



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Kornelija Stasiukynaitė

**GELEŽINKELIO KELIO BŪKLĖS MATAVIMO REALIUOJU LAIKU
TECHNOLOGIJŲ TYRIMAS**
**RESEARCH OF TECHNOLOGIES FOR REAL-TIME MEASUREMENT OF
RAILWAY TRACK CONDITION**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto mašinų ir įrenginių inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

(Vardas, pavardė)

(Data)

Kornelija Stasiukynaitė

**GELEŽINKELIO KELIO BŪKLĖS MATAVIMO REALIUOJU LAIKU
TECHNOLOGIJŲ TYRIMAS**
**RESEARCH OF TECHNOLOGIES FOR REAL-TIME MEASUREMENT OF
RAILWAY TRACK CONDITION**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto mašinų ir įrenginių inžinerijos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas

____prof. dr. Gintautas Bureika_____
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Lietuvių kalbos konsultantė

lekt. Angelika Petrėtienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

(Parašas)

(Data)

Vilnius, 2021

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto mašinų ir įrenginių specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Marijonas Bogdevičius
(Vardas, pavardė)
2019-12-20
(Data)

**BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS**

2019-12-09 Nr.
Vilnius

Studentei Kornelijai Stasiukynaitei
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Geležinkelio kelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų tyrimas,
patvirtinta 2019 m. gruodžio 02 d. dekanų potvarkiu Nr. 421ti.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 2021 m. gegužės 20 d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Geležinkelio kelio techninės būklės stebėsenos pažangių technologijų analizė. Problematikos, tyrimo tikslo ir uždavinių formulavimas. Bėgių vėžės geometrinių parametrų matavimo jutikliai ir sistemos. Ašidėžių, vežimėlių rėmų ir riedmens kėbulo pagreičių matavimas. Geležinkelio kelmačio „Plaser & Theurer» EM-140 funkcionalumo ypatumai. Kelio kokybės vertinimo rodiklis. Geležinkelio kelio geometrinių parametrų matavimo sistemų palyginamoji analizė. Daugiakriterinių metodų taikymas matavimo technologijoms vertinti. Technologijų vertinimo kriterijų parinkimas. Kiekybiniai ir kokybiniai kriterijai. Klausimyno apie vertinimo kriterijų svarbą sudarymas ir ekspertų apklausos atlikimas. Ekspertų nuomonės suderinamumo patikrinimas. Geležinkelio kelio geometrinių parametrų sistemų reitingavimas. Išvados ir rekomendacijos.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

doc. Angelika Petrėtienė
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas


(Parašas)

prof. dr. Gintautas Bureika
(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
.....
(Vardas, pavardė)
.....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei
gynimo organizavimo tvarkos aprašo
2 priedas

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Kornelija Stasiukynaitė, 20154634

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos

(Fakultetas)

TMIfm/19

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO (PROJEKTO)
SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

2021_ m. gegužės 13 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas (projektas) tema „Geležinkelio kelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų tyrimas“ patvirtintas 2019 m. gruodžio 2 d. dekanų potvarkiu Nr. 421ti, parašytas savarankiškai. Šiame darbe (projekte) pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Parenkant ir įvertinant medžiagą bei rengiant baigiamąjį darbą (projektą), mane konsultavo mokslininkai ir specialistai: Artūras Bernatoniš ir prof. habil. dr. Henrikas Sivilevičius.

Mano darbo (projekto) vadovas: prof. dr. Gintautas Bureka.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą (projektą) nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjusi.

(Parašas)

Kornelija Stasiukynaitė

(Vardas ir pavardė)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Transporto inžinerijos fakultetas

Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedra

ISBN

ISSN

Egz. sk..

Data 2021-05-15

Transporto inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Geležinkelio kelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų tyrimas**

Autorius **Kornelija Stasiukynaitė**

Vadovas prof. dr. **Gintautas Bureika**

Kalba

☒ X

lietuvių

Anotacija

Baigiamajame magistro darbe nagrinėjamos geležinkelio kelio būklės matavimo realiuoju laiku sistemos, jų privalumai ir trūkumai, šių technologijų būtinumas ir pritaikymas užsienio ir Lietuvos geležinkeliuose. Išnagrinėti technologijų veikimo principai, kurie yra svarbūs parenkant tinkamiausią. Pateikti svarbiausi technologijų veikimo principus ir kokybę apibūdinantys kriterijai. Apklausus ekspertus ir pritaikius Kendalo ir ARTIW rangų koreliacijos metodus, nustatyti svarbiausi technologijų tinkamumo vertinimo kriterijai. Pritaikius daugiakriterinių sprendimo priėmimo metodą, TOPSIS, buvo nustatyta tinkamiausia aprašyta sistema. Išnagrinėjus gautus duomenis suformuluotos išvados ir pateiktos rekomendacijos.

Darbą sudaro penkios dalys: Įvadas, geležinkelio kelio geometrinių parametrų matavimo pažangiųjų technologijų analizė, geležinkelio kelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų kriterijų suskirtymas pritaikius rangų koreliacijos metodus. Bendrosios išvados ir rekomendacijos, literatūra.

Darbo apimtis – 60 p. teksto be priedų, 30 pav., 19 lent., 28 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: geležinkelis, bėgių būklė, matavimo sistemos, rangų koreliacijos metodas, kelmatis EM-140, ARTIW, Kendal, tiesioginis balų metodas, TOPSIS.

Vilnius Gediminas Technical University

Transport engineering faculty

Mobile Machinery and Railway Transport department

ISBN

ISSN

Copies No.

Date 2021-05-15

Transport engineering study programme master thesis.

Title: **Research of technologies for real-time measurements of railway track condition**

Author **Kornelija Stasiukynaitė** Academic supervisor **Prof. Gintautas Bureika**

Thesis language

☒ X

Lithuanian

☐

Foreign (English)

Annotation

The Final Master's Thesis deals with real-time railway condition measurement systems, their advantages and disadvantages, the necessity and application of these technologies in foreign and Lithuanian Railways. The principles of technology operation, which are important in selecting the most appropriate one, are examined. The most important criteria describing the principles of operation and quality of technologies are presented. After interviewing experts and applying Kendal and ARTIW rank correlation methods, the most important criteria for assessing the suitability of technologies were identified. Using a multi-criteria decision-making approach, TOPSIS, the most appropriate system described was identified. After analyzing the obtained data, conclusions and recommendations were formulated.

Structure: Introduction, analysis of advanced technologies for measuring the geometrical parameters of the railway, the division of criteria for real-time measurement of the condition of the railway applied by the rank correlation method. General conclusions and recommendations, literature.

Thesis consist of: 60 p. text without appendixes, 30 figures, 19 tables, 28 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: railway, track condition, measurement systems, rank correlation method, track geometry car, ARTIW (Average Rank Transformation Into Weight), Kendal, direct score method.

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
LENTELIŲ SĄRAŠAS	10
SANTRUMPOS	11
ĮVADAS	12
1. GELEŽINKELIO KELIO GEOMETRINIŲ PARAMETRŲ MATAVIMO PAŽANGIŲJŲ TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ	14
1.1. Bėgių geometrinių parametrų matavimo metodai ir jutikliai	14
1.2. Kelio geometrijos parametrų matavimo technologijos	16
1.3. Bėgių kelio būklės įvertinimo stebėjimo sprendimai	19
1.3.1. Bėgių geometrijos matavimo sistema	20
1.3.2. Bėgio profilio susidevėjimo stebėsenos sistema	22
1.3.3. Riedmens dinaminė elgesena	22
1.3.4. Ratų ir bėgių sąlyčio jėgos	23
1.3.3.2. Ašidėžių, vežimėlių rėmų ir riedmens kėbulo pagreičių matavimas	25
1.3.5. Bėgių komplektiškumo neatitikimas standartui	25
1.3.6. Bėgių temperatūros matavimas	28
1.4. Geležinkelio kelio geometrijos matavimo mašinos „Plasser & Theurer“ EM-140 naudojimo technologiniai aspektai	28
1.4.1. Geležinkelio kelio geometrijos matavimo mašinos „Plasser & Theurer“ EM-140 funkcionalumo nagrinėjimas	28
1.4.2. Kelmačio EM-140 matavimo sistemos veikimas	29
1.4.3. Kelmačio matavimo sistemos funkcionalumas	33
1.4.4. Kelmačio matavimo sistemos technologiniai trūkumai	36
2. GELEŽINKELIŲ KELIO BŪKLĖS NUSTATYMO REALIUOJU LAIKU TECHNOLOGIJŲ VERTINIMAS	38
2.1. Daugiakriterinių sprendimų priėmimo metodų apžvalga	38
2.2. Kelio matavimo technologijų vertinimo kriterijų parinkimas	39
2.3. Geležinkelio kelio būklės realiuoju laiku technologijų kriterijų reikšmės	42
3. GELEŽINKELIO KELIO BŪKLĖS MATAVIMO REALIUOJU LAIKU TECHNOLOGIJŲ SVARBOS TYRIMAS	43
3.1. Ekspertų nuomonės suderinamumas	43
3.2. Ekspertų nuomonė apie kriterijų svarbą	51
3.3. Ekspertų nuomonių suderinamumas	54
3.4. Geležinkelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų analizė taikant TOPSIS metodą	56
3.5. Geležinkelio kelio matavimo sistemų reitingavimas	57

BENDROSIOŠ IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	63
LITERATŪRA	65
PRIEDAI	67
A priedas	67

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. „Mermec“ inercinė (viršutinė nuotrauka) ir optinė (apatinė nuotrauka) NGMS (Marmec, 2019).....	17
2 pav. Ilgalaikės lokaliai trasų būklės kitimo tendencijos (PER, 2016).....	18
3 pav. Bėgių geometrijos matavimo sistema. (http://www.mermecgroup.com/)	20
4 pav. Bėgio galvutės profilio taškai.....	20
5 pav. Trikampio (trianguliacijos) principas: 1 – lazeris; 2 – fotoaparatas; 3 – bėgiai.....	21
6 pav. Bėgių geometrijos sistemos kalibravimas	21
7 pav. Bėgio sąlyčio jėgos (Iwnicki et al. 2009).....	23
8 pav. Galima deformacijų matuoklių padėtis (Bracciali et al., 2014)	24
10 pav. Akcelerometras ant ašies dėžių (įvorės), vežimėlio rėmo ir transporto priemonės kėbulo..	25
12 pav. Bėgio paviršiaus pažaidos	26
13 pav. Pažeista bėgių jungtis	27
14 pav. Trūksta pabėgio varžto	27
15 pav. Bėgio trūkis	27
16 pav. Bendras kelmačio vaizdas (www.cargonews.lt).....	28
17 pav. Kelmačio duomenų siuntimo į navigacinį kompiuterį schema. 1 – kompiuteris; 2 – inerciniai jutikliai; 3 – optiniai jutikliai.....	29
18 pav. Kelmačio navigacinės sistemos schema.....	30
19 pav. Matavimo įrenginių išdėstymas ant vežimėlio rėmo.....	30
20 pav. Kelmačio EM-140 važiuoklės ir matavimo įrenginių elementai	31
21 pav. IMU lazerių išdėstymas bėgių atžvilgiu.....	32
22 pav. Geležinkelio tunelių ir kitų statinių lazerinis skeneris: 1 – lazerinis skeneris; 2 – sistemos duomenų pateikimo langas.	32
23 pav. Fragmentas gautas iš lazerinio jutiklio surinktų duomenų programos dėl gabarito atstumo nuo kelio statinių	33
24 pav. Kelmačio bėgių kelio geometrinių parametrų grafinis vaizdavimas (K/259, 2012)	34
25 pav. Detalus kelio kokybės vertinimo pavyzdys:	35
26 pav. Blizgus bėgio paviršius	37
28 pav. Ekspertų nuomonės apie geležinkelio kelio būklės matavimo sistemas realiuoju laiku, vidutinių rangų Rj apskaičiuotųjų verčių stulpelinė diagrama	49
29 pav. Normalizuoti kriterijų svarbumai (svoriai).....	50
30 pav. Kriterijams skirtų balų suma	53

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Geležinkelio kelio geometrijos matavimo įtaisų, skirtų dinaminiams bėgio poslinkiams nustatyti, privalumai ir trūkumai	15
2 lentelė. Geležinkelio kelio geometrijos matavimo įtaisų, skirtų rato temperatūrai ir rato smūgiui į bėgius matuoti, privalumai ir trūkumai	15
3 lentelė. Geležinkelio kelio geometrijos lazerinių atstumo matavimo sistemų privalumai ir trūkumai	16
4 lentelė. Kelio būklės stebėjimo pagerinimui sukurtos technologijos	19
5 lentelė. Kokybino geležinkelio kelio būklės įvertinimo duomenys kelio kokybės indeksu KKI, (K/259, 2012)	35
6 lentelė. Daugiakriterinių (daugiatikslių) sprendimo priėmimo metodų klasifikacija (Šilgailis, 2017)	38
7 lentelė. Geležinkelių kelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų lyginamųjų kriterijai	39
8 lentelė. Geležinkelių kelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų kriterijų reikšmės	42
9 lentelė. Ekspertų nuomonių rangai R_{ij}	46
10 lentelė. Kiekvieno kriterijaus svarbumo rodiklio Q_j , reikšmės	50
<u>11 lentelė. Geležinkelio kelio būklės matavimo sistemų realiuoju laiku kriterijams priskirti balai</u>	52
12 lentelė. Sistemų dydžiai	57
13 lentelė. Sistemų sunaudojamos energijos kiekiai	58
14 lentelė. Sistemų patavarumo rodikliai	58
15 lentelė. Sistemomis atliktų matavimų duomenų tikslumas	59
16 lentelė. Sistemų techninis suderinamumas	59
17 lentelė. Sistemų matavimo duomenų pasikartojamumas	60
18 lentelė. Apibendrinti matavimo technologijos vertinimo duomenys	60
19 lentelė. Apskaičiuoti sistemų vertinimai, normalizuotos reikšmės	61

SANTRUMPOS

ARTIW – vidutinė reitingo transformacija į svorį (angl. *Average Rank Transformation Into Weight*);

DIC – skaitmeninio vaizdo koreliacija, (angl. *digital image correlation*);

GPS – pasaulinės padėties nustatymo sistema, (angl. *Global Positioning System*);

GSM-R – visuotinė ryšio sistema - geležinkeliai, (angl. *Global System for Mobile Communications – Railway*);

IDD – dešiniojo bėgio paviršiaus vertikaliosios įdubos;

IDK – kairiojo bėgio paviršiaus vertikaliosios įdubos;

IF – AB „Lietuvos geležinkelių infrastruktūra“;

IMU – inerciniai jutikliai, (angl. *Inertial Measurement Unit*);

KKI – kelio kokybės indekso;

LED – šviesos diodas, (angl. *Light - emitting diode*);

LTG – AB „Lietuvos geležinkeliai“;

MDD – įvairių gylių deflektometrai, (angl. *Multi-depth-deflectometers*);

NGMS – neprižiūrima geometrijos matavimo sistema;

OGMS – optinė vėžės matavimo sistema, (angl. *Optical Gauge Measurement System*);

PER – vėžės perkrypa;

PSD – lazerių sistemos su padėties jutikliais, (angl. *Position Sensitive Devices*);

RTP – registravimo transporto priemonė;

TIED – dešinės pusės bėgio padėtis plane;

TIEK – kairės pusės bėgio padėtis plane;

ToF – skrydžio laikas, (angl. *Time of flight*)

TVRV – traukiamas vėže registravimo vagonas.

IVADAS

Geležinkelių transportas – tai sausumos transporto rūšis, pasižyminti didele krovinių vežimo apimtimi, saugumu bei maža aplinkos tarša, palyginus su kelių transportu. Pastaruoju metu ši transporto rūšis tampa vis aktualesnė ir Lietuvoje, ir visame pasaulyje.

Lietuvoje ir užsienio valstybėse geležinkelių transportas užima stiprias pozijas šalių sausumos transporto sektoriuje. Pažymėtina, jog didžiąją dalį AB „Lietuvos geležinkeliai“ (toliau – LTG) vežimų sudaro kroviniai, o Vakarų Europos šalių geležinkeliuose vyrauja keleivinis susisiekimas. Geležinkeliais Europoje kasdien keliauja milijonai keleivių ir vežama didžiuliai kiekiai krovinių. Pagal Lietuvos statistikos departamento pateiktus duomenis 2020 m. vien Lietuvos geležinkeliais vežta 53 429,7 tūkstančiai tonų krovinių. Norint užtikrinti saugumą ir komfortiškumą, būtina nuolatos stebėti ir prižiūrėti geležinkelio infrastruktūros techninę būklę. Esamos geležinkelio kelio (infrastuktūros) stebėjimo sistemos pasaulyje yra nuolatos tobulinamos, plečiamas jų funkcionalumas. Kiekvienos šalies geležinkelio infrastruktūros valdytojai įsidedia sau tinkamiausias geležinkelio kelio priežiūros sistemas, kurios pritaikomos pagal šalies geležinkelio infrastruktūros specifiką. Esant dideliame technologijų pasirinkimui, valdytojams sudėtinga išsirinkti jiems tinkamą modelį arba sistemų derinį. Šią problemą galėtų pašalinti arba sumažinti sukurta Viešosios prieigos duomenų bazė, kurioje būtų susisteminami naujų geležinkelio kelio techninės diagnostikos ir stebėsenos realiuoju laiku technologijų funkcionalumo parametrai. Taip pat naudingas būtų visuotinai priimtas šių technologijų lyginamojo vertinimo matematinis įrankis.

Taigi, atsižvelgiant į pasaulines tendencijas pagrindinė problematika nagrinėjama šiame darbe – geležinkelio kelio vėžės pažaidų aptikimas laiku, siekiant išvengti traukinių eismo trikdžių arba eismo įvykių, t. y. riedmenų nuvažiavimo nuo bėgių. Baigiamojo magistro darbo tyrimo objektas – geležinkelio kelio vėžės geometrinių parametrų bekontakčių matavimų technologijos ir įrenginiai (įtaisai), o šio tyrimo tikslas yra pasiūlyti matematinį algoritmą tinkamiausiai (racionaliausiai) geležinkelio kelio vėžės geometrinių parametrų matavimo realiuoju laiku technologijai parinkti.

Iškelti uždaviniai, skirti tyrimo tikslui pasiekti:

1. Išanalizuoti mokslinės literatūros šaltinius apie geležinkelio infrastuktūros techninės būklės stebėsenos pasaulinę patirtį.
2. Išnagrinėti ir palyginti užsienyje naudojamas geležinkelio vėžės geometrinių parametrų matavimo technologijas.
3. Išnagrinėti LTG eksploatuojamo vėžės matavimo mašinos „Plasser & Theurer“ EM-140 konstrukciją ir nustatyti funkcionalumo ypatumus.
4. Pateikti kelių geležinkelio vėžės matavimo technologijų lyginamuosius parametrus.

5. Suformuluoti geležinkelio vėžės matavimo įrangos vertinimo algoritmą (kriterijus) ir išrinkti tinkamiausią matavimo įrangos veiksmingumo vertinimo metodiką.
6. Nustatyti matavimo įrangos palyginamojo vertinimo kriterijus ir sudaryti klausimyną (anketą) ekspertams. Atlikti apklausą internetu.
7. Susisteminti gautus ekspertų apklausos duomenis, pritaikyti rangų koreliacijos metodus ir apdoroti rezultatus.

1. GELEŽINKELIO KELIO GEOMETRINIŲ PARAMETRŲ MATAVIMO PAŽANGIŲJŲ TECHNOLOGIJŲ ANALIZĖ

Geležinkelio kelio viršutinės konstrukcijos geometrinių parametrų nuolatinė stebėseną naudojant eksploatuojamus traukinius vis labiau domina geležinkelių infrastruktūros operatorius arba valdytojus ir geležinkelio darbuotojus. Išsistinis kelio stebėjimas yra geriausias būdas nustatyti kelio ir ratų riedėjimo paviršiaus geometrijos būklę einamuoju metu, dėl ryšio tarp riedmens važiuoklės reakcijos (vertikalaus ašidėžių pagreičio) ir kelio vertikaliųjų pažaidų. Labai svarbu, jog kritinės pažaidos nustatomos laiku. Taip išvengiama eismo įvykių, iš traukinių atkabinami didžiulį triukšmą važiuojant keliantys riedmenys su pažeistais ratais. Taip pat nagrinėjami kiti išmatuoti bėgių kelio geometrijos parametrai, tokie kaip kelio kreivės, bėgių susisukimas arba vėžės skersinis išlyginimas, kurie taip pat yra būtini norint užtikrinti reikiamą priežiūrą ir eismo saugumą, planuoti kelio remonto darbus. Pažymėtina, rinkoje yra ir neprižiūrimų matavimo realiuoju laiku sistemų, kurios įdiegtos eksploatuojamuose traukiniuose. Šios sistemos matuoja visus bėgių parametrus traukiniams dirbant linijose, tačiau šiose sistemose naudojamos brangios inercinės platformos (pvz., „Velaro“ Rusijos arba „Mermec“ Jungtinės Karalystės sistemose).

