluation of railway track safety with a new method for track quality identification. *Journal of Transport Engineering*, 142(11). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000855](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000855)
- Caetano, L. P., & Teixeira, P. F. (2016). Predictive maintenance model for ballast tamping. *Journal of Transportation Engineering*, 142(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000825](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000825)

- Kim, D. S., & Ham, S. (2013). Dynamic wheel loads of High-speed rail at speed greater than 400 km/h. *Transport Research Record*, 2374, 55-65. <https://doi.org/10.3141/2374-07>
- Liu, R.-K., Xu, P., Sun, Z.-Z., Zou, C., & Sun, Q.-X. (2015). Establishment of track quality index standard recommendations for Beijing metro. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015: Article ID473830 (9 p.).
- Lopez-Pita, A., Teixeira, P. F., Casas, C., Bachiller, A., & Ferreira, P. A. (2008). Maintenance cost of high-speed lines in Europe. *Transport Research Record*, 2043, 13-19. <https://doi.org/10.3141/2043-02>
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2008). *Geležinkelio taikmenys. Geležinkelio kelias. Geležinkelio kelio kokybė. 1 dalis. Geležinkelio kelio kokybės apibūdinimas (LST EN13848-1)* (25 p.). Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2006). *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 2 dalis. Matavimo sistemos. Kelmatės transporto priemonės (LST EN13848-2)* (26 p.). Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2009). *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 3 dalis. Matavimo sistemos. Geležinkelio kelio tiesimo ir techninės priežiūros mašinos (LST EN13848-3)* (25 p.). Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2012). *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 4 dalis. Matavimo sistemos. Rankiniai ir lengvieji įtaisai (LST EN13848-4)* (29 p.). Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2010). *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 5 dalis. Geometrinės kokybės lygmenys. Bėgių kelias (LST EN13848-5)* (22 p.). Vilnius.
- Lietuvos standartizacijos departamentas. (2006). *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 6 dalis. Geometrinės bėgių kelio kokybės apibūdinimas (LST EN13848-6)* (28 p.). Vilnius.
- Maskeliūnaitė, L., & Sivilevičius, H. (2012). Expert evaluation of criteria describing the quality of traveling by international passenger train: technological economic and safety perspectives. *Technological and Economic Development of Economy*, 18(3), 544-566. <https://doi.org/10.3846/20294913.2012.710178>
- Maskeliūnaitė, L., & Sivilevičius, H. (2014). The model for evaluating the criteria describing the quality of the trip by international train. *Technological and Economic Development of Economy*, 20(3), 484-506. <https://doi.org/10.3846/20294913.2014.949333>
- Navikas, D., Bulevičius, M., & Sivilevičius, H. (2016). Determination and evaluation of railway aggregate gradation and other properties variation. *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(5), 699-710. <https://doi.org/10.3846/13923730.2016.1177586>
- Navikas, D., Bulevičius, M., & Sivilevičius, H. (2018). Investigation and evaluation of railway ballast properties variation during technological processes. *Construction and Building Materials*, 185(10), 325-337. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.090>
- Navikas, D. ir Sivilevičius, H. (2017). Aplinkos oro neigiamos temperatūros įtakos geležinkelio konstrukcijos išalimo gyliui Lietuvoje modeliavimas. *Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania*, 9(5), 547-552. <https://doi.org/10.3846/mla.2017.1076>
- Ramūnas, V., Vaitkus, A., Laurinavičius, A., Čygas, D., & Šiuškšius, A. (2017). Prediction of lifespan of railway ballast aggregate according to mechanical properties of it. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 12(3), 203-209. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2017.25>
- Savaeigio kelio matavimo vagono EM-140 matuojamų geležinkelio kelio geometrinių parametrų įvertinimo instrukcija (K/259) (patvirtinta AB „Lietuvos geležinkeliai“ generalinio direktoriaus 2012 m. sausio 4 d. įsakymu Nr. Į-10). (2012). Vilnius: UAB „Geležinkelių produkcijos atitikties vertinimo centras“ (18 p.).
- Setiawan, M. D., & Rosyidi, S. A. P. (2016). Track quality index as track quality assessment indicator. *Symposium XIX FSTPT, Universitas Islam Indonesia* (pp. 11-13).
- Xin, T., Famurewa, S. M., Gao, L., Kumar, U., & Zhang, Q. (2016). Grey-system-theory-based model for the prediction of track geometry quality. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(7), 1735-1744. <https://doi.org/10.1177/0954409715610603>
- Xu, P., Sun, Q., Lui, R., & Wang, F. (2010). A short-range prediction model for track quality index. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 225(F), 277-285. <https://doi.org/10.1177/2041301710392477>

#### RAILWAYS GEOMETRICAL PARAMETERS DYNAMICS INVESTIGATION BY TRACK QUALITY INDEX

V. M. Bubnelis, B. Slepakovas, L. Černiauskaitė, H. Sivilevičius

#### Abstract

Rail transport, in competition with other modes of transport, has to improve the quality of passenger and freight transport. In order to carry passengers and goods quickly, efficiently and safely, it is necessary take maintenance railways so that their geometric parameters do not exceed the tolerances. About real railway track condition, the data is obtained by track geometry recording car, measuring seven geometric parameters dispersion. This paper presents the methodology for determining and estimating the geometric parameters of the track geometry, which shows that the track quality index (TQI) is the sum of the variance of seven geometric parameters. Experimental research on the two-track A (8 km) and B (11 km) a three-year period (2015-2017) for all 12-month KKI, establish their quality dynamics (change over time). These data indicate that the quality of the analyzed sections A and B was good, but due to the increasing mass (in megatons) of transported loads, there is a tendency to deteriorate.

**Keywords:** railway track, geometric parameters, dispersion, variance, deviations, track quality index (TQI), experimental data, dynamics evaluation.