



21-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2018 m. gegužės 4-5 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 21th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 4-5 May 2018, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 21-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 4-5 мая 2018 г., Вильнюс, Литва

IEŠMO SMAILĖS IR PAVAROS MATEMATINIS MODELIS

Mindaugas Simonavičius, Marijonas Bogdevičius

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Transporto inžinerijos fakultetas,
Mobiliųjų mašinų ir geležinkelių transporto katedra
El. paštas: m.simonav@gmail.com; marijonas.bogdevicius@vgtu.lt*

Santrauka. Nagrinėjamas iešmo smailių ir pavaros matematinis modelis, kuris sudarytas iš elektros variklio, pavaros reduktoriaus, krumpliaračių, velenų, krumpliaštiebio tarpusavio sąveikos su iešmo smailėmis. Sudarytas iešmo pavaros dinaminis modelis, iešmo pavaros transmisijos matematinis modelis, įvedus variklio sukimo momento kitimo lygtį, modelyje įvertintas kintamos geometrijos iešmo smailės standumas, iešmo smailės inercijos momentai. Šiuo modeliu galima tirti iešmo pavaros elementų sukamojo judesio poveikį įvertinant kintamos geometrijos iešmo smailių standumą. Geležinkelyje iešmai yra ypatingai svarbus viršutinės kelio konstrukcijos elementas, kuris padeda sukurti bendrą nepertraukiamą traukinių judėjimo tinklą. Iešmo pavaros paskirtis perjungti, užrakinti ir kontroliuoti iešmo padėtį.

Reikšminiai žodžiai: iešmas, bėgis, variklis, pavara, reduktorius, smailė.

Įvadas

Geležinkelio bėgiai ir iešmai veikiami didžiulių apkrovų, bėgių paskirtis sugerti ir tampriai perteikti apkrovas nuo geležinkelio riedmens į pabėgius, balasto sluoksnį, kelias patiria apkrovas dėl jėgų dedamosios. Kelia veikiančios poslinkiai atsiranda dėl neproporcingų pakilimų, ir kelio vingių. Taip pat geležinkelio kelia veikia virpesių impulsai. Tokie impulsai gali atsirasti dėl bėgių išdily, dėl vėžės pločio defektų, dėl geležinkelių kelius tarpusavyje jungiančių elementų junginių, iešmų ir dėl pačio traukinio virpesių (Katoch *et al.* 1977).

Geležinkelio iešmas yra mechaninis įtaisas, nukreipiantis traukinį viena iš dviejų galimų geležinkelio kelio kryptų.

Naudojant iešmus, traukiniai gali nesustodami važiuoti iš vieno kelio į kitą, sankirtose, kur susikerta keletas kelių, gali kirsti kitą kelią. Iešmai projektuojami taip, kad geležinkelio keliai būtų išdėstyti kuo palankiau, atsižvelgiant į riedmenų dinaminį važiavimo pobūdį. Geležinkelio iešmo principas pirmą kartą panaudotas 1832m.

Eksploatuojamas iešmas, kuriuo galima važiuoti, turi tenkinti šias sąlygas (*Techninio geležinkelių...* 1996):

a) iešmų smailės ir slankiosios kryžmių šerdys atsisukrusios nuo traukinių;

b) smailė atsitraukusi nuo rėminio bėgio arba slankioji šerdis atsitraukusi nuo atlankos 4 mm ar daugiau,

matuojant ties smailių ir bukos kryžmės šerdies pirmąja trauke, o smailos kryžmės šerdies — šerdies gale;

c) smailė arba slankioji šerdis ištrupėjusi tiek, kad ant jos gali užvažiuoti rato antbriaunis, ir visais atvejais, kai ištrupos yra:

1. 200 mm ar didesnės — pagrindiniuose keliuose,

2. 300 mm ar didesnės — atvykimo ir išvykimo keliuose,

3. 400 mm ar didesnės — kituose stoties keliuose;

d) smailė nusėdusi žemiau rėminio bėgio, o slankioji šerdis yra žemiau atlankos 2 mm ar daugiau, matuojant toje vietoje, kur smailės arba slankiosios šerdies galvutės plotis siekia 50 mm ar daugiau;

e) atstumas tarp kryžmės šerdies ir gretbėgio galvutės darbinį briaunų mažesnis kaip 1472 mm;

f) atstumas tarp gretbėgio ir atlankos galvučių darbinį briaunų didesnis kaip 1435 mm;