1.1. Bėgių geometrinių parametrų matavimo metodai ir jutikliai

Literatūroje aprašomi šie pažangūs pagrindiniai jutikliai ir įtaisai, skirti nustatyti bėgių geometrijos kitimą bėgant laikui:

- 1) akcelerometrai;
- 2) geofonai;
- 3) geležinkelio bėgių vaizdo kamera, po kurios atliekama vaizdų skaitmeninė analizė (skaitmeninio vaizdo koreliacija, DIC (angl. *digital image correlation*);
- 4) lazerių sistemos su padėties jutikliais PSD (angl. *Position Sensitive Devices*), sumontuotais ant pabėgių / bėgių, kad aptiktų lazerio padėtį;
- 5) įvairių gylių deflektometrai MDD (angl. *multi-depth-deflectometers*).

Išvardytų pagrindinių geležinkelio kelio geometrijos matavimo įtaisų skirtų dinaminiam bėgio poslinkiui nustatyti privalumai ir trūkumai pateikiami 1 lentelėje.

Prie bėgio pritvirtintos optinės sistemos taip pat gali būti naudojamos aptikti bėgio lūžius arba gali būti naudojamos kaip deformacijų jutikliai, kurie matuoja jėgas rato ir bėgio sąveikos metu.

1 lentelė. Geležinkelio kelio geometrijos matavimo įtaisų, skirtų dinaminiam bėgio poslinkiams nustatyti, privalumai ir trūkumai

Prietaisai	Sistemos privalumai	Sistemos trūkumai
Geofonas	a. paprasta įdiegti b. reikia tik vieno integravimo ir filtravimo etapo	a. gaunamų signalų apdorojimas reikalauja įgūdžių
Akcelerometras	a. mikroelektriniai mechaniniai įtaisai yra nebrangūs b. paprasta įdiegti c. reikia dviejų integracijos ir filtravimo etapų	a. gaunamų signalų apdorojimas reikalauja įgūdžių
Vaizdo kamera (skaitmeninio vaizdo koreliacija, DIC)	a. galima naudoti prie visų leidžiamų traukinio greičių b. yra patikimesnis už giroskopą ir geofoną prie mažesnio greičio	a. jautri vibracijos, kurias sukelia vėjas ar pan. (priklausomai nuo kameros padėties). Visgi, tai pataisoma b. matymo spektras ar matomumas, gali būti problematiškas
Lazerių sistema	a. galima naudoti prie visų leidžiamų traukinio greičių b. yra patikimesnis už giroskopą ir geofoną prie mažesnio greičio	a. jautri vibracijos, kurias sukelia vėjas ar pan. (priklausomai nuo kameros padėties). Visgi, tai pataisoma b. matymo spektras ar matomumas, gali būti problematiškas
Įvairių gylių deflektometrai	a. gauti parametrai bus be jokios paklaidos	a. sudėtingas įdiegimas b. reikalingas fiksuotas nulinis gylis

Geležinkelio kelio geometrijos matavimo įtaisų, skirtų riedmenų ratų temperatūrai ir rato smūgiui į bėgius matuoti, privalumai ir trūkumai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Geležinkelio kelio geometrijos matavimo įtaisų, skirtų rato temperatūrai ir rato smūgiui į bėgius matuoti, privalumai ir trūkumai

Įtaisai	Sistemos privalumai	Sistemos trūkumai
Elektriniai deformacijų matuokliai	a. gaunamų duomenų tikslumas nepriklauso nuo traukinio greičio b. maža kaina	a. deformacijų matuokliai nėra stabilūs laiko atžvilgiu b. gaunamų duomenų apdorojimas reikalauja įgūdžių
Optinio pluošto matuokliai	absolūtus matavimas, nes laikui bėgant yra stabilūs	a. deformacija priklauso nuo temperatūros b. aukšta kaina
Mikrofonas	lengva įdiegti	a. duomenis reikia filtruoti ir atlikti spektrines analizes b. signalo apdorojimas reikalauja įgūdžių ir atsargumo c. priklausomybė nuo traukinio greičio

Bėgio profilį ir gabaritus galima išmatuoti lazerinėmis kameromis, sumontuotomis ant pravažiuojančių transporto priemonių. Ant bėgių įrengti atstumo jutikliai, kad būtų galima stebėti matuoklius. Dažniausi atstumo jutikliai yra lazeriniai.

Bėgio profilio ir gabaritų lazerinių sistemų privalumai ir trūkumai pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Geležinkelio kelio geometrijos lazerinių atstumo matavimo sistemų privalumai ir trūkumai

Sistema	Privalumai	Trūkumai
Lazerio profilio matavimai	a. galima įsigyti keletą komercinių ratų profilių sistemų b. keletas komercinių įterptųjų sistemų profiliams matuoti	a. jautrus aplinkos poveikiui (lietus, purvas, dulkės, sniegas ir pan.) b. išmatuoti bėgio profilį galima tik trumpomis atkarpomis c. atstumas ir sumontavimas už trasos neduos gerų rezultatų. Automatiškai judantis lazerinis skaitytuvas į trasos zoną greičiausiai nepateks
Artumo jutiklis	a. sukurta ir patikima technologija b. didelis tikslumas nedideliais atstumais	a. paprastai išmatuoja tik tam tikrą atstumą b. apribotas atstumą
Atstumo jutiklio lazeris	a. gali išmatuoti visus atstumus b. itin tikslūs rezultatai	a. matuoja vieną tašką

Iš 3 lentelės, galima daryti išvadas, kad nėra paprasta išskirti vieną optimalią (tinkamiausią) sistemą.

1.2. Kelio geometrijos parametrų matavimo technologijos

Infrastruktūros valdytojai paprastai naudoja specialią registravimo transporto priemonę (toliau tekste – RTP) arba traukiamą vėžę registravimo vagoną (toliau – TVRV). RTP/TVRV naudojimas kelio geometrijos matavimui atitinka standarto LST EN 13848 visas 6 dalis. LST EN 13848 standartuose aprašyti keli aspektai, susiję su bėgių geometrijos ir matavimo prietaisų apibūdinimais, įskaitant jų matavimo metodus.

Aprašomi šie bėgių geometrijos parametrai:

- 1) vėžės plotis;
- 2) išilginis lygis;
- 3) skersinis lygis;
- 4) išlyginimas.

Šiuos parametrus galima išmatuoti naudojant arba inercinę sistemą, arba variklinę sistemą. Pastarasis ir yra RTP/TVRV matavimo principas. Pastaraisiais metais geležinkelio infrastruktūros valdytojai bando eksploatuoti neprižiūrimas kelio geometrijos matavimo sistemas (toliau – NGMS). Pavyzdžiui, kompanija „Mermec“, kuri įsikūrusi Italijoje, tiekia inercinio ir optinio NGMS, jos skirtos išmatuoti visus kelio geometrinius parametrus ir visus bėgio profilius traukiniui važiuojant dideliu greičiu (pateikta 1 pav.).

NGMS yra kompaktiška ir lengva, todėl ją galima įdiegti ant eksploatuojamų transporto priemonių. „London Underground“ buvo pirmasis pasaulyje metro, kuris 2012 metais pristatė tokią matavimo technologiją, skirtą stebėti 408 km ilgio trasai.



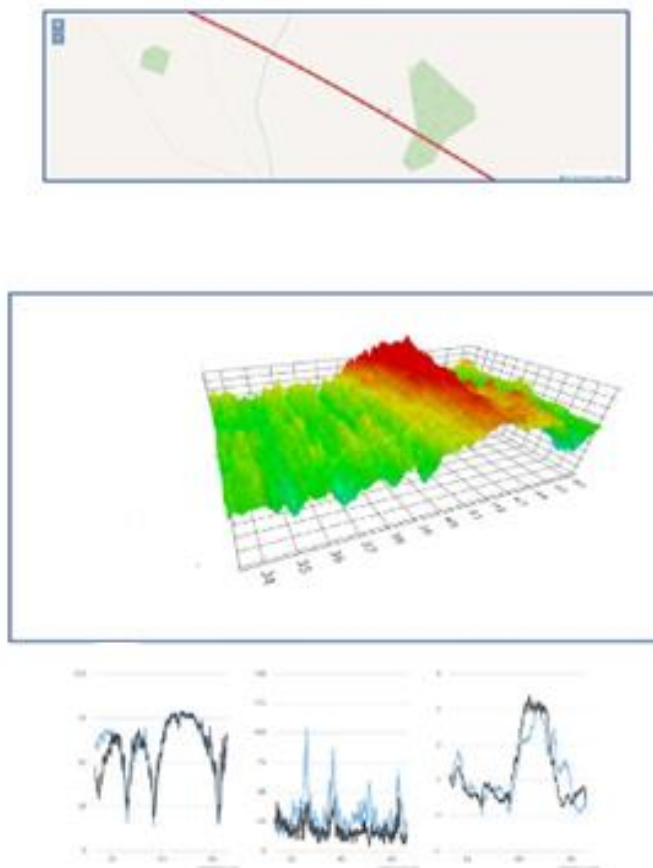
1 pav. „Mermec“ inercinė (viršutinė nuotrauka) ir optinė (apatinė nuotrauka) NGMS (Marmec, 2019)

Stebėseną siekiama kelio geometrijos parametrų palaikymo ir vietinių bėgių geometrijos nuokrypių nustatymo. Tai tikrinimo/matavimo sistemos ir atlieka. Nepaisant didelių NGMS poreikių norint jas įdiegti eksploatuojamose transporto priemonėse, buvo sukurtos kelios būklės stebėjimo sistemos. Jos nesuteikia išsamios geometrijos parametrų analizės duomenų, kurie naudojami infrastruktūros valdytojų, taip pat ir moksliniams, ir eksperimentiniams tyrimams atlikti.

Pagreičio matavimas yra su išankstiniais duomenų apdorojimo būdais. Tai populiariausias pasirinkimas dėl akcelorometrų tvirtumo. Palyginimui, optiniai jutikliai, tokie kaip lazeriniai, fotoaparato pagrindu ir kt. turi būti reguliariai nuvalomi, kad jie veiktų, todėl jiems reikia specialios

priežiūros, kad nešvarumai nepatektų ant eksploatuojamos transporto priemonės arba matavimo sistemų. Įtaisų tvirtumas yra pats svarbiausias sistemos bruožas, kuris taikomas eksploatuojamų riedmenų važiuoklėse, nes stebėjimo sistema neturėtų sukelti papildomų techninių priežiūrų arba turėti įtakos pačios transporto priemonės patikimumui ir prieinamumui (Skrickij et al. 2021).

Jei nereikia rekonstruoti bėgių geometrijos parametrų, tie rodikliai gali apibrėžti bėgių geometrijos kokybę. Pavyzdžiui, standarte EN 13848-1: 2020 rekomenduojama apskaičiuoti ir išanalizuoti ašidežės pagreičio vidutines ir (arba) didžiausias ir didžiausios vertes tam tikrame dažnių diapazone, kurios yra sujungtos su dinaminėmis rato ir bėgio jėgomis bei atskirais defektais. Standartinis nuokrypis per nurodytą atstumą ir nurodytas dažnių diapazonas gali būti naudojamos trumposios geometrinės bangos ir gali įvertinti bėgio vientisumo pažaidas. Vežimėlio ir važiuoklės pagrečiai taip pat gali būti naudojami pavienėms pažaidoms aptikti palyginant amplitudę nuo vidutinės vertės iki didžiausios vertės arba nuo nulio iki smailės vertės. Vienas iš geriausių komercinių programų pavyzdžių - „Perpetuum“, tai belaidis jutiklinis tinklas išmatuojantis ašidežės pagreitį ir nustato specialius bėgių būklės rodiklius (2 pav.). Remiantis tuo, kad rodiklis viršija sukalibruotą slenkstį, valdytojai gali būti informuoti apie tam tikrą kelio sekciją, kurią reikia prižiūrėti.



2 pav. Ilgalaikės lokalsios trasų būklės kitimo tendencijos (PER, 2016)

Jei reikia rekonstruoti bėgių geometrijos parametrus, reikalingas specialus duomenų tvarkymas ir apdorojimas. Išilginio ir vertikalaus bėgio profilio išmatuotus parametrus galima gauti

dvigubai integruojant vertikalius pagreičius. Kalbant apie tikslumą, tai tikriausiai geriausiai matuojama per vežimėlio ašidežės pagreitį ir vertikalius ašidežės poslinkius nuo akcelerometro, nepaisant, kad poslinkio keitikliai labiau pažeidžiami ir brangesni nei akcelerometrai. Vengiant poslinkio keitiklių, ašidėžėje įmontuojami pagreičio matuokliai, kurie kartu su paskirtu signalu gali būti naudojami, kaip perskaičiavimo transformavimo ir panašiais būdais.

Norint įvertinti bėgių skersinio išlyginimo matavimus, naudojamas atvirkštinis dinamikos modelis, skirtas vežimėlio skersiniam judėjimui ant bėgio apskaičiuoti, pagal vežimėlio pasukimo dažnio giroskopinius duomenis arba skersinius pagreičio duomenis, kad būtų galima gauti maždaug 35 m ir 70 m ilgio bėgių kelio išlyginimą. Vis dėlto šis metodas nėra paprastas ir bėgių kelio išlyginimo negalima išmatuoti esant mažam bangos ilgiui (nuo 3 m iki 35 m).

1.3. Bėgių kelio būklės įvertinimo stebėjimo sprendimai

Bėgių būklės stebėjimas yra būtinas, jis užtikrina geležinkelių eksploatavimo saugumą. Šiais laikais Infrastruktūros valdytojai naudoja diagnostines transporto priemones kaip zondus, siekiant analizuoti kelio būklę ir aptikti potencialias problemas realiuoju laiku, jų ankstyvoje stadijoje. Šios diagnostinės veiklos tikslas yra tobulinti priežiūros strategijas, taip pat sumažinti infrastruktūros valdymo sąnaudas.

Pagrindinės ruožo būklės stebėjimo technologijų parametrai apibendrinti 4 lentelėje.

4 lentelė. Kelio būklės stebėjimo pagerinimui sukurtos technologijos

Kelio būklės matavimo kriterijai	Parametrai	Technologija
Bėgių geometrija	a. bėgio profilio geometrija b. pagreičiai	a. optinis / lazerinis profilometras b. inercinis matavimo vienetis
Nusidėvėjimo stebėjimas	a. bėgio profilio geometrija b. bėgio paviršius c. lygiavertis kūgiškumas	a. optinis / lazerinis profilometras b. vaizdo kamera
Sklandaus riedmens judėjimo sutrikimai arba dinaminė elgsena	a. pagreičiai (ašidežės, aširačio, vežimėliai ir transporto priemonės kėbulas) b. ratų ir bėgių sąlyčio jėgos (bėgio deformacija, aširačio deformacija)	a. elektros įtampos matuoklis b. akcelerometras
Bėgių vėžės komplektiškumo ir vientisumo neatitikmenys	a. trūkstami pabėgių, sujungimų, tvirtinimo elementai. b. bėgio trūkiai ir lūžiai	a. vaizdo kamera
Bėgių temperatūra	a. temperatūra	a. šiluminis zondas b. šilumą matuojanti kamera

4 lentelėje pateikti privalumai ir trūkumai leidžia pasirinkti tą sistemą, kuri bus tinkamiausia atitinkamai infrastruktūros naudojimo modeliui ir turi mažiau trūkumų.

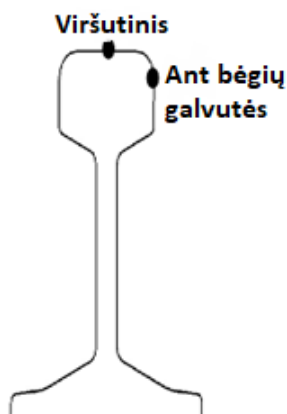
1.3.1. Bėgių geometrijos matavimo sistema

Bėgių kelio geometrijos sistema pagrįstos bekontakčiu optiniu / inerciniu būdu (3 pav.). Optiniai jutikliai naudojami bėgio profiliui ir bėgio vietai matuoti, o inerciniai įtaisai pateikti tiesinį ir kampinį pagreičius. Optinių ir inercinių duomenų derinys leidžia nustatyti reikiamus bėgių geometrinius parametrus (vėžės, pasvirimo, skersinio, posūkio, išlyginimo).



3 pav. Bėgių geometrijos matavimo sistema. („Marmec“ interneto svetainė)

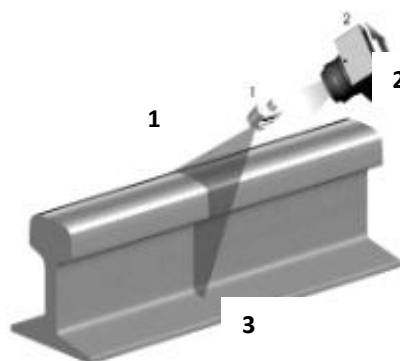
Optiniai matavimai grindžiami technika, kai bėgio galvutės profilyje nustatomi taškai, kurie vadinami „viršutinis“ ir „ant bėgio galvutės“ (žr. 4 pav.), tai naudinga įvertinant geometrinius parametrus.



4 pav. Bėgio galvutės profilio taškai

Skaičiavimas atliekamas naudojant „trikampio“ principą, pagrįstą lazeriu ir greitaigė kamera (5 pav.) be jokio mechaninio sąlyčio su bėgiu. Kiekviena kamera yra kartu su specialiu didelio

selektyvumo optiniu filtru, nustatytu pagal specifinį lazerio spinduliavimo dažnį: tai padaro sistemą apsaugotą nuo saulės ar kitų šviesos šaltinių trikdžių, leisdami sistemai veikti bet kokioje šviesoje.

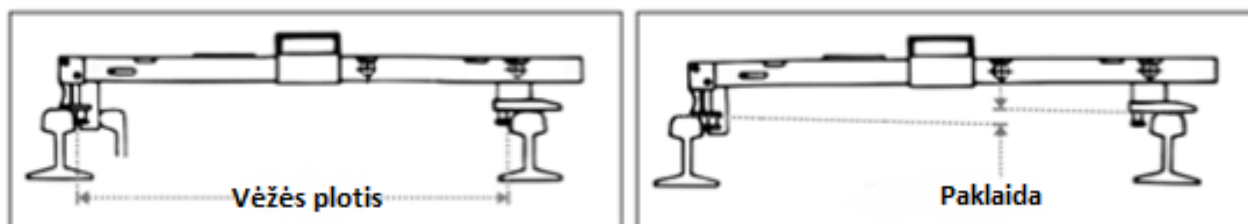


5 pav. Trikampio (trianguliacijos) principas: 1 – lazeris; 2 – fotoaparatas; 3 – bėgiai

Iš optinių jutiklių ir inercinio bloko gauta informacija nurodo bendrą koordinačių sistemą. Optiniai jutikliai leidžia išmatuoti atstumą tarp optinių dėžių ir takelio, o inerciniai jutikliai leidžia nustatyti optinių grupių padėtį realioje erdvėje. Sistema yra taip pat su inklinometru. Tokiu būdu galima gauti bėgių kelio geometrinius išmatavimus atsižvelgiant į absoliučią atskaitos sistemą, transporto priemonės judesių kompensavimas atsižvelgiant į aširačių riedėjimą.

Paprastai bėgių geometrijos sistemą sudaro mažiausiai dvi optinės dėžės (lazeris + kamera) ir inercinis blokas. Sistema sumontuota ant vežimėlio šalia ašių. Kaip minėta pirmiau, bėgių kelio parametrai kyla iš duomenų, susijusių su optinės dėžės ir inercinio bloko, deriniu. Vykdydami kūrimo procesą, fotoaparato gauti vaizdai paverčiami milimetrais, tada taškai „viršuje“ ir „ant bėgio galvutės“ apskaičiuojamas gabaritas (paprastai nustatomas 14 mm žemiau riedėjimo plokštumos). Šie taškai sudaro pagrindą bėgių parametrų apskaičiuoti.

Europos bėgių kelio matavimo sistemų standartas yra EN 13848-2 (2021). Šis Europos standartas EN 13848-2 patikslina mažiausius reikalavimus matavimo principams ir sistemoms, norint gauti palyginamus rezultatus. Tai taikoma visai matavimo įrangai, sumontuotai specialiose geležinkelio vėžės parametrų registravimo transporto priemonėse arba specialiai transporto priemonėse modifikuotas tuo pačiu tikslu.



6 pav. Bėgių geometrijos sistemos kalibravimas

Taisyklingas sistemos kalibravimas yra labai svarbus norint gauti tikslių ir patikimų matavimo duomenis. Inercinis įtaisas paprastai kalibruojamas gamykloje, kai optinės dėžės yra pritvirtintos prie vežimėlio. Optinės dėžės turi būti kalibruojamos iš naujo, jeigu sistema numontuojama nuo transporto priemonės arba esant sistemos trikdžiams, arba gedimams. Optinis kalibravimas taip pat atliekamas naudojant rankinę atramą, kad būtų patikrinta poslinkio matuoklio ir nuolydžio paklaida (6 pav.).

1.3.2. Bėgio profilio susidėvėjimo stebėsenos sistema

Bėgio profilio susidėvėjimo stebėsenos sistemoje naudojami matavimai yra bėgio profilio geometrijos ir bėgio galvutės paviršius, užfiksuoti fotoaparatais ir lazeriais. Stebimi bėgių kelio parametrai yra vertikalūs, horizontalūs ir 45° kampų bėgio profilio susidėvėjimo, bėgio bangavimas. Paprastai – nusidėvėjimo stebėjimo sistemą apima dvi optinės dėžutės (lazeris + kamera), kurios yra sumontuotos po matavimo riedmeniu.

Bėgių geometrijai matuoti taikomas trikampio nustatymo principas taip pat naudojamas ir bėgių dilimui nustatyti. Atitinkamą apdorojimą sudaro kiekvieno įgyto bėgio profilio sutapimas su etaloniniu bėgio ruožu, kad būtų galima nustatyti bėgio galvutės polinkį ir nusidėvėjimą, visa tai atliekama su kameros gautais vaizdais.

Operatoriai rankiniu būdu gali apibrėžti bėgio pagrindo profilį arba automatiškai atpažinti jį pagal bėgių profilių duomenų bazę. Didžiausias tikslumas pasiekiamas nustatant bėgio profilį yra tada, kai geras matomumas nuo bėgio galvutės iki bėgio pado. Kai bėgio padas nematomas (pvz., dėl balasto), susidėvėjimą apskaičiuoti vis dar įmanoma, tik jei matomas bėgių tinklas (jei ši sąlyga neįmanoma, sudevėjimo įvertinti neįmanoma).

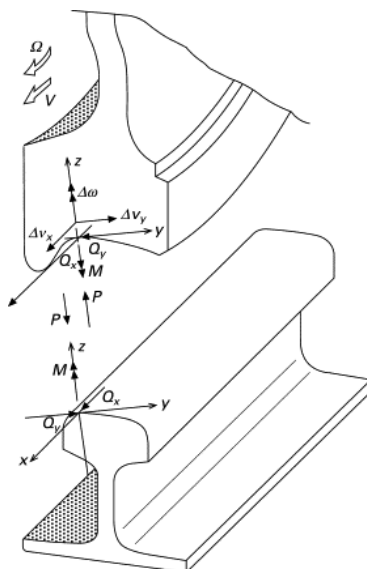
Kalibravimo procesas yra toks pat kaip bėgių geometrijos sistemos optinių dėžių. Kalibruojama kaskart esant sistemoms trikdžiams arba gedimams ir nuėmus nuo vežimėlio.

1.3.3. Riedmens dinaminė elgsena

Riedmens dinaminė elgsena vertinama važiavimo charakteristikomis, kurios sudaromos matuojant ašidėžių, vežimėlių rėmo ir riedmens kėbulo pagreičius bei rato su bėgio sąlyčio (sąveikos) jėgas. Pagreičių dydis yra tiesiogiai susijęs su bėgių geometrija, bėgių susidėvėjimo laipsniu ir kt. Sąlyčio jėgos stebimos pradedant nuo ratų, aširačių ir bėgių deformacijų matavimo. Borto sprendimui sistema naudoja elektrinius deformacijų matuoklius, montuojamus ant ratų arba aširačių.

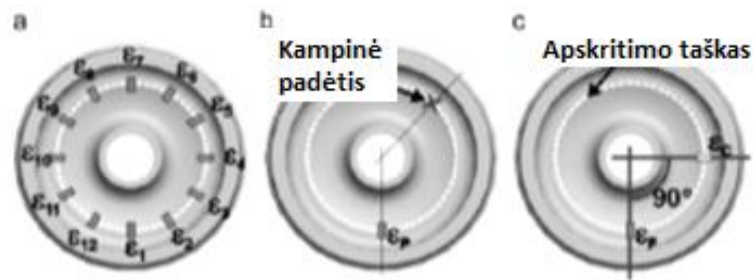
1.3.4. Ratų ir bėgių sąlyčio jėgos

Rato ir bėgio sąveikos sistema pagrįsta rato disko įtempių matavimu naudojant elektrinius deformacijų matuoklius. Iš tikrųjų rato diskas yra jautrus atsirandančiai jėgai, veikiančiai rato ir bėgio sąlyčio zoną. Dėl šio metodo sistema gali tiesiogiai išmatuoti skersinės jėgos Y ir vertikaliosios jėgos Q dydį, Tuo tarpu netiesiogiai gali nustatyti riedmens nuvažiavimo nuo bėgių sąlygas apibūdinantį santykį Y/Q , skersinių jėgų ΣY ir sąlyčio taško atstumą d (7 pav.). Sistemos kalibravimas atliekamas baigtinių elementų metodu, o laboratoriniai tyrimai skirti įvertinti proporcingumui tarp jėgų ir deformacijų koeficientų.



7 pav. Bėgio sąlyčio jėgos (Iwnicki et al. 2009)

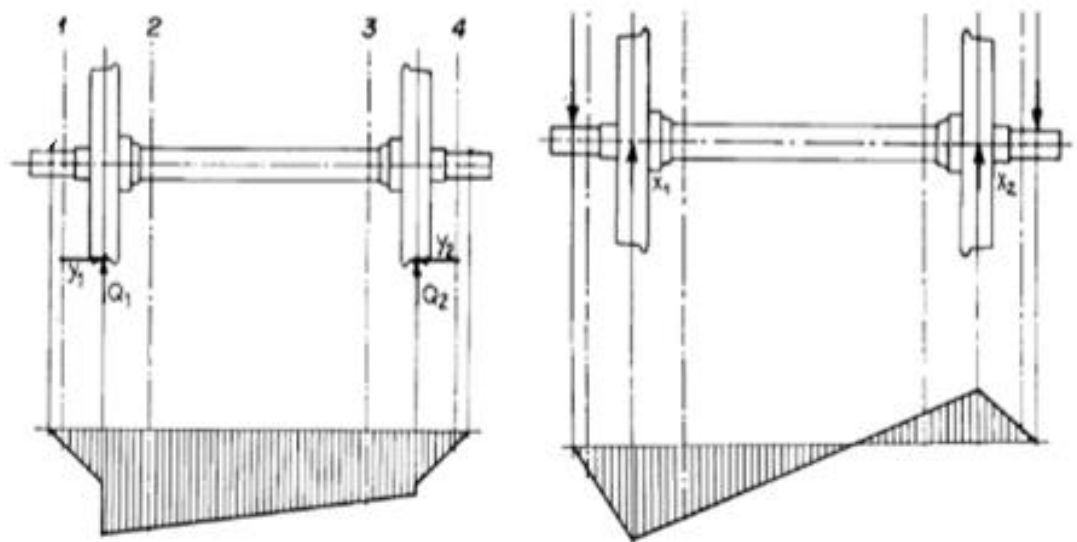
Norint visiškai apibrėžti matavimo grandinę, reikia pasirinkti radialinius ir kampinius deformacijų matuoklių montavimo vietas. Nors radialinės padėties pasirinkimas leidžia išmatuoti sąlyčio jėgą, tinkamas kampinės padėties parinkimas yra tikslingas, siekiant kiek įmanoma sumažinti rato sukimosi pobūdžio įtaką pagal gaunamus signalus. Yra įvairių strategijų, kuriomis siekiama nustatyti radialinę deformacijų matuoklių padėtį (8 pav.).



8 pav. Galima deformacijų matuoklių padėtis (Bracciali et al., 2014)

Kiti sprendimai yra pagrįsti vežimėlio ašies įtempių dydžiu. Sumontuota ašis – elektriniai deformacijų matuokliai, skirti signalui, koreliuojančiam su ašies sukuriama deformacijos būseną, sąlyčio jėgoms. Tokiu būdu galima išmatuoti tris sąlyčio jėgos komponentus: skersinę jėgą Y , vertikali jėgą Q ir išilginę jėgą X .

Užrašant tiesinius ryšius, susiejančius veikiančias jėgas ir lenkimo momentus įvertintimos vertikaliosios, skersinės ir išilginės jėgos, pradedant nuo ašių išmatuotų deformacijų (9 pav.).



9 pav. Lenkimo įtempių diagramos vertikaliajoje (kairėje) ir horizontalioje (dešinėje) plokštumose (Bracciali et al., 2014)

Deformacija dėl sukimo gali būti naudojama tik X išilginėms jėgoms apskaičiuoti. Deformacijai nuo lenkimo gali būti naudojamos X , Y ir Q jėgos. Tai reiškia, kad įmanoma nustatyti koeficientus ašies pusiausvyros lygtyse. Sistemos inversija lygtyse aprašo veikiančias jėgas.

Sistema paprastai kalibruojama laboratorijoje, norint nustatyti įtempio ir deformacijos koeficientų proporcingumą.

Metodai pagrįsti ašies matavimo priemonėmis, turi daug „klaidų šaltinių“. Daugiausia klaidų yra dėl rato bėgio kontakto padėties pasikeitimo, nes masės tarp kontakto sukelia poveikį inercijos

taškams. Įtakos turi ir ašies tvirtinimo įtempių rodikliai. Ašies sukimasis sukelia signalus, kurių amplitudė moduluojama vien tik sinusoidiniu būdu, ašies sukimosi atžvilgiu.

1.3.3.2. Ašidėžių, vežimėlių rėmų ir riedmens kėbulo pagreičių matavimas

Ašidėžių, vežimėlių rėmų ir riedmens kėbulo pagreičius matuoja: klasikinis vienašis arba daugiaašis akcelerometras (10 pav.). Paprastai kiekvienas akcelerometras kalibruojamas, specifiniu matavimo diapazonu, kad būtų užtikrintas pastovus tikslumas visoje dažnių amplitudėje. Pavyzdžiui, vežimėlių pagreičio pagreičių dažnis yra didesnis, nei transporto priemonės kėbulo, kuris yra izoliuotas nuo bėgio tiesioginio poveikio dėl pirminės ir antrinės pakabos slopinimo. Paprastai duomenys imami laiko tarpais tam tikrais dažniais ($\sim 2\text{kHz}$).



10 pav. Akcelerometras ant ašies dėžių (įvorės), vežimėlio rėmo ir transporto priemonės kėbulo

Ašidėžės įvorėje užfiksuoti pagrečiai yra skirti stebėti nuokrypius, nes jos neturi jokio pakabos slopinimo. Nuokrypos yra per tam tikrą laiką atsirandančios pažaidos, turinčios labai trumpą paviršių bangos ilgį (sujungimų pažaidos, išlyginimo nuokrypos ir kt.). Šie pagrečiai gali būti naudojami norint įvertinti transporto priemonių važiuoklių ir kėbulų virpesius.

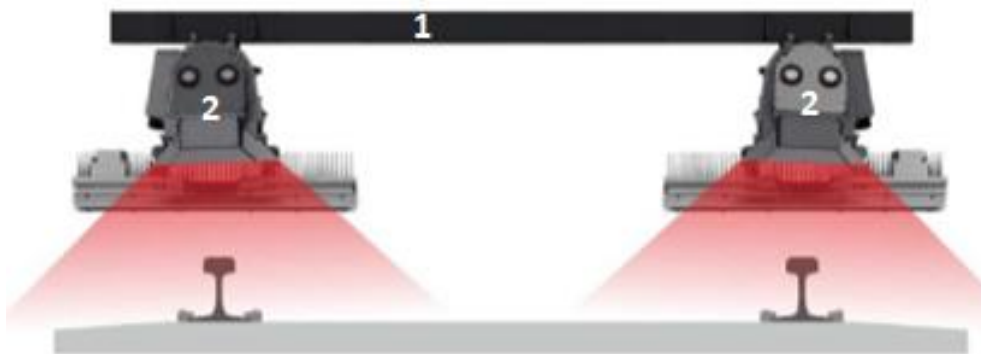
Ant vežimėlių užfiksuotas pagreitis yra tiesiogiai susijęs su pirminiu pakabos slopinimu. Informacija, gauta nustatant šiuos pagreičius, yra susijusi su važiavimo sauga, dėl trumpo bangos ilgio pažaidų identifikavimo.

1.3.5. Bėgių komplektiškumo neatitikimas standartui

Bėgių sveikumo (komplektiškumo) neatitikimu automatiškai nustatomas vaizdo stebėjimo sistema. Tarp skirtingos informacijos sistema gali atpažinti bėgių pažaidas arba neatitikimus (pvz.,

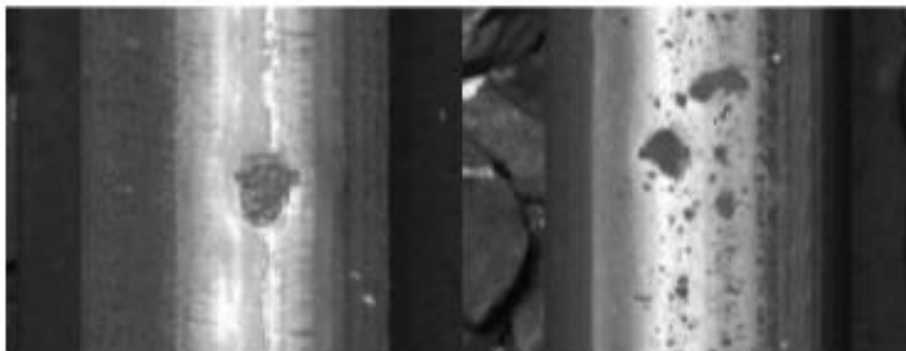
trūksta tvirtinimo, pabėgių). Taip pat geba nustatyti sujungimų būklę, įtrūkius, įbrėžius. Sistema yra pagrįsta specialiais algoritmais, galinčiais apdoroti gautus vaizdus.

Sistemą sudaro keli posistemiai, sumontuoti ant vežimėlio. Kiekvienas posistemis turi specialią paskirtį: stebėti riedėjimą plokštumą, bėgio vientisumą ir bėgių elementus. Sistemą sudaro dvi optinės dėžės, kuoms sudaro fotoparatas ir infraraudonųjų spindulių LED (angl. *Light – emitting diode*) šviestuvai, sumontuoti po riedmens kėbulu (11 pav.).



11 pav. Optinės dėžės: 1 – kėbulas; 2 – optinės dėžės. („Marmec“ interneto svetainė)

Pagrindinis sistemos tikslas automatiškai atpažinti tokius neatitikimus, kaip bėgių paviršiaus pažaidas, sulaužytas jungtis. Nustatyti trūkstamus varžtus, tvirtinimo elementus, taip pat įtrūkius, pašalinių medžiagų arba objektų patekimą ant bėgių ir kt. (12–15 pav.).



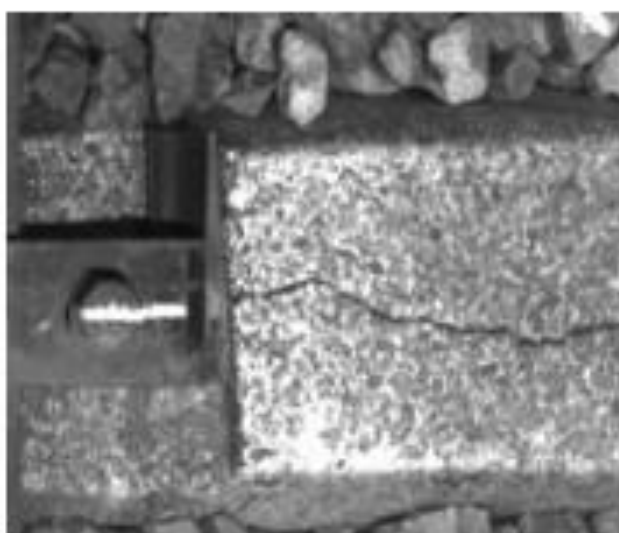
12 pav. Bėgio paviršiaus pažaidos



13 pav. Pažeista bėgių jungtis



14 pav. Trūksta pabėgio varžto



15 pav. Bėgio trūkis

Anksčiau pateiktose nuotraukose pateikti defektai užfiksuoti su optiniais jutikliais. Galima pastebėti, kad vaizdas aiškus ir ryškus, todėl galima konkrečiai nustatyti bėgio pažaidas.

1.3.6. Bėgių temperatūros matavimas

Bėgių temperatūros sistema nuolat matuoja bėgių kelio temperatūrą tam tikruose geležinkelio kelio taškuose. Sistema naudoja šiluminius zondus, sumontuotus bėgio tinklo viduje, arba šilumines kameras, kurios pritvirtintos prie riedmenų.

1.4. Geležinkelio kelio geometrijos matavimo mašinos „Plasser & Theurer“ EM-140 naudojimo technologiniai aspektai

1.4.1. Geležinkelio kelio geometrijos matavimo mašinos „Plasser & Theurer“ EM-140 funkcionalumo nagrinėjimas

Vilniuje 2011 m. pristatyta LTG įsigyta savaeigė kelio geometrijos matavimo mašina EM140 (toliau – kelmatis). Tai yra vienas pažangiausių geležinkelių infrastruktūros būklės stebėjimui naudojamų įrenginių, leidžiančių lazeriniu būdu operatyviai išmatuoti geometrinius bėgių vėžės parametrus ir įvertinti kelio techninę būklę. Kelmačio EM-140 pagrindiniai techniniai parametrai: masė yra 74 t, važiavimo greitis iki 140 km/h, ilgis – 24 280 mm, plotis – 3 100 mm ir aukštis – 4 250 mm. Matavimo greitis iki 70 km/h.

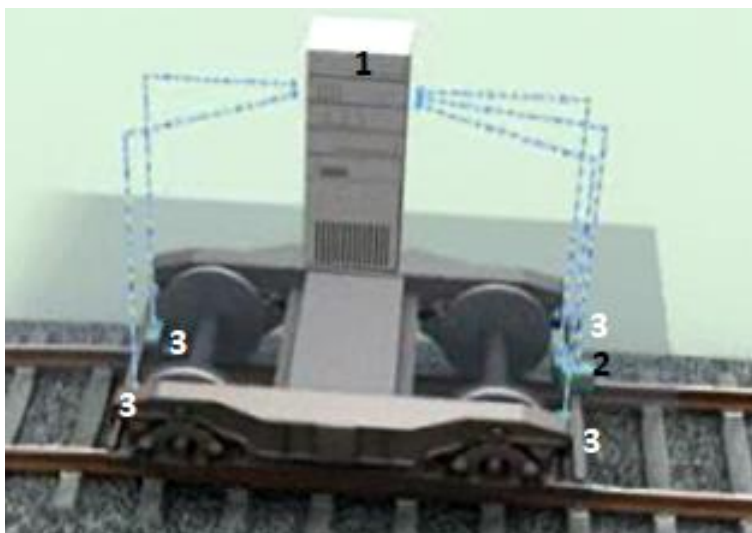


16 pav. Bendras kelmačio vaizdas („Transporto pasaulis“ interneto svetainė)

AB „LTG Infra“ (toliau – LTGI) prižiūri ir remontuoja geležinkelio infrastruktūrą, tuo pačiu ir viršutinę geležinkelio kelio konstrukciją. Pagal kelmačio EM-140 teikiamus operatyvius kelio geometrijos matavimo duomenis, kiekvieną mėnesį analizuojami kelio būklės pokyčiai / bėgių pažaidų formavimosi dinamika. Tokiu būdu užtikrinama, kad prevenciniai kelio priežiūros darbai būtų vykdomi operatyviai ir laiku. Taip yra palaikomas aukštas traukinių saugos eismo lygis, išvengiama arba iki minimumo sumažinama traukinių nuvažiavimo nuo bėgių galimybė, ženkliai sumažėja traukinių važiavimo greičių apribojimų arba eismo pertraukų dėl netinkamo geležinkelio kelio būklės. Visos šios priemonės užtikrina aukštą linijų laidumą ir nenutrūkstamą geležinkelio eismą.