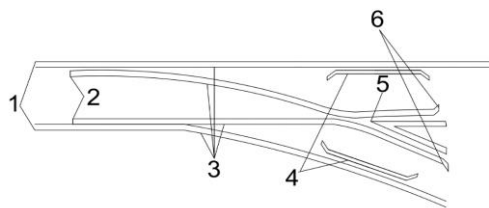
g) lūžusi smailė arba rėminis bėgis;

h) lūžusi kryžmė (šerdis, atlanka arba gretbėgis);

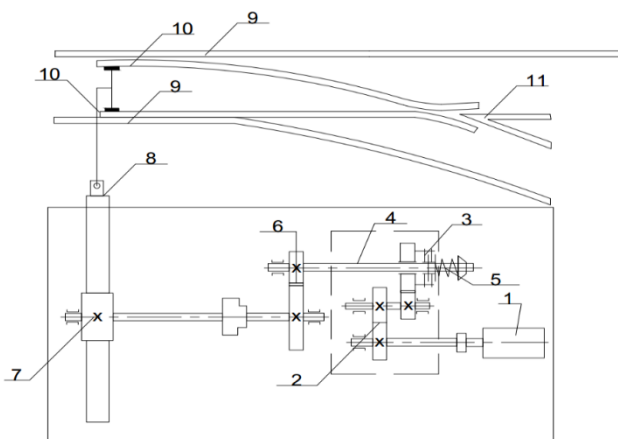
i) nutrūkęs gretbėgių varžtas vieno varžto įdėkle arba abu varžtai dviejų varžtų įdėkle.

Pagrindiniai viršutinės kelio konstrukcijos iešmo elementai pavaizduoti (1 pav.).

Plačiausiai Lietuvoje paplitę 1/9 tipo iešmai su „SP“ tipo elektros pavara. Iešmas yra vienas svarbiausių geležinkelio viršutinės kelio konstrukcijos elementų. (2 pav.) iešmo smailių pervedimo mechanizmas.



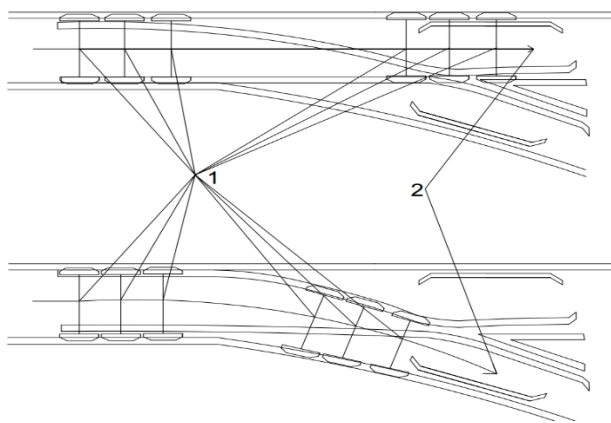
1 pav. Iešmo važiuojamosios dalies elementai: 1 – rėminis bėgis; 2 – smailės; 3 – jungiamieji bėgiai; 4 – gretbėgiai; 5 – kryžmė; 6 – atlankos



2 pav. Iešmo smailių ir pavaros elementai: 1 – elektros variklis; 2 – cilindrinė pavarą; 3 – krumpliaratinė sankabos mova; 4 – krumpliaratis velenas; 5 – pleištinė veržlė; 6 – cilindrinė pavarą; 7 – krumpliaštiebio krumplinė pavarą; 8 – traukė sujungta su iešmo smailėmis; 9 – iešmo rėminis bėgis; 10 – iešmo smailės; 11 – iešmo kryžmė

Elektros variklis, gavęs el. maitinimą, suka cilindrinę pavarą, kuri pradeda sukuti reduktoriaus pakopų dantračius, bei krumpliaratinės sankabos movos diskus, kurie įmontuoti reduktoriaus korpuse. Šis sukamasis judėjimas perduodamas per cilindrinę pavarą pagrindiniam velenui. Krumpliaštiebio krumplinės pavaros dantračiai, sukantis pagrindiniam velenui, savo dantračiais stumia traukę sujungta su iešmo smailėmis, taip perjungiamos iešmo smailės į kitą padėtį.