1.4.2. Kelmačio EM-140 matavimo sistemos veikimas

Kelmatyje sumontuota daug matavimo sistemų, kurių įranga yra išdėstyta riedmens išorėje (važiuoklėje). Tik pagrindinis kompiuteris, į kurį siunčiami matavimo duomenys, įmontuotas matavimo vagono viduje. Kelmačio matavimo įtaisų išdėstymo schema pateikta 17 paveiksle. Toks sprendimas buvo priimtas taupant vietą (erdvę) vagono darbuotojų (operatorių) darbo vietoms ir papildomiems įrenginiams. Norint įdiegti papildomą, patobulinti arba atnaujinti esamą įrangą, gamintojas yra paliko vietas vagono išorėje (važiuoklėje), ir viduje (salone), tačiau nuo 2011 m. to LTG kelmačio operatoriams neprireikė.

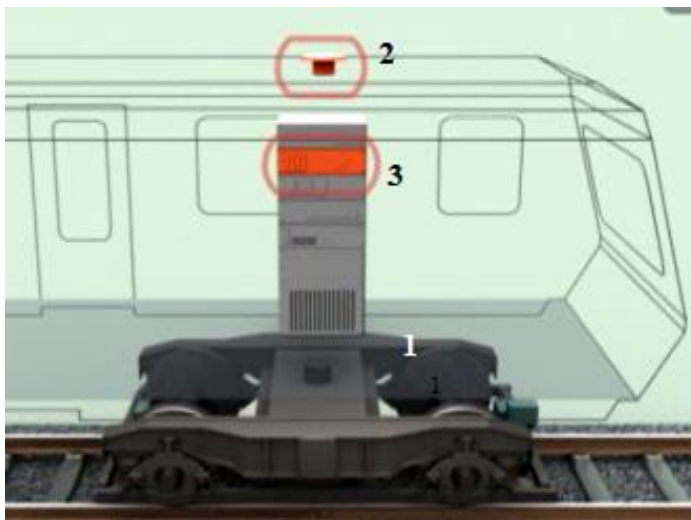


17 pav. Kelmačio duomenų siuntimo į navigacinį kompiuterį schema: 1 – kompiuteris; 2 – inerciniai jutikliai; 3 – optiniai jutikliai

Pažymėtina, jog 181,5 kN (18,5 tf) ašies apkrova yra artima Lietuvos geležinkeliuose dažniausiai eksploatuojamų riedmenų ašies apkrovai. Taigi, kelmatis važiuodamas matuoja realiomis ašies apkrovomis apkrautų bėgių geometrinius paramterus ir taip yra gaunami gana tikslūs matavimo

duomenys. Važiuojant kelmačiui, bėgių vėžė veikia tokios pačios dinaminės jėgos, kaip ir važiuojant prekiniams traukiniams, todėl galima identifikuoti visus bėgių nelygumus ar kitas pažaidas, priešingai negu bėgių būklę tikrinant žmogaus valdomu arba automatizuotu lengvuoju įtaisu / įrenginiu.

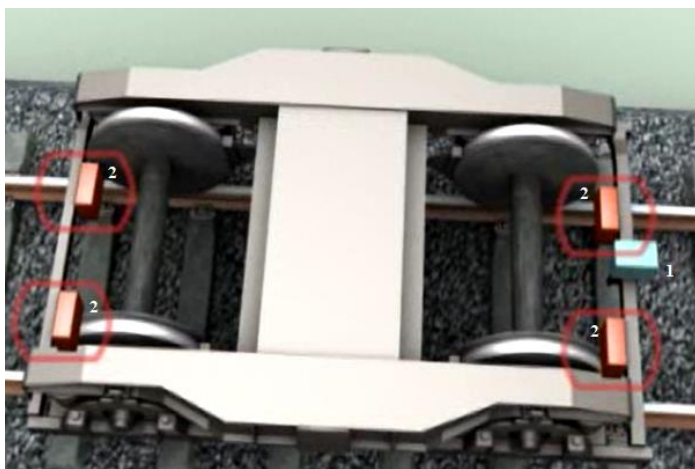
Kelmačionavigacijos sistema susideda iš trijų dalių (18 pav.): matavimo jutiklių, navigacinės sistemos su antena ir kompiuterio. Jutikliai pritvirtinami prie kelmačiomatuojamojo vežimėlio, tam, kad būtų kuo mažesnis ratų nudilimo skirtumas.



18 pav. Kelmačio navigacinės sistemos schema:

1 – matavimo jutikliai; 2 – navigacinė sistema su antena; 3 – kompiuteris

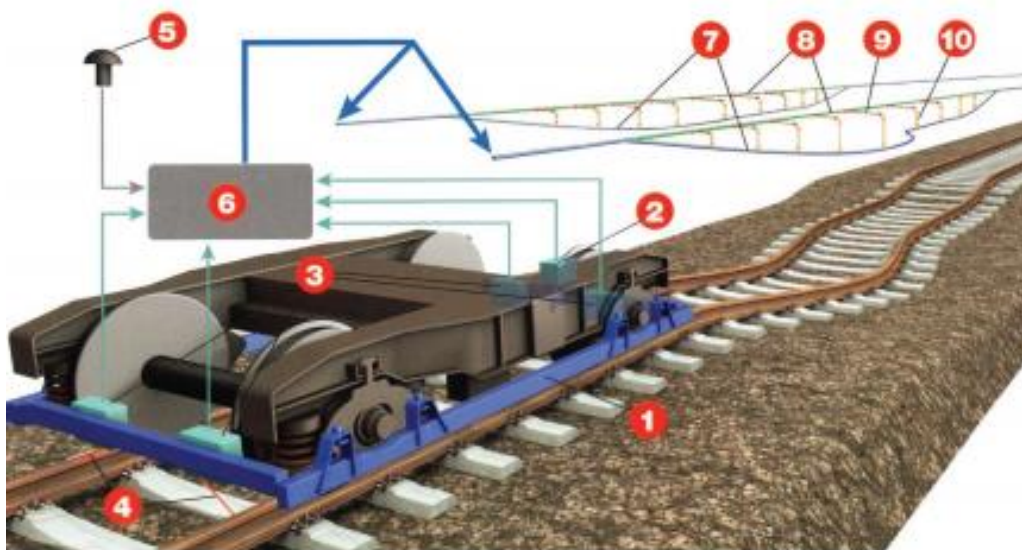
Visi kelmatyje esantys matavimo įrenginiai sumontuoti ant matavimo rėmo, kuris tvirtinamas prie kelmačio matuojamojo vežimėlio (19 pav.). Dėl šios priežasties nereikia įdiegti papildomų priemonių, kurios užtikrintų kelmačio važiavimo stabilumą geležinkelio kelio atžvilgiu ir jutiklių (lazerio) pastovų atstumą iki bėgių galvučių, nes sumontuota matavimo įranga yra lygegreti važiuojamajam paviršiui.



19 pav. Matavimo įrenginių išdėstymas ant vežimėlio rėmo:

1 – inerciniai jutikliai IMU (angl. *Inertial Measurement Unit*); 2 – optinė vėžės matavimo sistema OGMS (angl. *Optical Gauge Measurement System*)

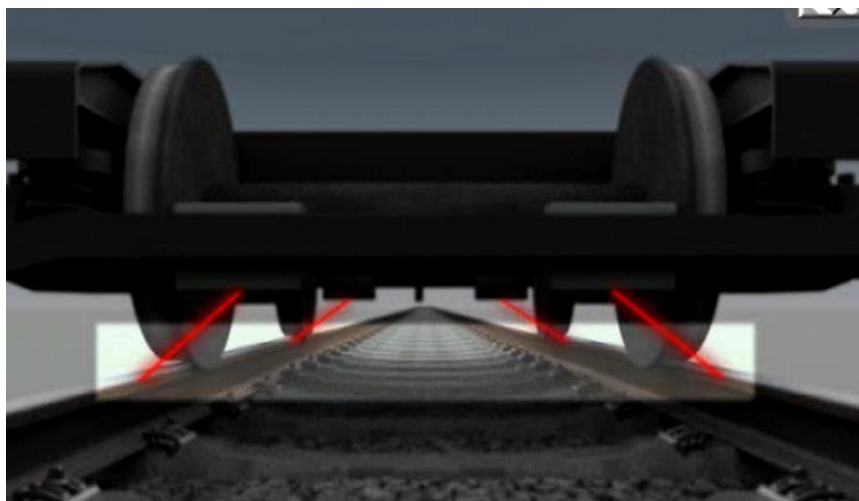
Toks kelmačio matavimo įtaisų tvirtinimo būdas užtikrina visų matavimo jutiklių lygiagrečio su bėgiais ir tikslius matavimo rezultatus. Kelmačio važiuoklės ir matavimo įrenginių elementų išdėstymo schema pateikta 19 paveiksle. Visi kelio geometrijos parametrų matavimo duomenys gaunami iš tiksliai matuojamos kelio erdvinės kreivės (20 pav.). Matavimo sistemoje integruoti inerciniai jutikliai IMU (angl. *Inertial Measurement Unit*), pasaulinės padėties nustatymo sistema GPS (angl. *Global Positioning System*) ir optinė vėžės matavimo sistema OGMS (angl. *Optical Gauge Measurement System*). OGMS sistema įvertina visų kelmačio pakabos svyravimų slopintuvų duomenis, vibracijas ir nuokrypius. Skirtingi įrenginiai matuoja atskirus parametrus: OGMS lazerio spindulys matuoja vėžės plotį ir tiesinimą („riktavimą“), IMU matuoja bėgių vėžės vertikaliųjų įdubų lygį ir perkrypas.



20 pav. 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 matavimą 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 (Bubnelis et al., 2018)

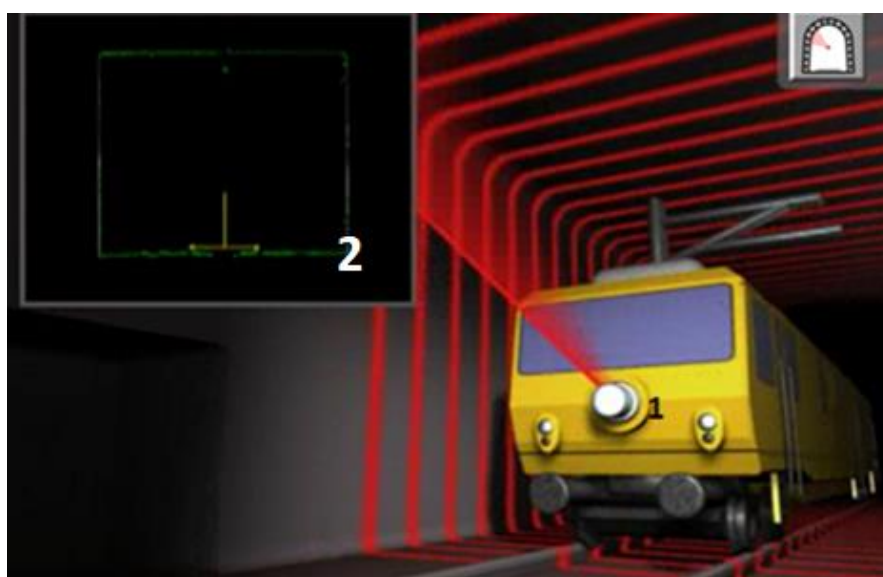
IMU sistemos lazerių spindulių nukreipimo schema pateikta 21 paveiksle. Matuojant IMU sistema gaunami duomenys gali turėti iki 1 mm paklaidą. Taigi matavimo duomenų tikslumas užtikrinamas. Ant matavimo rėmo yra 4 lazerių taškai: du kairėje ir du dešinėje pusėje.



21 pav. IMU lazerių išdėstymas bėgių atžvilgiu

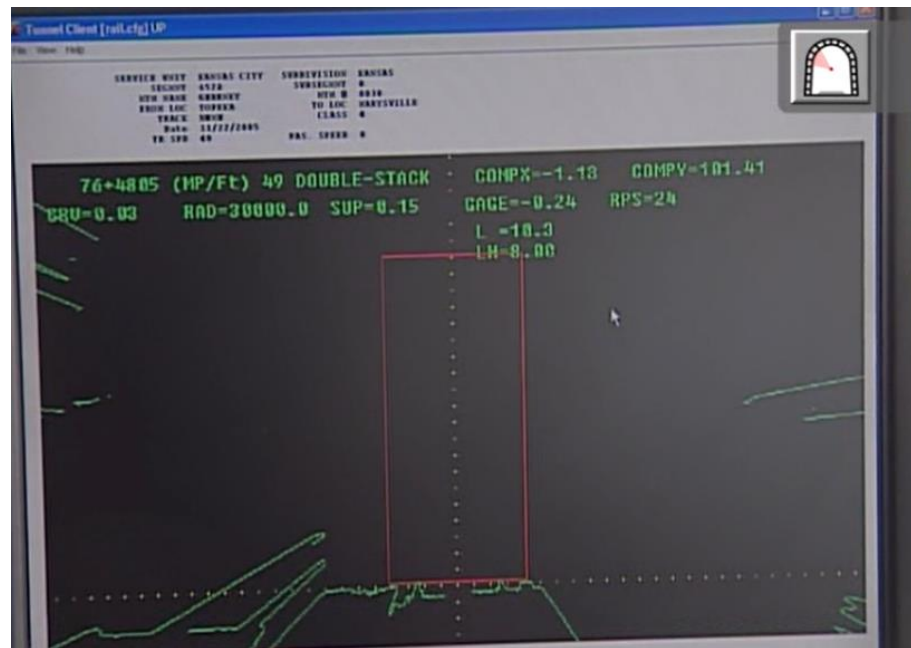
Kelmatyje sumontuota GPS (angl. *Global Positioning System*) sistema generuoja kelias paklaidas. Naudojantis tik palydovo duomenimis, paklaida gali būti 3–5 m. Tai yra gana didelis atstumas matuojant bėgių vėžės nelygumus. Dėl šios priežasties naudojamas GSM-R (angl. *Global System for Mobile Communications – Railway*) ryšys, kuriuo naudojantis kelmačio vietos nustatymo paklaida sumažinama iki 3–4 cm, tai leidžia visiškai tiksliai nustatyti esamos bėgių vėžės pažaidos koordinatę. Nutrūkus GSMR ryšiui arba esant tunelyje, GPS sistemą pakeičia IMU įranga, leidžianti nustatyti, koks atstumas buvo nuvažiuotas kelmači ir kokioje vietoje yra kelmatis. Tai išsprendžia laikinus GPS sistemos trikdžius.

Besisukantis lazerinis skeneris (22 pav.) matuoja atstumą nuo skenerio centro iki bėgių ir tunelio sienų. Jis įmontuotas viename kelmačio gale.



22 pav. Geležinkelio tunelių ir kitų statinių lazerinis skeneris: 1 – lazerinis skeneris; 2 – sistemos duomenų pateikimo langas

Taip galima stebėti atstumą tarp kelmačio, gabarito ir geležinkelio kelio statinių, pvz., tiltų, stotelių platformų, atitvarų, pervažų įrenginių ir pan. (23 pav.)



23 pav. Fragmentas gautas iš lazerinio jutiklio surinktų duomenų programos dėl gabarito atstumo nuo kelio statinių

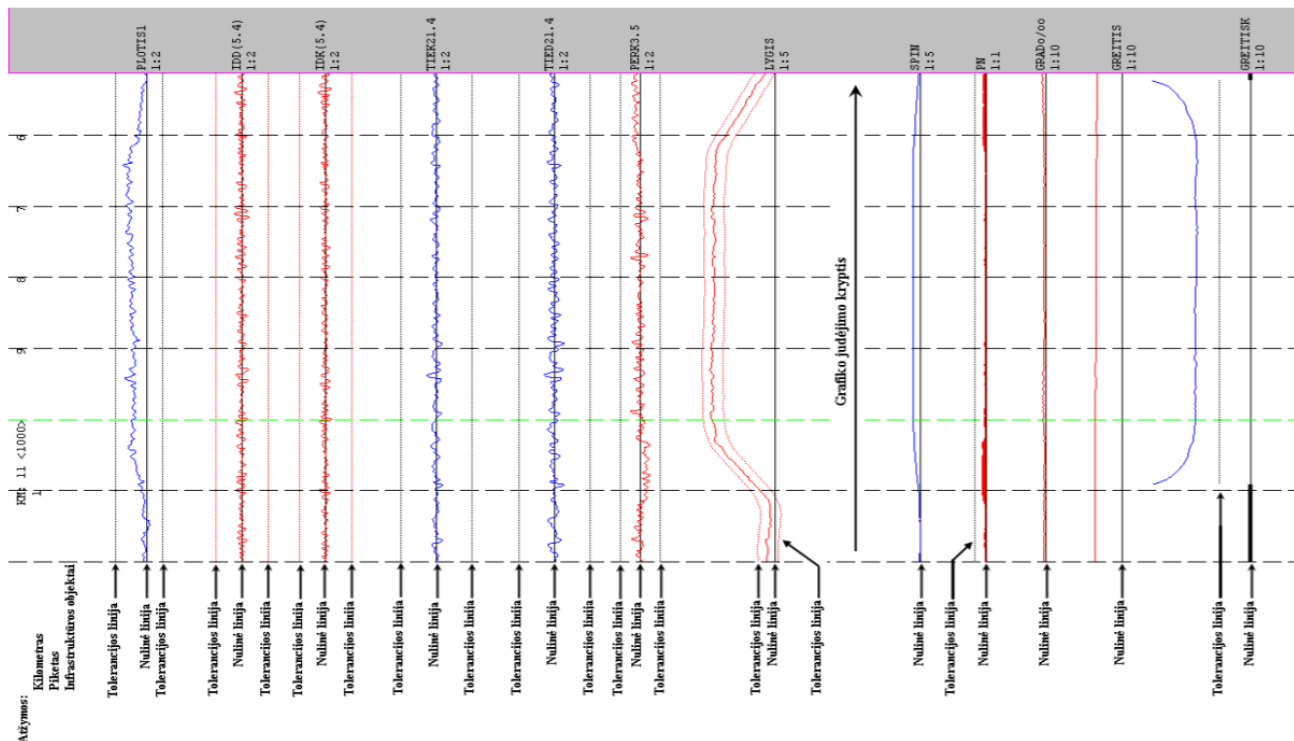
Kaip matyti iš 23 pav., raudonai žymima kelmačio gabaritas, o žalios linijos rodo statinius, medžius ar kitus esančius objektus šalia geležinkelio kelio.

1.4.3. Kelmačio matavimo sistemos funkcionalumas

Savaeigio kelio matavimo vagono EM-140 matuojamų geležinkelio kelio geometrinių parametrų įvertinimo instrukcijoje (2012) nurodoma, kad yra septyni geometriniai parametrai, lemiantys geležinkelio kelio būklę charakterizuojančio *KKI* (kelio kokybės indekso) reikšmės didumą: 1 – vėžės plotis; 2 – bėgių padėtis vienas kito atžvilgiu pagal galvutės lygį; 3 – kairiojo bėgio paviršiaus vertikaliosios įdubos; 4 – dešiniojo bėgio paviršiaus vertikaliosios įdubos; 5 – kairės pusės bėgio padėtis plane; 6 – dešinės pusės bėgio padėtis plane; 7 – bėgių perkrypa.

Pagrindinė kelmačio paskirtis – nustatyti geležinkelio kelio geometrinius parametrus. Kaip jau aprašyta 1.4.2.poskyriuje, kelmačio matavimo įranga susideda iš trijų matavimo sistemų: inercinės, dvigubos optinės (lazerinės) ir navigacinės įrangos. Naudodami šias sistemas galima išmatuoti visas kompleksinio *KKI* sudedamąsias reikšmes, taip pat ir užrašyti papildomas žymas ir parametrus, tokius kaip: 1 – važiavimo greitis; 2 – kelio ruožo kilometras, piketas; 3 – infrastruktūros objektų žymos (iešmas, tiltas, tunelis, šviesoforas, pervaža, viadukas ir pan.). Kelmatis,

pateikdamas rezultatus grafiškai (24 pav.), šiuos parametrų pavadinimus sutrumpina taip: *plotis2* yra vėžės plotis, *IDK* – kairiojo bėgio paviršiaus vertikaliosios įdubos, *IDD* – dešiniojo bėgio paviršiaus vertikaliosios įdubos, *TIEK* – kairės pusės bėgio padėtis plane, *TIED* – dešinės pusės bėgio padėtis plane, bėgių padėtis vienas kito atžvilgiu pagal galvutės lygį – lygis, *PER* – perkrypa.



24 pav. Kelmačio bėgių kelio geometrinių parametrų grafinis vaizdavimas (K/259, 2012)

Kaip matyti iš 24 pav., bėgių padėties lygis *TIED* kartais persidengia su kitais grafiškai pavaizduotais parametrais, tačiau tai netrukdo stebėti kitų parametrų. Taip vyksta kelmačiui važiuojant kreive, pagal *TIED* kreivės nuokrypio pusę, galima pasakyti geležinkelio kelio kreivės trajektoriją.

Kelmačiui išmatavus tam tikrą geležinkelio kelio ruožą, duomenys pateikiami elektroninėje laikmenoje: yra pateiktos 7 geometrinių parametrų duomenys ir visos atkarpos parametrų suma (paskutiniame stulpelyje), jie turi atitikti Lietuvos geležinkelio kelio priežiūros standarto LST EN13848 visas 6 dalis (2019 m. 1 dalis, 2021 m. 2 dalis, 2009 m. 3 dalis, 2012 m. 4 dalis, 2017 m. 5 dalis ir 2021 m. 6 dalis). Gauta *KKI* eilutė su septyniais parametrais perkeliama į žiniaraštį elektroninėje pateiktyje (25 pav.). Pagal šiuos geometrinius parametrus apskaičiuojamas vidutinis *KKI*.

	1	2	3							4
	KKI	(2,00)	PLOTIS1	IDK	IDD	TIEK	TIED	LYGIS	PER	VISO
5	0	200	1.77	1.49	1.64	1.33	1.97	1.23	1.43	10.86
	200	400	2.04	2.08	2.50	1.60	2.52	1.70	2.03	14.47
	400	600	3.53	2.14	1.78	3.23	4.41	2.19	2.53	19.80
8	600	800	4.29	1.75	1.76	2.09	2.75	1.46	1.98	16.08
	800	1000	5.92	1.98	2.24	2.35	4.23	1.85	2.50	21.08
	23,0	24,0	5.25	1.90	2.01	2.23	3.35	1.72	2.25	18.71

25 pav. Detalus kelio kokybės vertinimo pavyzdys:

1 – ataskaitos pavadinimas; 2 – aprėpties daugiklis; 3 – bėgių kelio geometrinių parametų pavadinimas; 4 – bėgių kelio geometrinių parametų verčių sumos stulpelis; 5 – KKI vertinamoji atkarpa (čia – 200 m); 6 – 200 m vertinamų geometrinių parametų KKI reikšmės; 7 – 200 m vertinamų geometrinių parametų suminis KKI; 8 – KKI vertinamoji atkarpa (čia – 1 km); 9 – 1 km vertinamų geometrinių parametų KKI reikšmės; 10 – vieno km vertinamų geometrinių parametų suminis KKI (K/259, 2012)

Tyrėjai Maskeliūnaitė ir Sivilevičius (2012) moksliai pagrindė naują požiūrį, kad KKI skaitinė vertė atitinka septynių geometrinių parametų dispersijų sumą, bet ne standartinių nuokrypių sumą. Įprastai, KKI indeksas skaičiuojamas 200 metrų atkarpai, tačiau nustatyti ir ilgesnį arba trumpesnį atkarpos ilgį. Kaip galima matyti iš 25 pav., KKI gaunamas sumuojant kiekvieno geležinkelio kelio kilometro geometrinių parametų duomenis. Pagal formulę kelmačiu išmatuotų geometrinių sklaidos įverčių suma vertinama KKI ir yra palyginama su 259/K instrukcijoje (2012) pateiktomis tolerancijomis (5 lentelė). Atsižvelgiant į kelio būklės vertinimą yra priimami sprendimai dėl geležinkelio kelio priežiūros.

5 lentelė. Kokybino geležinkelio kelio būklės įvertinimo duomenys kelio kokybės indeksu KKI, (K/259, 2012)

Suminis KKI	Geležinkelio kelio būklės įvertis
0–20	Viršija reikalavimus (puiki būklė)
21–34	Atitinka reikalavimus (normali būklė)
35–44	Beveik atitinka reikalavimus (kelias taisytinas)
≥45	Neatitinka reikalavimų (būklė kritinė)

Suminis kelio kokybės indeksas KKI, apibūdinantis vertinamos atkarpos kokybę nuo „Viršija reikalavimus“ iki „Neatitinka reikalavimų“, gali kisti nuo 0 iki 45 ir daugiau (5 lentelė). Didesnis KKI skaičius rodo, kad kelias yra nestabilus ir jo geometrinių parametų kitimo amplitudė yra per didelė. Pagal 259/K instrukciją (2012) tokie kelio ruožai įtraukiami į stabilumo neužtikrinančių kelio atkarpų sąrašą ir jose numatomi / suplanuojami prevenciniai remonto darbai. Šie darbai vykdomi tik tam

tikrose (pažymėtose) kelio atkarpose, gerinama bendra kelio būklė, dėl kurių bendras viso kelio KKI mažėja. Tai leidžia pagerinti kelio kokybę ne, remontuojant viso kelio (tarpstočio, linijos).

1.4.4. Kelmačio matavimo sistemos technologiniai trūkumai

Kiekviena technologinė įranga turi ir privalumų, turi ir trūkumų. IF darbuotojai, atsakingi už kelmačio renkamus duomenis ir jo eksploatacinę būklę, įvardijo 4 didžiausius kelmačio matavimo aparatūros trūkumus:

I. Iš surenkamų duomenų sudaromos kreivės, apdorojami ir susiteminami maždaug nuvažiavus 200 m. atstumą. Taip yra dėl ilgai trunkančio kelio matavimo duomenų apdorojimo. Duomenys iš matavimo įrenginių siunčiami į navigacinį kompiuterį, tuomet iš ten per navigacinę sistemą GPS ryšiu siunčiami į palydovą. Tik tuomet gaunamos tikslios koordinatės, t. y. tik tada duomenys yra apdorojami ir pateikiami grafiškai darbuotojo stebimame kompiuterio ekrane. Vos pradėjus eksploatuoti kelmatį, kurį laiką buvo aiškinamasi, koks laiko skirtumas yra nuo kelmačio esamos vietos ir pateikiamos informacijos. Tai išsiaiškinus, specialistai gan paprastai nustato aptiktos bėgių pažaidos tikslas koordinatas.

II. Antrasis matavimo įrangos įvardintas trūkumas yra susijęs su lazeriniu skeneriu, įmontuotu kelmačio išorėje, kėbulo priekyje. Jis, kaip anksčiau minėta, nustato atstumą nuo kelmačio gabaritų iki geležinkelio kelio statinių. Matavimas vyksta su lazeriu ir tai nėra tikslu. Lazeris labiausiai tinka matuoti tunelius, tačiau medžių, stulpų arba kitų mažesnių ir netolygių objektų tiksliai neaptinka. Taip yra dėl lazerio „nusitaikymo“ taško: jis gali „apsistoti“ bet kurioje objekto (pvz., stulpo) vietoje, o ne nuskenuoti jį visą. Dėl šios priežasties stulpą gali rodyti toliau, nei jis iš tikrųjų yra.

III. Trečiasis specialistų įvardintas trūkumas yra susijęs su matavimo įranga – IMU lazerine sistema. Esant tamsiam, matiniam bėgio paviršiui, sistemos surenkami duomenys yra tikslūs, tačiau, esant blizgiam (26 pav.) arba padengtais lapais paviršiui, lazeriais pateikiami duomenys yra iškraipomi. Taip yra dėl lazerio atsispindėjimo nuo blizgių paviršių arba negebėjimo matuoti esant tretiesiems (pašaliniais) objektams tarp bėgio ir lazerio, pvz. esant medžių lapams.



26 pav. Blizgus bėgio paviršius

Įsigijus kelmatį LTG specialsitams teko atlikti daug lazerio kalibravimo darbų, manant, kad taip yra dėl kelmačio važiuoklės vibracijos, tačiau išsiaiškinus tikslias priežastis, problema nebuvo išspręsta. Dabar tik stengiamasi palaikyti bėgius švarius, o esant blizgiam bėgių paviršiui pasitikėti patyrusių specialistų įžvalgomis / nuojauta nustatant pažaidas.

IV. Ketvirtasis ir paskutinis savaeigio kelmačio trūkumas yra eksploatacinis. Nagrinėjamas kelmatis yra skirtas daugiau ilgabėgių keliui, taip užtikrinama mažesnė vežimėlio dalių vibracija. Lietuvos geležinkelių keliuose, bėgių sandūrų, pervažų ar kitų nelygių bėgių vietų yra daug, tai sukelia papildomas važiuoklės vibracijas, kurios suintensyvina judančių dalių jungčių ir lankstų susidėvėjimą. 2011 m. LTG įsigijus kelmatį, minima problema kėlė didžiausius trikdžius jį sėkmingai ir saugiai eksploatuoti. Kas kelis mėnesius kelmatis buvo remontuojamas, sugedusios arba dėl trinties susidėvėjusios detalės buvo keičiamos naujomis. Žinoma, tai ženkliai didino kelmačio eksploatacines sąnaudas. Tai nebuvo tinkamas racionalus šios problemos sprendimas arba „susitaikymas“ su ja.

Problema išspręsta LTG riedmenų eksploatavimo inžinierių, išmanančių vagonų vežimėlių remonto ir gamybos technologijas. Riedmens važiuoklės judantieji elementai ir jų jungtys buvo patobulintos arba pakeisti kitokiais, būtent mažinančiais vibracijas ir jų poveikį detalių susidėvėjimo (nuovargio) intensyvumui.

2. GELEŽINKELIŲ KELIO BŪKLĖS NUSTATYMO REALIUOJU LAIKU TECHNOLOGIJŲ VERTINIMAS

2.1. Daugiakriterinių sprendimų priėmimo metodų apžvalga

Yra daug skirtingas savybes turinčių daugiakriterinių sprendimų priėmimo analizės metodų. Skirtingi autoriai įvairiuose literatūros šaltiniuose pateikia įvairią metodų klasifikaciją. Kiekvienas metodas turi savo privalumų ir trūkumų. Dauguma sprendimo priėmimo metodų apibūdinimas ir klasifikacija pateikiama 6 lentelėje.

6 lentelė. Daugiakriterinių (daugiatikslių) sprendimo priėmimo metodų klasifikacija (Šilgailis, 2017)

Metodų klasė	Informacija apie rodiklius	Metodai
Metodai pagrįsti daugiakriterine naudingumo teorija	Kiekybiniai matavimai	SAW, TOPSIS, TOPSIS-G MOORA, MultiMOORA, VIKOR, COPRAS, COPRAS-G, ARAS
Analitinės hierarchijos ir neapibrėžtų aiškių metodai	Kokybiniai matavimai pervesti į skaitines reikšmes	AHP, Fuzzy, Fuzzy TOPSIS, Fuzzy AHP
Lyginamosios preferencijos metodai	Kiekybiniai ir kokybiniai matavimai	ELECTRE, PROMETHEE, TACTIC, UTA, MELCHIOR, MAUT
Verbalinės analizės sprendimų metodai	Kokybiniai matavimai, kurie nepaverčiami į kiekybinį pavidalą	ZAPROS, PARK, ORKLASS, CLARA, DIFLASS, CIKL

Problemoms spręsti yra žinoma daug visuotinai pripažintų daugiakriterinių sprendimo priėmimo metodų (toliau - DSPM), kurie plačiai naudojami Lietuvos mokslininkų – tai Vietų sumos, Geometrinio vidurkio SAW (angl. *Simple Additive Weighting*), TOPSIS (angl. *Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution*), kompromisinio klasifikavimo metodas VIKOR (serb. *Visekriterijumsko KOmpromisino Rangiranjese*), COPRAS (angl. *Complex Proportional Assessment*), PROMETHEE (angl. *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation*), ARAS (angl. *A new additive ratio assessment*). Dažniausiai iš jų taikomi COPRAS ir TOPSIS metodai.

Kiekviena alternatyva, sprendžiant daugiakriterinius uždavinius, gali būti apibūdinta kriterijų aibe. Kriterijai gali būti tiek kokybiniai, tiek kiekybiniai. Jie dažniausiai turi skirtingus matavimo vienetus ir įvairią optimizavimo kryptį. Taigi, norint parinkti kelio būklės matavimo technologijas, kurios atitiktų skirtingus kriterijus, tinkamiausias vertinimo metodas yra daugiakriteris sprendimų

priėmimo metodas, nes geleŹinkelio kelio bŹklės matavimo realiuoju laiku technologijose naudojama daug skirtingų parametų, kurių tiek matavimo vienetai, tiek jų svarba nėra vienodi.

2.2. Kelio matavimo technologijų vertinimo kriterijų parinkimas

Kriterijus – tai nagrinėjamo objekto technologinės savybės apibrėŹimas (pvz.: įrenginio kaina, darbo sąnaudos, ilgaamŹiškumas ir t. t.). Vertinant skirtingus sprendimo variantus būtina naudotis kriterijais, kurie atspindi operacijos tikslą. Operacija – tai kokia nors veiksmų sistema, kurios paskirtis – pasiekti tam tikrą tikslą. Efektyviausios kelio geometrijos stebėjimo realiuoju laiku įrangos paieška pradedama nuo alternatyvų parinkimo, kurias būtų galima palyginti tarpusavyje pagal pasirinktus kriterijus (rodiklius).

Kelio bŹklės matavimo technologijoms vertinti išskiriama 13 kriterijų (Źr. 7 lentelę).

7 lentelė. GeleŹinkelių kelio bŹklės matavimo realiuoju laiku technologijų lyginamųjų kriterijai

Kriterijus	Rodiklių apibrėŹimas
A	Sistemos gabaritai
B	Matavimo sistemos naudojama galia
C	Atsparumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams
D	Darbinė temperatūra (aplinkos)
E	VaŹiavimo greitis matuojant
F	Sistemos ilgaamŹiškumas
G	Gautų duomenų tikslumas
H	Duomenų archyvavimo trukmė
I	Duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly)
J	Kalibravimo trukmė
K	Sistemos prieŹiūros kaštai
L	Skubus techninės pagalbos suteikimas
M	Sistemos kaina

Kiekvienas 7 lent. nurodytas kriterijus aprašomas išsamiau ir pateikiamas detalesnis išaiškinimas:

1. Sistemos kaina. Pradedant pirkimo procesus ir siūlomos prekės analizę, dažniausiai kertinis kriterijus yra kaina. DaŹnai siūloma kaina neatitinka kainos ir kokybės santykio, todėl šis aspektas turėtų būti išskiriamas kaip svarbesnis. Pirkimo vertės matavimo vienetai, Eurai.

2. Atsparumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams. Dažniausiai matavimo sistemos montuojamos riedmens išorėje, todėl svarbu, kad kiekviena sistemos dalis būtų apsaugota nuo aplinkos veiksnių. Taigi svarbu atsižvelgti į sistemos atsparumą dulkėms, purvui arba vandeniui, nes tai gali sukelti papildomus gedimus arba duomenų iškaripymą ir išvis duomenų nefiksavimą.

3. Važiavimo greitis matuojant. Kiekviena sistema turi apibrėžtą didžiausią važiavimo greitį, kurį viršijus nebebus surenkama duomenų arba jie bus klaidingi. Esant mažam matavimo greičiui, iškyla problema dėl darbo efektyvumo. Taps sunku išmatuoti ilgus geležinkelio kelio ruožus, iškyla būtinybė kelmačio įgulai nakvoti, pristabdomas keleivinių arba prekinų traukinių eismą vykdant vėžės matavimus. Matavimo greičio matavimo vienetai yra km/h.

4. Darbinė temperatūra (aplinkos). Lietuvoje būna 4 metų laikai, todėl temperatūros amplitudė ženkliai svyruoja: žiemą temperatūra gali nukristi iki minus 40 °C ir daugiau, o vasarą pakilti iki plus 40 °C. Įsigijant įrangą kitose šalyse, amplitudė gali kisti. Sistema, kuri turi mažą atsparumą aplinkos temperatūrai, bus rečiau naudojama, o tai kenkia efektyvumui. Įsigyjant sistemą būtina atsižvelgti į kokioje temperatūroje sistema gali dirbti, ar jos pateikti duomenys bus tikslūs ir pateikiami. Ar įranga gali būti ant tiesioginių saulės spindulių, ar tai nekenks duomenų tikslumui, ar įrangos paviršius neįkais. Atsparumo temperatūrai matavimo vienetai yra °C.

5. Sistemos gabaritai. Gabaritai yra sistemos įrangos matmenys. Sistemos įranga yra montuojama tiek riedmens išorėje, tiek viduje, todėl reikia atsižvelgti į įrangos matmenis. Jei montuojama įranga yra tokia didelė, kad užima labai daug vietos riedmens interjere, kad neleika vietos net įgulai dirbti arba kliudo sudaryti saugią darbo aplinką arba suteikti poilsio zonas, tuomet įranga yra per didelė ir ji mažins darbuotojų darbo efektyvumą ir ergonomiškumą. Gabaritų matavimo vienetai yra metrai.

6. Sistemos priežiūros kaštai. Sistemos, kurių tarnavimo trukmė yra daugiau nei 5 metai, reikalauja papildomų kaštų tiek priežiūrai, tiek išlaikymui (remontams). Esant dažniems ir brangiems remontams sistemos tampa nuostolingos. Tap pat prie papildomų išlaidų prisideda ir sistemai reikalingos metrologinės patikros arba periodinės techninė priežiūra. Dažnai tokios sistemos siūlomos už mažesnę kainą, tačiau paskaičiavus jų priežiūros kaštus, geriau pirkti brangiau, tačiau skirti mažiau finansavimo priežiūrai. Išlaikymo ir priežiūros matavimo vienetai yra Eurai.

7. Duomenų archyvavimo trukmė. Renkantis sistemą svarbu, kiek laiko jos duomenis turėsime išsaugotus duomenų bazėse arba serveryje. Nutikus eismo įvykiui kelyje, galima patikrinti sistemos rodytus duomenis, juos analizuoti ir pateikti išvadas, ar buvo galima nelaimės išvengti. Taip pat ilga saugojimo trukmė leidžia analizuoti kelio pokyčius bėgant metams (statistiniai duomenys), daryti išvadas kaip kiekvienas metų laikas arba pravažiavęs krovinių tonažas turi įtakos kelio geometrijai. Duomenų saugojimo trukmė yra metai.

8. Matavimo sistemos naudojama galia. Sistemos, sunaudojančios didelį kiekį energijos, eksploatacija tampa brangesnė, dėl jos gali tapti sudėtinga suteikti visoms įdiegtoms matavimo sistemos suteikti tiek energijos, kad jų veikimas ir duomenų rinkimas nesutriktų. Matavimo vienetai yra W.

9. Gautų duomenų tikslumas. Pagrindinis bėgių būklės monitoringo tikslas – užtikrinti tikslius duomenis. Stebint geležinkelio kelio pažaidas svarbu įsitikinti, kad sistemos suteikiami duomenys pakankamai adekvačiai nusako esamą situaciją kelyje. Tai padėtų stebėti progresuojančias arba atsirandančias vėžės geometrines nuokrypas. Matavimo vienetai yra mm.

10. Kalibravimo strukmė. Visos matavimo sistemos turi būti sukalibruotos, kad matavimų metu rinktų teisingus duomenis. Dažniausiai įrangos kalibracija atliekama kartą per metus, tačiau kai kurie gamintojai reikalauja ir dažnesnės kalibracijos, kartais net kasdieninės. Tai svarbu, kad kalibravimo darbai neužtruktų ilgai, nes tai sutrumpina tikrąją (naudingą) matavimo sistemos naudojimo laiką. Matavimo vienetai yra min.

11. Sistemos ilgaamžiškumas. Perkant matavimų sistemos įrangą svarbus yra jos tarnavimo laikas (ilgaamžiškumas). Kuo ilgesnė įrangos tarnavimo trukmė, tuo didesnė tikimybė, kad įsigyta technika atsipirks, ar net padės sutaupyti. Matavimo vienetai yra metai.

12. Duomenų apdorojimo paprastumas (User friendly). Ne mažiau už gautų duomenų tikslumą yra ir jų apdorojimo paprastumas. Jei duomenų apdorojimas sudėtingas, gali reikti samdyti aukštos kvalifikacijos ir patyrusius asmenis. Jei sistema paprasta, gali užtekti apmokyti turimus įmonės darbuotojus, taip nenutrūktų darbas, o darbuotojai galėtų pasikelti kvalifikaciją bei atlyginimą. Tai, nesudėtingas duomenų apdorojimas padėtų sutaupyti laiko, taip vyktų sklandesnis bei efektyvesnis įsigytos matavimo įrangos naudojimas.

13. Skubus techninės pagalbos suteikimas. Sugedus sistemai arba jos daliai, svarbus yra skubus tiekėjų / gamintojų aptarnavimas, taip užtikrinamas nenutrūkstamas matavimo duomenų gavimas.

2.3. Geležinkelio kelio būklės realiuoju laiku technologijų kriterijų reikšmės

2.1. poskyryje buvo atrinkta 13 rodiklių, kurie yra svarbiausi įsigyjant matavimo sistemas. Tuomet buvo atlikta tiekėjų / gamintojų apklausa apie konkrečias sistemas ir reikiamų rodiklių reikšmes. Bėgių vėžės matavimo realiuoju laiku technologijų rodiklių reikšmės pateikiamos 8 lentelėje.

8 lentelė. Geležinkelių kelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų kriterijų reikšmės

Matavimo technologija	Etaloninė technologija „Plasser“ optinio matuoklio matavimo sistema	Lazerio profilio matavimai	Atstumo jutiklio lazeris	Skrydžio laiko (ToF) kamera	Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo koreliacija (DIC)	Lazerinės sistemos, poslinkis	Terminio matavimo sistema	Stereo matavimo technologija
Dydis	>5kg	<0,4 kg	<0,2 kg	<1,5 kg	<0,2 kg	<0,3 kg	<0,8 kg	<0,2 kg
Energijos sunaudojimas	<5 W	<12 W	<1,5 W	<50 W	<5 W	<5 W	<5 W	< 2W
Darbinė temperatūra	-10°C iki 70°C	0°C iki 45°C	-20°C iki 50°C	-40°C iki 105 °C	0°C iki 40°C	-10°C iki 40°C	-15 °C iki 50 °C	0°C iki 45°C
Matavimo tikslumas	± 1mm	± 2μm	± 0,6 mm	± 3 mm	±0,9 mm	±75μm	± 1 mm	± 1 mm
Techninis suderinamumas	1500 Hz	4000 Hz	-	600 Hz	100 Hz	-	60 Hz	100 Hz
Matavimų pasikartojamumas	± 1 mm	± 1 mm	<± 1 mm	± 1 mm	± 1 mm	>± 1 mm	± 1 mm	± 1 mm

8 lentelėje pateikiami duomenys bus naudojami nustatyti labiausiai tinkamą matavimo sistemą. Tam bus naudojamas TOPSIS daugekriterinių vertinimo priėmimo metodas.

3. GELEŽINKELIO KELIO BŪKLĖS MATAVIMO REALIUOJU LAIKU TECHNOLOGIJŲ SVARBOS TYRIMAS

2-o skyriaus 6 lentelėje pateikti susisteminti kriterijai, kurie svarbūs renkantis geležinkelio kelio būklės matavimo sistemą realiuoju laiku. Anketos buvo įteiktos 14-kai AB „LTG Infra“ darbuotojų. Pasirinkti ekspertai turi ilgalaikę patirtį dirbant arba rengiant technines specifikacijas įsigijant geležinkelio kelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijas. Ekspertams, turintiems patirtį su kelio būklės realiuoju laiku matavimo technologijomis buvo įteiktos anketos, viena iš jų pateikiama A priede. Suranguoti veiksniai lyginami ARTIW (angl. *Average Rank Transformation Into Weight*) ir tiesioginiu balų metodu.

3.1. Ekspertų nuomonės suderinamumas

Kriterijų svoriai turi didelę įtaką daugiakriterio vertinimo rezultatams. Praktikoje dažniausiai taikomi subjektyvūs specialistų (ekspertų) kriterijų svoriai. Subjektyvūs svoriai atspindi (rodo) nagrinėjamos srities kvalifikuotų, turinčių didelę teorinę ir praktinę patirtį bei specialių žinių, ekspertų nuomonę (Zavadskas, Podvezko 2016).

Ekperimentiniuose tyrimuose ekspertų nuomone vadovaujamasi, kaip sprendiniu, tačiau nuomonės negali būti prieštaringos. Kaip teigia Maskeliūnaitė ir Sivilevičius (2012), priimant sprendimą pagal ekspertų arba respondentų vidutinį vertinimą, būtina nustatyti jų nuomonių suderinamumo laipsnį pagal konkordancijos koeficientą W . Konkordancijos koeficientui W skaičiuoti tinka tik respondentų arba ekspertų rodiklių rangai. Jei respondentų arba ekspertų vertinimai buvo bet kokio kitokio pavidalo (pavyzdžiui balais), juos reikia ranguoti.

Grupės ekspertų nuomonių suderinamumui nustatyti taikomas rangų koreliacijos metodas (Kendall, Gibbons 1990). Kendalo (1970) konkordancijos koeficiento idėja susieta su kiekvieno j -ojo rodiklio (kriterijaus) rangų R_j , kuriuos suteikė n ekspertų, suma ($j = 1, 2, \dots, m$):

$$R_j = \sum_{i=1}^n R_{ij}, \quad (1)$$

jei tiksliau, tai susieta su dydžių R_j nuokrypiu nuo bendro rangų vidurkio $\bar{R}$ kvadratų suma:

$$S = \sum_{j=1}^m (R_j - \bar{R})^2 \quad (2)$$

čia R_j – j -ojo kriterijaus suteikta rangų suma, $\bar{R}$ – vidutinis kiekvieno kriterijaus rangas.

$\bar{R}$ (vidutinis kiekvieno kriterijaus rangas) gaunamas jam ekspertų suteiktų rangų sumą dalijant iš kriterijų skaičiaus (m):

$$\bar{R} = \frac{\sum_{j=1}^m R_j}{m} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n R_{ij}}{m} = \frac{n(m+1)}{2} \quad (3)$$

čia R_{ij} – i -ojo eksperto j -ajam kriterijui suteiktas rangas, n – ekspertų skaičius ($i = 1, 2, \dots, n$), m – kriterijų skaičius ($j = 1, 2, \dots, m$).

Jei S yra reali kvadratų suma, apskaičiuota pagal (2) formulę, tai konkordancijos koeficientas W , kai nėra susietų rangų, apibrėžiamas gautos S ir atitinkamos didžiausios $S_{\max}$ santykiu (Kendall, Gibbons 1990):

$$W = \frac{12S}{n^2m(m^2 - 1)} = \frac{12S}{n^2(m^3 - m)} \quad (4)$$

čia m – kriterijų skaičius ($j = 1, 2, \dots, m$); n – ekspertų skaičius ($i = 1, 2, \dots, n$); S – vidutinio rango kvadratų suma.

Kiekvieno kriterijaus rangų (R_{ij}) nuokrypių nuo vidutinio rango kvadratų sumą S patogiau skaičiuoti pagal formulę:

$$S = \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n R_{ij} - \frac{1}{2} n(m+1) \right]^2 \quad (5)$$

čia R_{ij} – i -ojo eksperto j -ajam kriterijui suteiktas rangas, n – ekspertų skaičius ($i = 1, 2, \dots, n$), m – kriterijų skaičius ($j = 1, 2, \dots, m$).

Atsitiktinio dydžio S vertė skaičiuojama sudėjus visiems kriterijams laužtiniuose skliaustuose pateiktas ir kvadratu pakeltas vertes (5) formulė.

Konkordancijos koeficientas gali būti taikomas praktikoje, jei nustatyta jo ribinė reikšmė rodanti, kada ekspertų vertinimus dar galima laikyti suderintais. Kendalas (1970) įrodė, kad jeigu objektų (kriterijų) skaičius $m > 7$, konkordancijos koeficiento W reikšmingumas gali būti nustatytas naudojant χ^2 (*chi-kvadrat*) Pirsono kriterijų.

Atsitiktinis dydis:

$$\chi^2 = Wn(m-1) = \frac{12S}{nm(m-1)}. \quad (6)$$

Kendall (1970) teigimu, jei apskaičiuota pagal (6) formulę χ^2 reikšmė didesnė už $\chi_{v,\alpha}^2$, tai rodo, kad ekspertų (respondentų) vertinimai suderinti.

Kai lyginamų rodiklių (kriterijų) skaičius m yra nuo 3 iki 7, skirstinį χ^2 reikia taikyti atsargiai, nes skirstinio kritinė $\chi^2_{v,\alpha}$ vertė gali būti didesnė už apskaičiuotą, nors ekspertų nuomonių suderinamumo lygis yra dar pakankamas. Tokiu atveju galima taikyti konkordancijos koeficiento tikimybinės lentelės arba kritinių reikšmių S lentelės (su $3 \leq m \leq 7$) (Podvezko 2005).

Mažiausią konkordancijos koeficiento $W_{\min}$ reikšmę, kuriai esant galima teigti, kad visų n ekspertų nuomonės apie iš m palyginamų kriterijų sudaryto tiriamojo objekto kokybę su nustatytuoju (reikiamu) reikšmingumo lygmeniu α ir laisvės laipsniu $v = m - 1$ yra suderintos, galima apskaičiuoti taikant šią formulę (Sivilevičius 2012):

$$W_{\min} = \frac{\chi^2_{v,\alpha}}{n(m-1)} \quad (7)$$

čia: $\chi^2_{v,\alpha}$ kritinė Pirsono statistika, kurios vertė randama lentelėje (Montgomery 2013), imant laisvės laipsnį $v = m - 1$ ir reikšmingumo lygmenį α .

Ekspertų nuomonės renkantis geležinkelio kelio matavimo sistemas realiuoju laiku svarbą rangai buvo panaudoti apskaičiuojant rangų vidurkius ($\overline{R_j}$), konkordancijos koeficientą W , kritinę Pirsono statistiką (angl. *Pearson chi-square statistic*) (χ^2). Rezultatai pateikiami 9 lentelėje.

9 lentelė. Ekspertų nuomonių rangai R_{ij}

Eksperto kodas $i = 1, 2, \dots, n$	Geležinkelio kelio būklės matavimo sistemos reliuaju laiku kriterijai, žymuo $j = 1, 2, \dots, m$													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	Suma
E1	4	7	8	9	1	10	2	12	3	13	5	11	6	91
E2	12	13	6	7	3	5	2	11	8	9	4	10	1	91
E3	13	12	5	6	2	11	1	10	3	9	4	8	7	91
E4	6	2	7	8	5	4	1	11	3	12	10	13	9	91
E5	11	13	10	12	9	4	1	8	2	7	3	5	6	91
E6	10	9	8	5	13	1	6	11	7	12	2	3	4	91
E7	13	6	12	11	9	5	1	7	4	10	3	8	2	91
E8	11	10	5	9	7	4	3	8	6	12	2	13	1	91
E9	7	8	9	10	2	1	3	11	4	13	6	12	5	91
E10	13	11	5	9	10	7	1	12	2	8	3	6	4	91
E11	13	8	2	12	9	7	1	11	6	5	4	10	3	91
E12	13	6	2	5	3	8	1	11	9	10	12	4	7	91
E13	13	9	8	12	5	4	1	11	3	10	6	7	2	91
E14	13	11	5	12	4	3	2	9	6	10	7	8	1	91
$R_j = \sum_{i=1}^n R_{ij}$	152	125	92	127	82	74	26	143	66	140	71	118	58	1274
$\bar{R}_j = \frac{\sum_{i=1}^n R_{ij}}{n}$	10,85	8,92	6,57	9,07	5,85	5,28	1,85	10,21	4,71	10	5,07	8,42	4,14	91
$\sum_{i=1}^n R_{ij} - \frac{n(m+1)}{2}$	54	27	-6	29	-16	-24	-72	45	-32	42	-27	20	-40	0
$[\sum_{i=1}^n R_{ij} - \frac{1}{2}n(m+1)]^2$	2916	729	36	841	256	576	5184	2025	1024	1764	729	400	1600	18080

Toliau atliekami skaičiavimai.

Bendra rangų suma:

$$\sum_{j=1}^{13} R_j = 1274,$$

O visų rangų vidurkių suma:

$$\sum_{j=1}^{13} \bar{R}_j = 91,$$

Rodiklių rangų vidurkis apskaičiuotas pagal (3) formulę:

$$\sum_{j=1}^{13} \bar{R}_j = \frac{13(13+1)}{2} = 91,$$

arba:

$$\sum_{j=1}^{13} \bar{R}_j = \frac{1274}{14} = 91.$$

Naudojant (5) formulę apskaičiuojama kvadratų nuokrypių suma:

$$S = 18080.$$

Naudojant (6) formulę, apskaičiuojamas χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{12 \cdot 18080}{14 \cdot 13(13+1)} = 85,1491$$

Kritinė reikšmė $\chi_{v,\alpha}^2$ paimta iš (*chi-square distribution*) skirstinio lentelės su $v = 13 - 1 = 12$ laisvės laipsnių ir reikšmingumo lygmeniu $\alpha = 0,01$, yra 26,217. Empirinė reikšmė $\chi^2 = 85,1491$ yra didesnė už kritinę $\chi_{v,\alpha}^2 = 26,217$. Tai rodo, kad ekspertų vertinimai suderinti (Čekanavičius, Murauskas 2004).

Naudojant (4) formulę apskaičiuojamas ekspertų nuomonių suderinamumą rodantis konkordancijos koeficientas (W):

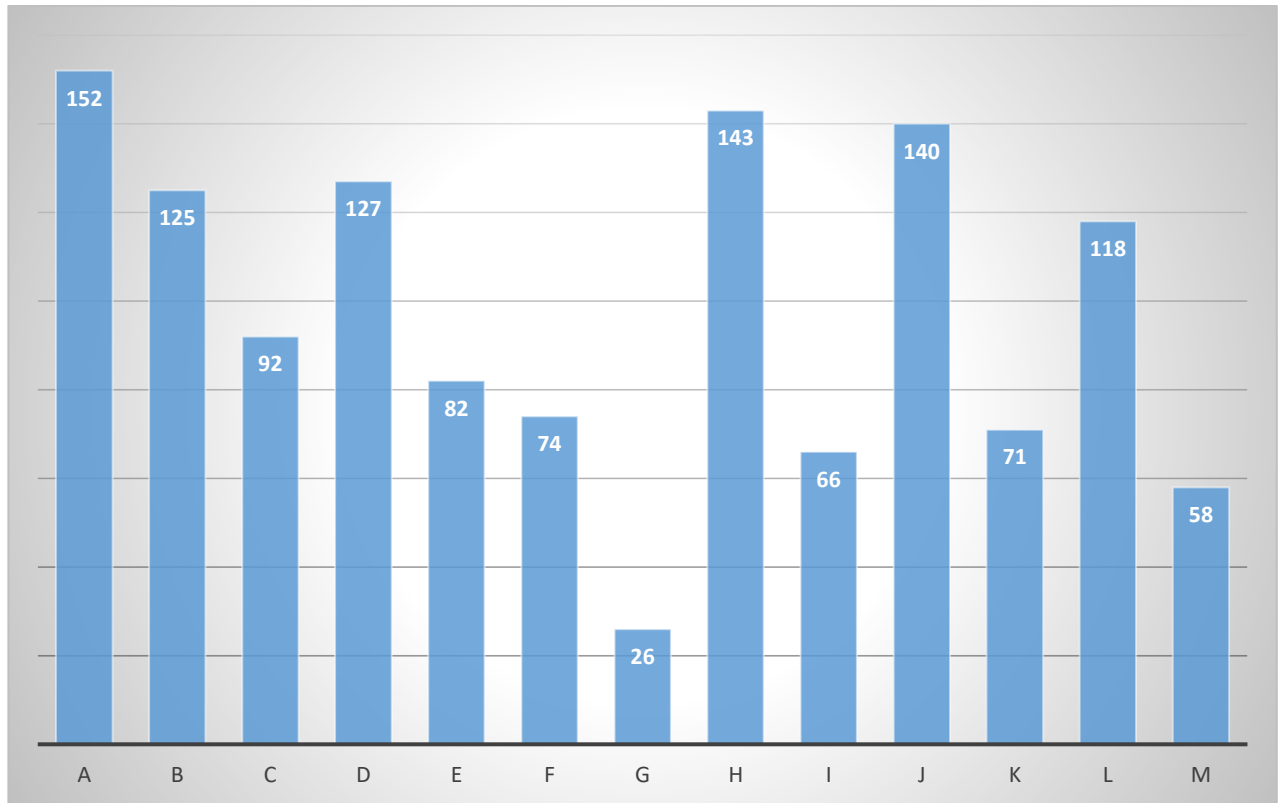
$$W = \frac{12 \cdot 18080}{14^2(13^3 - 13)} = 0,5068.$$

Naudojant (7) formulę apskaičiuojama W_{min} reikšmė:

$$W_{min} = \frac{28,3187}{14(13 - 1)} = 0,5068.$$

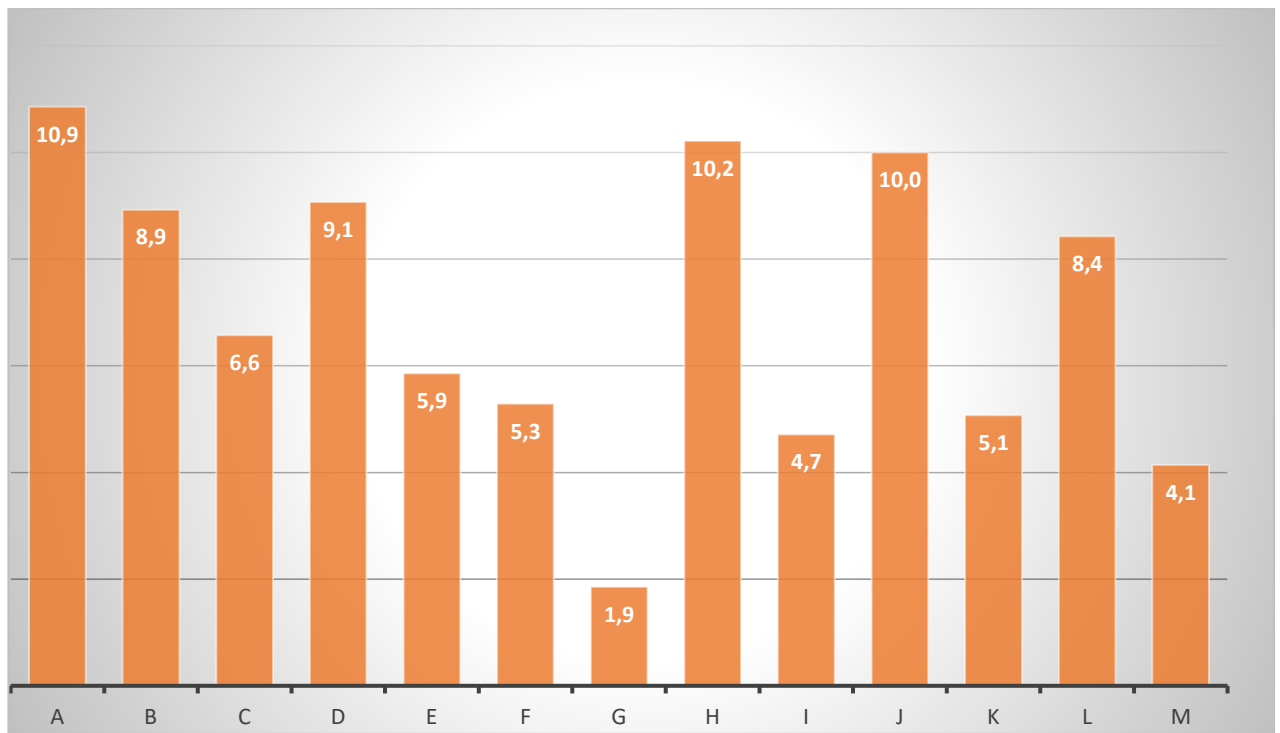
Apskaičiuotasis (empirinis) konkordancijos koeficientas $W = 0,5068$ yra lygus minimaliai jo reikšmei $W_{min} = 0,5068$, todėl galima sakyti, kad ekspertų nuomonės yra suderintos.

27 lentelėje pateikiama kriterijams priskirtų rangų suma.



27 pav. Rangų R_j , kuriuos suteikė ekspertų, sumų stulpelinė diagrama

14 ekspertų nuomonės apie geležinkelio kelio būklės matavimo sistemas realiuoju laiku, vidutinių rangų $\bar{R}_j$ apskaičiuotųjų verčių stulpelinė diagrama pateikta 28 paveiksle.



28 pav. Ekspertų nuomonės apie geležinkelio kelio būklės matavimo sistemas realiuoju laiku, vidutinių rangų $\bar{R}_j$ apskaičiuotųjų verčių stulpelinė diagrama

Iš 27 paveikslo pastebima, kad pagal svarbą rangai pasiskirsto taip:

1. Gautų duomenų tikslumas.
2. Sistemos kaina.
3. Duomenų apdorojimo paprastumas (angl. *User Friendly*).
4. Sistemos priežiūros kaštai.
5. Sistemos ilgaamžiškumas.
6. Važiavimo greitis matuojant.
7. Atsaprumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams.
8. Skubus techninės pagalbos suteikimas.
9. Matavimo sistemos naudojama galia.
10. Darbinė temperatūra (aplinkos).
11. Kalibravimo trukmė.
12. Duomenų archyvavimo trukmė.
13. Sistemos gabaritai.

Pagal kitą metodiką nustatoma geležinkelio kelio būklės matavimo sistemų realiuoju laiku kriterijų svarba (svoriai). Ekspertų vertinamo objekto kokybės veiksnių normalizuotas svarbumas gali būti nustatomas skaičiuojant autoriaus (Sivilevičius, 2011) siūlomą kiekvieno kriterijaus svarbumo

rodiklį Q_j . Šis metodas vadinamas ARTIW (angl. *average rank transformation into weight*), tai yra atvirkštinė tiesinė funkcinė priklausomybė tarp kriterijų rangų vidurkių ir šių kriterijų svorių metodu. Tam taikoma autoriaus pateikta nauja formulė:

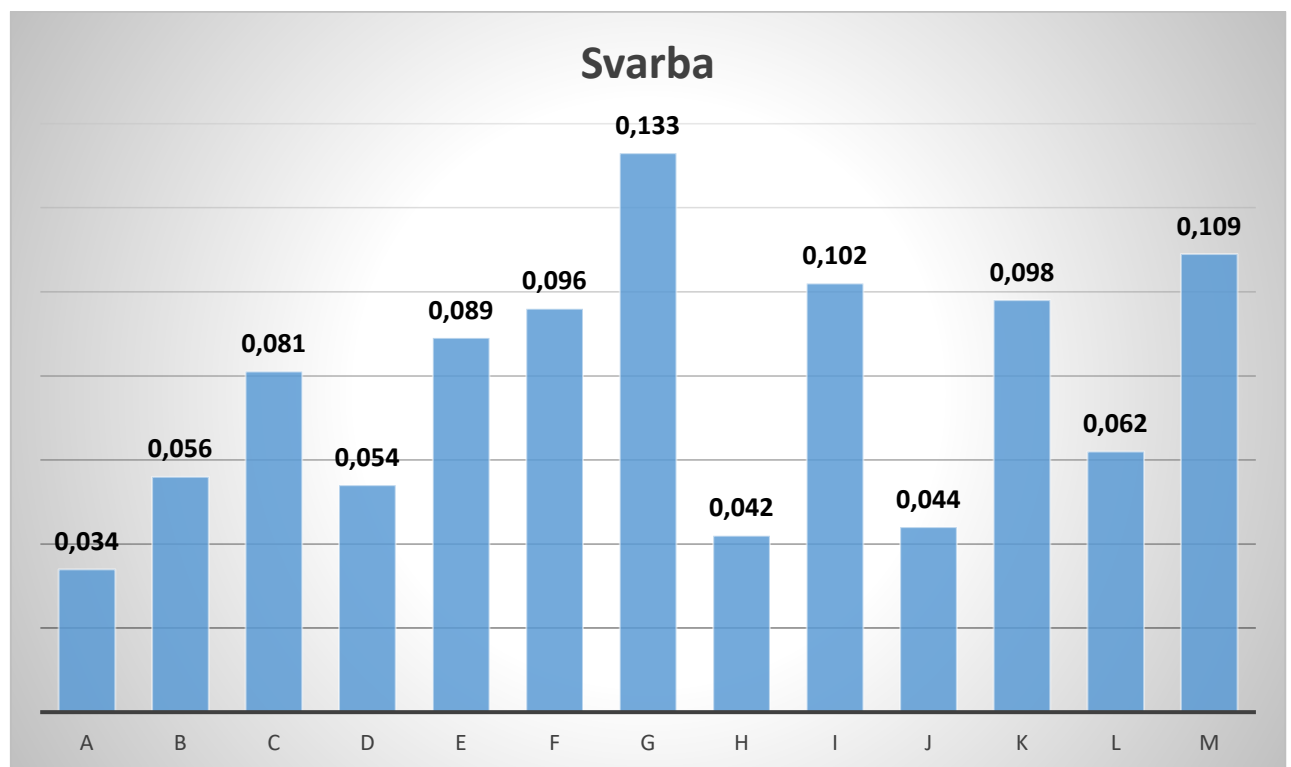
$$Q_j = \frac{(m + 1) - \bar{R}_j}{\sum_{j=1}^m \bar{R}_j} = \frac{(13 + 1) - 10,9}{91} = 0,0341 \quad (8)$$

čia: m – kriterijų skaičius ($j = 1, 2, \dots, m$); $\bar{R}_j$ – j -ojo kriterijaus vidutinis rangas, kuris apskaičiuotas anksčiau.

Visų 13 kriterijų svarbos nustatymo pagal ARTIW metodą rezultatai pateikiami 10 lentelėje ir 29 paveiksle.

10 lentelė. Kiekvieno kriterijaus svarbumo rodiklio Q_j reikšmės

Kriterijai	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Svarba	0,034	0,056	0,081	0,054	0,089	0,096	0,133	0,042	0,102	0,044	0,098	0,062	0,109



29 pav. Normalizuoti kriterijų svoriai

Apskaičiavus visus kriterijus, gaunama tokia kriterijų svarba:

1. Gautų duomenų tikslumas.
2. Sistemos kaina.
3. Duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly).
4. Sistemos priežiūros kaštai.

5. Sistemos ilgaamžiškumas.
6. Važiavimo greitis matuojant.
7. Atsaprumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams.
8. Skubus techninės pagalbos suteikimas.
9. Matavimo sistemos naudojama galia.
10. Darbinė temperatūra (aplinkos).
11. Kalibravimo trukmė.
12. Duomenų archyvavimo trukmė.
13. Sistemos gabaritai.

3.2. Ekspertų nuomonė apie kriterijų svarbą

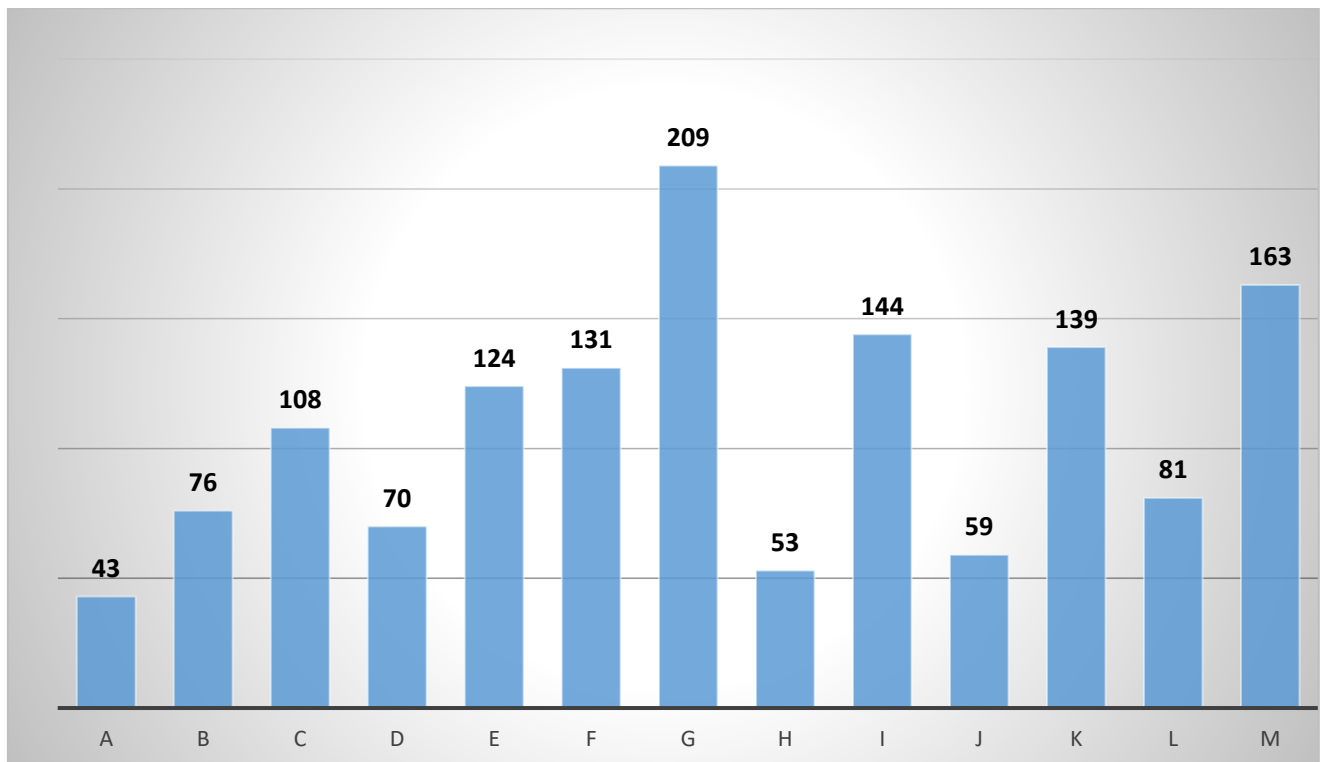
Anketoje matoma, kad kad ekspertų, taip pat buvo prašoma priskirti kiekvienam kriterijui balus, kurių suma turi būti lygi 100. Šios informacija buvo reikalinga, kad būtų galima pritaikyti tiesioginį balų metodą. Tiesioginis balų metodas - naujas, jį sukūrė prof. Henrikas Sivilevičius. Taikant šį būdą galima dar tiksliau nustatyti kiekvieno kriterijaus svarbą.

11 lentelėje pateikiami ekspertų paskirti balai kiekvienam kriterijui.

11 lentelė. Geležinkelio kelio būklės matavimo sistemų realiuoju laiku kriterijams priskirti balai

Eksperto numeris $i = 1,$ $2, \dots, n$	Geležinkelio kelio būklės matavimo sistemos reliuioju laiku kriterijai, žymuo $j = 1, 2, \dots, m$												
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
E1	10	7	6	5	18	4	15	1	12	2	9	3	8
E2	1	2	8	7	11	9	12	3	6	5	10	4	22
E3	1	2	9	8	12	3	22	4	11	5	10	6	7
E4	8	15	7	6	9	10	17	3	13	2	4	1	5
E5	3	1	4	2	5	11	16	6	15	7	12	10	8
E6	4	5	6	10	1	16	9	3	7	2	14	12	11
E7	1	8	2	3	4	9	16	7	11	5	13	6	15
E8	3	4	9	5	7	10	11	6	8	2	16	1	18
E9	7	6	5	4	14	16	12	3	11	1	9	2	10
E10	1	3	9	5	4	7	16	2	14	6	13	8	12
E11	1	7	13	2	6	8	14	3	9	10	11	4	12
E12	1	8	14	9	13	6	18	3	5	4	2	10	7
E13	1	5	6	2	9	10	18	3	13	4	8	7	14
E14	1	3	10	2	11	12	13	6	9	4	8	7	14
Suma	43	76	108	70	124	131	209	53	144	59	139	81	163

Iš 11 lentelėje pateiktų duomenų yra sudaromas grafikas, kuris pateikiamas 30 paveiksle.



30 pav. Kriterijams skirtų balų suma

Iš 30 pav. grafiko kriterijai pagal svarbą rikiuojasi šia tvarka:

1. Gautų duomenų tikslumas.
2. Sistemos kaina.
3. Duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly).
4. Sistemos priežiūros kaštai.
5. Sistemos ilgaamžiškumas.
6. Važiavimo greitis matuojant.
7. Atsaprumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams.
8. Skubus techninės pagalbos suteikimas.
9. Matavimo sistemos naudojama galia.
10. Darbinė temperatūra (aplinkos).
11. Kalibravimo trukmė.
12. Duomenų archyvavimo trukmė.
13. Sistemos gabaritai.

3.3. Ekspertų nuomonių suderinamumas

Konkordancijos koeficientui W apskaičiuoti tinka tik ekspertų rodiklių rangavimas. Rangavimas – procedūra, kai pačiam svarbiausiam rodikliui skiriamas 1-tas, mažiau svarbiam 2-tas ir t.t. Visų veiksmų bendra rangų suma lygi $\sum_{j=1}^{13} R_j = 1274$, veiksmų rangų vidurkis $\sum_{j=1}^{13} \overline{R_j} = 91$, o kvadratų nuokrypio suma yra $S = 18080$.

Grupės ekspertų (keturiolikos) konkordancijos koeficientas W , buvo apskaičiuotas naudojant 4 formulę, gauta reikšmė, $W = 0,5068$.

Kritinė reikšmė $\chi^2_{v,a}$ paimta iš (*chi-square distribution*) skirstinio lentelės su $v = 13 - 1 = 12$ laisvės laipsnių ir reikšmingumo lygmeniu $\alpha = 0,01$, yra 26,217. Empirinė reikšmė $\chi^2 = 85,1491$ yra didesnė už kritinę $\chi^2_{v,a} = 26,217$. Šie gauti rezultatai rodo, kad gautos ekspertų nuomonės yra suderintos.

Pradžioje naudotas Kendalo metodas leido nustatyti kriterijų svarbą pagal rangus, svarba gauta taikant šį metodą yra tokia:

- 1) gautų duomenų tikslumas;
- 2) sistemos kaina;
- 3) duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly);
- 4) sistemos priežiūros kaštai;
- 5) sistemos ilgaamžiškumas;
- 6) važiavimo greitis matuojant;
- 7) atsparumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams;
- 8) skubus techninės pagalbos suteikimas;
- 9) matavimo sistemos naudojama galia;
- 10) darbinė temperatūra (aplinkos);
- 11) kalibravimo trukmė;
- 12) duomenų archyvavimo trukmė;
- 13) sistemos gabaritai.

Pažymėtina, kad taikant šį metodą svarbiausias kriterijus turi mažiausiai balų. Todėl buvo nuspręsta naudoti ARTIW daugiakriterinio įvertinimo metodą, kuris leidžia transformuoti kriterijus į kriterijaus svarbos rodiklį. Gauti rezultatai rodo, tokią kriterijų svarbą:

- 1) gautų duomenų tikslumas;
- 2) sistemos kaina;
- 3) duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly);
- 4) sistemos priežiūros kaštai;
- 5) sistemos ilgaamžiškumas;
- 6) važiavimo greitis matuojant;
- 7) atsaprumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams;
- 8) skubus techninės pagalbos suteikimas;
- 9) matavimo sistemos naudojama galia;
- 10) darbinė temperatūra (aplinkos);
- 11) kalibravimo trukmė;
- 12) duomenų archyvavimo trukmė;
- 13) sistemos gabaritai.

Trečiasis būdas buvo tiesioginis balų metodas. Jis leidžia konkrečiam kriterijui skirti tam tikrą kiekį balų ir taip pasakyti, kiek būtent vienas kriterijus yra svarbesnis už kitą. Skiriami balai negali kartotis ir jų suma lygi 100. Panaudojus šį metodą gaunama tokia kriterijų svarba:

- 1) gautų duomenų tikslumas;
- 2) sistemos kaina;
- 3) duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly);
- 4) sistemos priežiūros kaštai;
- 5) 5.sistemos ilgaamžiškumas;
- 6) važiavimo greitis matuojant;
- 7) atsaprumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams;
- 8) skubus techninės pagalbos suteikimas;
- 9) matavimo sistemos naudojama galia;
- 10) darbinė temperatūra (aplinkos);
- 11) kalibravimo trukmė;
- 12) duomenų archyvavimo trukmė;
- 13) sistemos gabaritai.

Kriterijų svarba buvo apskaičiuota pritaikant tris skirtingus metodus. Taigi galima teigti, kad būtent toks kriterijų išsidėliojimas yra logiškiausias, visiškai pagrįstas.

3.4. Geležinkelio būklės matavimo realiuoju laiku technologijų analizė taikant TOPSIS metodą

Yoon ir Hwang (Hwang, Yoon 1981) sukūrė variantų prioritetiškumo nustatymo metodiką, pagrįstą koncepcija, kad optimali alternatyva turi mažiausią nutolimą nuo idealaus sprendimo ir didžiausią nutolimą nuo „neigiamai idealaus“ sprendimo. Šis metodas vadinamas variantų racionalumo nustatymo artumo idealiajam taškui metodu, TOPSIS. Tarkime, kad kiekvieno rodiklio reikšmės nuolat didėja arba nuolat mažėja. Tada galima nustatyti tinkamą sprendimą, kuris yra sudarytas iš geriausių rodiklių reikšmių, ir labiausiai netinkamą sprendimą, kuris yra sudarytas iš blogiausių rodiklių reikšmių.

TOPSIS metodas apibrėžia alternatyvas pagal didžiuosius skirtumus tarp geriausių ir blogiausių rodiklių reikšmių. Jei rezultatai lygūs vienam, tai geriausias sprendimas, jei rezultatai lygūs nuliui, tai blogiausias sprendimas.

TOPSIS metodo algoritmas pagrįstas vektoriaus normalizavimu (Ustinovičius ir Zavadskas, 2004):

$$\tilde{r}_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n r_{ij}^2}}; \quad (9)$$

čia: $\tilde{r}_{ij}$ yra i -osios alternatyvos normalizuota j -ojo kriterijaus vertė.

Geriausia alternatyva V^+ ir blogiausia alternatyva V^- buvo apskaičiuota pagal (Ustinovičius ir Zavadskas, 2004):

$$V^+ = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_m^+\} = \left\{ \left(\frac{\max_i w_j \tilde{r}_{ij}}{j} \in J_1 \right), \text{ arba } \left(\frac{\min_i w_j \tilde{r}_{ij}}{j} \in J_2 \right) \right\}; \quad (10)$$

$$V^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_m^-\} = \left\{ \left(\frac{\min_i w_j \tilde{r}_{ij}}{j} \in J_1 \right), \text{ arba } \left(\frac{\max_i w_j \tilde{r}_{ij}}{j} \in J_2 \right) \right\}; \quad (11)$$

čia: J_1 yra maksimalizuotų rodiklių rinkinys, o J_2 - minimizuotų kriterijų rinkinys.

Apskaičiuotas kiekvienos svarstomos alternatyvos idealiems (geriausiems) sprendinių atstumas D_i^+ ir D_i^- atstumas nuo blogiausių sprendinių (Ustinovičius ir Zavadskas, 2004):

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j \tilde{r}_{ij} - V_j^+)^2}; \quad (12)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (w_j \tilde{r}_{ij} - V_j^-)^2}. \quad (13)$$

TOPSIS metodo kriterijus C_i * apskaičiuotas pagal (Ustinovičius ir Zavadskas, 2004):

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (14)$$

čia: $(i = 1, \dots, n), (0 \leq C_i^* \leq 1)$.

Didžiausia C_i^* kriterijaus vertė atitinka geriausią alternatyvą.

3.5. Geležinkelio kelio matavimo sistemų reitingavimas

Atsižvelgiant į riedmens parametrus, kai kurių pasirinktų technologijų kriterijų skaitinės vertės tiesiogiai lyginti negalima. Norint įvertinti skerspjūvio rato padėčiai ir bėgio matavimui naudojamų technologijų specifikaciją, nuspręsta naudoti skalės formą, nuo 1 iki 3. Skirtingas balas gaunamas, kai dabartinė parametro skaitinė vertė turi reikšmingą įtaką funkcionalumui. Klasifikacija pateikiama taip:

- 1 - kriterijų skaitinė vertė neleidžia pasiekti norimų rezultatų;
- 2 - kriterijų skaitinė vertė suteikia sąlygas naudoti technologiją;
- 3 - kriterijų skaitinė vertė yra daug geresnė nei reikia

Matmenys ir svoris

Šie parametrai apima geometrinius sistemos parametrus, svorį, montavimo galimybes ir kt. Tirtos sistemos turi jutiklius ir duomenų kaupiklius, reikalingus duomenims išsaugoti ir apdoroti. Kiekvienos tiriamos sistemos dalies svoris yra nepalyginamai mažas, palyginti su spyruoklinėmis ir nesudėtingomis traukinio masėmis, ir tai neturės įtakos transporto priemonės dinaminiais parametrams. Visoms technologijoms reikia papildomų korpusų, kurie neleis jutikliams susidaryti aplinkos sąlygų. Jie padidina matmenis ir svorį. Rezultatai pateikti 12 lentelėje.

12 lentelė. Sistemų dydžiai

Matavimo technologija	Etaloninė technologija „Plasser“ optinio matuoklio matavimo sistema	Lazerio profilio matavimai	Atstumo jutiklio lazeris	ToF kamera	Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo koreliacija (DIC)	Lazerinės sistemos, poslinkis	Terminio matavimo sistema	Stereo matavimo technologija
Dydis	>5kg	<0,4 kg	<0,2 kg	<1,5 kg	<0,2 kg	<0,3 kg	<0,8 kg	<0,2 kg
Balai	2	2	2	2	2	2	1	2

Energijos sunaudojimas

Atlikus traukinių specifikacijų analizę, buvo nustatyta, kad įprastuose traukiniuose galima įrengti papildomą aparatūrą, kurios energijos sunaudojimas yra nuo 30 kW iki 60 kW. Jutiklių

maitinimas yra mažesnis kaip 50 kW. Didžiausias duomenų kaupimo sistemų energijos sunaudojimas yra mažesnis kaip 1 kW, o vardinė galia paprastai yra mažesnė. Visgi norint apsaugoti jutiklius nuo dulkių ir abrazyvių dalelių, reikalingas oro srautas ir jam reikia papildomos energijos. Energijos sunaudojimo technologijų vertinimo rezultatai pateikti 13 lentelėje.

13 lentelė. Sistemų sunaudojamos energijos kiekiai

Matavimo technologija	Etaloninė technologija „Plascer“ optinio matuoklio matavimo sistema	Lazerio profilio matavimai	Atstumo jutiklio lazeris	ToF kamera	Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo koreliacija (DIC)	Lazerinės sistemos, poslinkis	Terminio matavimo sistema	Stereo matavimo technologija
Energijos sunaudojimas	<5 W	<12 W	<1,5 W	<50 W	<5 W	<5 W	<5 W	< 2W
Balai	2	1	3	1	2	2	2	2

Sistemos patvarumas

Geležinkelių jutikliai veikia sunkiomis sąlygomis, nes jie montuojami riedmenų išorėje. Priklausomai nuo šalių, jie turi veikti nuo minus 30°C iki plus 40°C . Jie turi atlaikyti kritulių poveikį, tokius kaip lietus ar sniegas, taip pat ore skraidančias dulkes. Ypač problemiškas geležinkelio taikymas yra balastas, kurį traukinys važiuodamas bėgiais gali pakelti ir sugadinti prietaisus. Be to, šios sąlygos kartu su šleifu, šlapdriba ir rūku gali trukdyti matyti optinius jutiklius.

Technologijų sistemos patikimumo vertinimo rezultatai pateikti 14 lentelėje.

14 lentelė. Sistemų patavavimo rodikliai

Matavimo technologija	Etaloninė technologija „Plascer“ optinio matuoklio matavimo sistema	Lazerio profilio matavimai	Atstumo jutiklio lazeris	ToF kamera	Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo koreliacija (DIC)	Lazerinės sistemos, poslinkis	Terminio matavimo sistema	Stereo matavimo technologija
Darbinė temperatūra	-10°C iki 70°C	0°C iki 45°C	-20°C iki 50°C	-40°C iki 105 °C	0°C iki 40°C	-10°C iki 40°C	-15 °C iki 50 °C	0°C iki 45°C
Balai	1	1	1	3	1	1	1	1

Matavimo tikslumas

Važiuojant geležinkeliu taip pat svarbu, kad jutikliai galėtų gerai veikti esant dideliame greičiui.. Taip pat reikia paminėti, kad esant užteršimui ar blogoms apšvietimo sąlygoms, optinių jutiklių tikslumas mažėja. Technologijų vertinimo rezultatai, susiję su matavimų tikslumu, pateikti 14 lentelėje.

15 lentelė. Sistemomis atliktų matavimų duomenų tikslumas

Matavimo technologija	Etaloninė technologija „Plasser“ optinio matuoklio matavimo sistema	Lazerio profilio matavimai	Atstumo jutiklio lazeris	ToF kamera	Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo koreliacija (DIC)	Lazerinės sistemos, poslinkis	Terminio matavimo sistema	Stereo matavimo technologija
Matavimo tikslumas	± 1 mm	± 2 μm	± 0,6 mm	± 3 mm	± 0,9 mm	± 75 μm	± 1 mm	± 1 mm
Balai	2	3	3	1	2	3	2	2

Matavimų tikslumas yra apibrėžtas standarte (EN 13848-1, 2019), jis turi būti ± 1 mm.

Techninis suderinamumas (sąveika)

Didžiausias jutiklių mėginių ėmimo dažnis yra vienas iš lemiančių tikslumo veiksnių. Kuo didesnis mėginių ėmimo dažnis, tuo tiksliau būtų galima nustatyti momentinę vertę.

Jutiklio techninis suderinamumas ir prietaisas gali būti montuojamas įvairiuose traukiniuose, važiuojančiuose įvairių tipų geležinkeluose. Tai apima diferencialus, važiuojančius gerai, skirtingus bėgių pločius, signalizavimo / automatikos sistemas ir sąsajas. Kuo platesnis taikymo sritis, tuo didesnę rinką šis jutiklis atstovauja. Technologinio suderinamumo rezultatai pateikti 15 lentelėje.

16 lentelė. Sistemų techninis suderinamumas

Matavimo technologija	Etaloninė technologija „Plasser“ optinio matuoklio matavimo sistema	Lazerio profilio matavimai	Atstumo jutiklio lazeris	ToF kamera	Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo koreliacija (DIC)	Lazerinės sistemos, poslinkis	Terminio matavimo sistema	Stereo matavimo technologija
Techninis suderinamumas	1500 Hz	4000 Hz	-	600 Hz	100 Hz	-	60 Hz	100 Hz
Balai	2	3	2	1	1	1	1	1

Matavimo pakartojamumas

Bandymui svarbus veiksnys yra pakartojamumas, tai reiškia, kad tos pačios įrangos, tomis pačiomis sąlygomis (oro, greičio ir kt.) gauti rezultatai yra atkuriami. Tai padeda tiksliau atlikti bėgių monitoringą. Sistemos rezultatai, susiję su matavimų pakartojamumu, pateikti 16 lentelėje.

17 lentelė. Sistemų matavimo duomenų pasikartojamumas

Matavimo technologija	Etaloninė technologija „Plasser“ optinio matuoklio matavimo sistema	Lazerio profilio matavimai	Atstumo jutiklio lazeris	ToF kamera	Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo koreliacija (DIC)	Lazerinės sistemos, poslinkis	Terminio matavimo sistema	Stereo matavimų technologija
Matavimų pasikartojamumas	± 1 mm	± 1 mm	<± 1 mm	± 1 mm	± 1 mm	>± 1 mm	± 1 mm	± 1 mm
Balai	2	2	3	2	2	1	2	2

Naudojant įvertintas kriterijų reikšmes ir jų svorius, taikant tiesioginio vertinimo metodus, buvo atliktas pasirinktų technologijų įvertinimas. Taikytas anksčiau šiame skyriuje pateiktas TOPSIS metodas, o rezultatai pateikti 17 lentelėje.

18 lentelė. Apibendrinti matavimo technologijos vertinimo duomenys

Matavimo technologija	Dydis	Energijos sąnaudos	Darbinė temperatūra	Matavimo tikslumas	Techninis suderinamumas	Matavimų pasikartojamumas
Svoris	0,127	0,143	0,139	0,25	0,155	0,186
Rangas	7	5	6	1	4	2
Etaloninė technologija „Plasser“ optinio matuoklio matavimo sistema	2	2	1	2	2	2
Lazerio profilio matavimai	2	1	1	3	3	2
Atstumo jutiklio lazeris	2	3	1	3	2	3
ToF kamera	2	1	3	1	1	2
Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo	2	2	1	2	1	2
Lazerinės sistemos, poslinkis	2	2	1	3	1	1
Terminio matavimo sistema	1	2	1	2	1	2
Stereo matavimo technologija	2	2	1	2	1	2

Pagal pateiktas formules buvo apskaičiuoti galutinės sistemų vertinimai, jie buvo normalizuoti. Galutiniai duomenys pateikti 18 lentelėje.

19 lentelė. Apskaičiuoti sistemų vertinimai, normalizuotos reikšmės

Matavimo technologija	Dydis	Energijos sąnaudos	Darbinė temperatūra	Matavimo tikslumas	Techninis suderinamumas	Matavimų pasikartojamumas	Suma	Normalizuotos reikšmės
Svoris	0,127	0,143	0,139	0,25	0,155	0,186	1	-
Rangas	7	5	6	1	4	2	-	-
Etaloninė technologija „Plasser“ optinio matuoklio matavimo sistema	0,254	0,286	0,139	0,5	0,31	0,372	1,861	0,126
Lazerio profilio matavimai	0,254	0,143	0,139	0,75	0,465	0,372	2,123	0,144
Atstumo jutiklio lazeris	0,254	0,429	0,139	0,75	0,31	0,558	2,44	0,165
ToF kamera	0,254	0,143	0,417	0,25	0,155	0,372	1,591	0,108
Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo	0,254	0,286	0,139	0,5	0,155	0,372	1,706	0,115
Lazerinės sistemos, poslinkis	0,254	0,286	0,139	0,75	0,155	0,186	1,77	0,120
Terminio matavimo sistema	0,127	0,286	0,139	0,5	0,155	0,372	1,579	0,107
Stereo matavimo technologija	0,254	0,286	0,139	0,5	0,155	0,372	1,706	0,115
Suma:							14,776	1

Nagrinėjant gautus 18 lent. duomenis, pastebima, kad geriausios sistemos pagal parinktus rodiklius ir gautas jų reikšmes – Atstumo jutiklio lazeris ir Lazerio profilio matavimų sistema.

Sistemos pagal tinkamumą, suranguojamos taip:

1. Atstumo jutiklio lazeris.
2. Lazerio profilio matavimai.
3. Etaloninė technologija „Plasser“ optinio matuoklio matavimo sistema.
4. Lazerinės sistemos poslinkis.
5. Didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo / stereo matavimo technologija.
6. Skrydžio laiko (angl. *Time of Flight*) kamera.
7. Terminio matavimo sistema.

Darbe atlikta geležinkelio kelio būklės matavimo technologijų palyginamoji analizė parodė, kad šiuo metu pažangiausia vėžės geomterijos bekontaktė stebėjimo įranga yra lazerinės technologijos pagrindu veikiančios sistemos.

BENDROSIOS IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Atlikus mokslinės literatūros, susijusios su geležinkelio kelio būklės matavimo realiuoju laiku sistemomis, nustatyta, kad svarbiausia šios sistemos paskirtis yra nustatyti kelio pažaidas, geometrinius nuokrypius ir pan. Laiku nenustatytos bėgių vėžės pažaidos gali lemti traukinių eismo sustabdymą, leidžiamojo greičio sumažinimą arba netgi eismo įvykį. Norint užtikrinti saugų transportavimą ir keliones geležinkeliais svarbu nuolatos stebėti geležinkelio kelio būklę.

2. Geležinkelio kelio būklės matavimo sistemų realiuoju laiku kriterijus įvertino 14 ekspertų pagal 13 kriterijų skalę. Anketų duomenys apdoroti taikant Kendalo rangų koreliacijos metodą. Vėliau vidutiniai rangai normalizuoti taikant ARTIW metodą. Kriterijai pagal svarbą pasiskirstė taip: 1.gautų duomenų tikslumas (0,133); 2. sistemos kaina (0,109); 3. duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly) (0,102); 4. sistemos priežiūros kaštai (0,098); 5.sistemos ilgaamžiškumas (0,096); 6. važiavimo greitis matuojant(0,089); 7. atsparumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams (0,081); 8. skubus techninės pagalbos suteikimas (0,062); 9. matavimo sistemos naudojama galia (0,056); 10. darbinė temperatūra (aplinkos) (0,054); 11. kalibravimo trukmė (0,044); 12. duomenų archyvavimo trukmė (0,042); 13. sistemos gabaritai (0,034).

3. Visų apklausoje dalyvavusių ekspertų nuomonės suderintos, tačiau suderinamumas nėra aukštas, nes konkordancijos koeficientas $W = 0,5068$ lygus mažiausiai konkordancijos reikšmei, $W_{min} = 0,5068$. Tačiau taikant Pirsono chi-kvadrato statistiką užtikrinama, kad ekspertų nuomonės suderintos, nes gautas $\chi^2 = 85,1491$ didesnis už kritinę vertę, atitinkančią laipsnių skaičių 12 ir reikšmingumo lygmenį 0,01, kuri lygi $\chi^2_{v,\alpha} = 26,217$.

4. Kriterijų svarbai nustatyti panaudotas tiesioginis balų metodas. Ekspertai kiekvienam kriterijui suteikė tam tikrą balų kiekį pagal svarbą (balai negali kartotis ir jų suma turi būti lygi 100). Kriterijų svarba pasiskirsto taip: 1.gautų duomenų tikslumas (209); 2.sistemos kaina (163); 3. duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly) (144); 4. sistemos priežiūros kaštai (139); 5.sistemos ilgaamžiškumas (131); 6. važiavimo greitis matuojant (124); 7. atsparumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams (108); 8. skubus techninės pagalbos suteikimas (81); 9. matavimo sistemos naudojama galia (76); 10.darbinė temperatūra (aplinkos) (70); 11. kalibravimo trukmė (59); 12.duomenų archyvavimo trukmė (53); 13. sistemos gabaritai (43).

5. Atlikus aširačio rato padėčiai ir bėgio matavimui naudojamų technologijų palyginimą, nustatyta, kad tinkamiausia yra atstumo jutiklio lazeris ir mažiausiai tinkamos yra terminio matavimo sistemos. Visos sistemos pagal tinkamumą pasiskirsto taip: 1) atstumo jutiklio lazeris; 2) lazerio profilio matavimai; 3) etaloninė technologija „Plasster“, optinio matuoklio matavimo sistema; 4)

lazerinės sistemos poslinkis; 5) didelio greičio filmavimo skaitmeninė vaizdo / stereo matavimo technologija; 6) skrydžio laiko (angl. *Time of Flight*) kamera; 7) terminio matavimo sistema.

6. Įsigyjant naują geležinkelio kelio būklės matavimo sistemą realiuoju laiku pirmiausia būtina įvertinti sistemos suteikiamų duomenų tikslumą, sistemos kainą ir duomenų apdorojimo paprastumą. Pagal ekspertų nuomonę mažiausiai svarbūs kriterijai yra sistemos gabaritai, duomenų archyvavimo trukmė ir kalibravimo trukmė, todėl šie kriterijai renkantis naują sistemą turėtų būti yra antraeiliai.

LITERATŪRA

- Bracciali, A., Cavaliere, F., Macherelli, M. (2014). *Review of Instrumented Wheelset Technology and Applications*.
- Bubnelis, V. M., Slepakovas, B., Černiauskaitė, L., Henrikas Sivilevičius, H. (2018). *Geležinkelio kelio geometrinių parametrų dinamikos tyrimas taikant kelio kokybės indeksą*. 2–4 p.
- Čekanavičius, V. ir Murauskas, G. (2004). *Statistika ir jos taikymas II*. Vilnius: TEV.
- Farhan, J., Fwa, T. F. (2009), *Pavement maintenance prioritization using Analytic Hierarchy Process*. *Transportation Research Record*, 2093:12–24 p.
- Hwang, C. L., Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications*. 192–206 p.
- LST EN13848-3 *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 3 dalis. Matavimo sistemos. Geležinkelio kelio tiesimo ir techninės priežiūros mašinos* (2009).
- LST EN13848-4 *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 4 dalis. Matavimo sistemos. Rankiniai ir lengvieji įtaisai* (2012).
- LST EN13848-5 *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 5 dalis. Geometrinės kokybės lygmenys. Bėgių kelias* (2017).
- LST EN13848-1 *Geležinkelio taikmenys. Geležinkelio kelias. Geležinkelio kokybė. 1 dalis. Geležinkelio kelio kokybės apibūdinimas* (2019).
- LST EN13848-6 *Geležinkelio Taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 6 dalis. Geometrinės bėgių kelio kokybės apibūdinimas* (2021).
- LST EN13848-2 *Geležinkelio taikmenys. Bėgių kelias. Geometrinė bėgių kelio kokybė. 2 dalis. Matavimo sistemos. Kelmatės transporto priemonės* (2021).
- Krovinių vežimas ir krovinių apyvarta geležinkelių transportu*. (2021)
- Trinkūnienė, E. (2006). *Statybos rangos sutarčių vertinimo sprendimų paramos sistema internete*. Vilnius. 80–85 p.
- AB „Lietuvos Geležinkeliai“. (2012). *Savaeigio kelio matavimo vagono EM-140 matuojamų geležinkelio kelio geometrinių parametrų įvertinimo instrukcija (K/259)*.
- Iwnicki, S., Björklund, S., Enblom, R. (2009). *Wheel–rail contact mechanics*
- Kendall, M. (1970). *Rank Correlation Methods*. Griffin and Co.
- Kendall, M. ir Gibbons, J.D. (1990). *Rank correlation methods*. London: Edward Arnold.
- Maskeliūnaitė, L. ir Sivilevičius, H. (2012). *Expert evaluation of criteria describing the quality of travelling by international passenger train: technological, economic and safety perspectives. Technologies and Economic Development of Economy*, 544–566 p.

- Šilgailis, M. (2017) *Jūrinių vėjo jėgainių pamatų tipų analizė ir vertinimas daugiataksliais vertinimo metodais*. 32 p.
- Montgomery, D. (2013). *Statistical Quality Control: A Modern Introduction*, 7th ed. John Wiley & Sons, 752 p.
- Orugbo, E. E. (2015). RCM and AHP hybrid model of network maintenance prioritization. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 182-190 p.
- PER (2016), *Rail track monitoring system – Wireless Autonomous On-Board System measuring vibration with continuous reporting to reduce maintenance costs and enhance reliability and safety*, H2020 project.
- Saaty, T.L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.
- Skrickij, V., Šabanovič, E., Shi, D., Stefano, R., Rizzetto L., Bureika, G. (2021). Visual measurement system for wheel–rail lateral position evaluation. *Sensors. Basel: MDPI. ISSN 1424-8220. vol. 21, iss. 4 p. 1-16*.
- Ustinovičius, L. ir E.K. Zavadskas, E.K. (2004). *Statybos Investicijų efektyvumo sisteminis įvertinimas*. Technika.
- Podvezko, V. (2005). Determining the level of agreement of expert estimates. *Technologie and Economic Development of Economy*, 101-107 p.
- Zavadskas E. K. ir Podvesko V. (2016). Integrated determination of objective criteria weights in MCDM. *International Journal of Information Technology & Decision making*, 267-283 p.

PRIEDAI

A priedas

GELEŽINKELIO KELIO MATAVIMO SISTEMŲ VERTINIMO ANKETA

Gerbiamas eksperte

Prašau Jūsų suranguoti anketoje pateiktus geležinkelio kelio geometrijos sistemų matavimo realiuoju laiku vertinimo kriterijus (suteikti vietas pagal svarbą nuo 1 iki 13, skaičiai neturi kartotis) ir kiekvienam kriterijui skirti balus (svarbiausiu kriterijui skiriama daugiausiai balų, mažiausiai svarbiu kriterijui mažiausiai balų, balai negali kartotis).

Kiekvienam kriterijui priskirkite rangą (vietą pagal svarbą) nuo svarbiausio (1) iki mažiausiai svarbaus (13). Taip pat surašykite balus (balų suma turi būti lygi 100, skaičiai kartotis negali).

Kriterijus	Kriterijaus apibrėžimas	Rangas	Balai
A	Sistemos gabaritai	12	1
B	Matavimo sistemos galia	13	2
C	Atsparumas aplinkos (atmosferiniams) veiksniams	6	8
D	Darbinė temperatūra (aplinkos)	7	7
E	Važiavimo greitis matuojant	3	11
F	Sistemos ilgaamžiškumas	5	9
G	Gautų duomenų tikslumas	2	12
H	Duomenų archyvavimo trukmė	11	3
I	Duomenų apdorojimo paprastumas (User Friendly)	8	6
J	Kalibravimo trukmė	9	5
K	Sistemos priežiūros kaštai	4	10
L	Skubus techninės pagalbos suteikimas	10	4
M	Sistemos kaina	1	22
Iš viso:		91	100