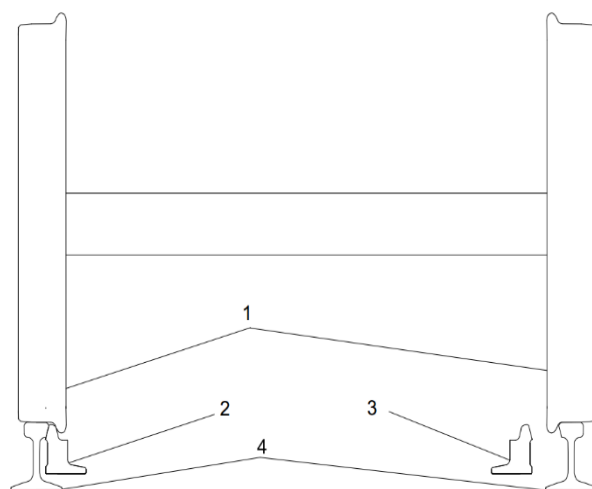
Aširačio važiavimas iešmu tiesiu keliu arba į kelio atšaką (3 pav.), aširačiai nukreipiami į kelio atšaką automatiškai iešmo smailių pagalba.



3 pav. Aširačio važiavimo per iešmą kryptys: 1 – aširatis; 2 – važiavimo kryptis

Geležinkelio bėgiai turi tenkinti šiuos reikalavimus: atsparūs nusidėvėjimui ir dilimui, stiprūs, kieti ir netrapūs, atskiras šios sistemos dalis jungiantys komponentai turi spyruokliuojamųjų ir amortizuojamųjų elementų. Šie elementai tai pat turi sugerti ir išskaidyti viršutinę kelio konstrukciją veikiančius vidutinių ir auštų dažnių virpesius kurie susidaro važiuojant riedmenims (Knothe 2001). Jei kelyje atsiranda aukštų dažnių impulsai, pabėgiai pradeda virpėti. Virpesiai būna nukreipti skaldos ir bėgių kartu su pabėgiais kryptimi arba į juos. Be to, būtina atsižvelgti į tai, kad skalda per pabėgius perima apkrovas, ir tai vyksta tiesiškai. Tai yra dėl tuščiavidurių tarpelių po pabėgiais, tarpeliai gali siekti kelis milimetrus. Dėl nevienodo skaldos slūgimo ir defektų. Vidutinio ir aukštojo dažnio diapazono vibracijos pirmiausia kykla standžioje viršutinėje konstrukcijoje.

Aširačio ratas yra vienintelis ir pagrindinis elementas, kuris liečiasi savo paviršiumi su bėgiais ir iešmo smailėmis (4 pav.).



4 pav. Aširačio važiavimo per iešmą kryptys: 1 – aširatis; 2 – prispausta smailė; 3 – neprispausta smailė; 4 – rėminiai bėgiai

Visas vagono svoris ir apkrovos per aširačio ratą yra perduodamos bėgiams ir iešmo smailėi. Todėl labai svarbu, kad ratas kontakto zonoje su rėminiu bėgiu ir iešmo smailė patirtų kuo mažesnę kontaktinę jėgą. Dinaminės jėgos, veikiančios iešmą skersine kryptimi, iš dalies sugeriamos prispaustų elastingų tarpiklių, o kitos jėgos gali būti perduodamos pabėgiams tiesiogiai per vertikalius elastingus tarpiklius. Skersinės poveikio keliui jėgos gali būti labai didelės. Būtina, kad per bėgių sąvaržas jos būtų perduodamos su prispaudimo jėga. Kitaip atsiras tokio masto papildomų inercijos jėgų, dėl kurių kelias ir iešmas gali pasislinkti. Iešmo smailės geometriją gali įtakoti iešmo smailės nuovargis ir aširačio rato geometrijos pakitimas atsirandantis dėl statinių jėgų.

Dėl bėgių riedėjimo paviršiaus nelygumų, traukiniai važiuoja dinaminio režimu, o ratų patiriamos apkrovos nėra pastovios – tai mažėja, tai didėja. Ratą veikiančios jėgos dėl laisvojo šoninio pagreičio keičiasi ir važiuojant kreive t.y. ir geležinkelio iešmu. Kelyje gali atsirasti ir horizontaliųjų jėgų – horizontaliosios jėgos gali įtakoti

deformacijų atsiradimą viršutinėje geležinkelio kelio konstrukcijoje (Shenton 1995).

Aširačio ir iešmo tarpusavio sąveiką baigtinu elementų simuliacijos metodu Kassa *et al.* (2006) ištyrė iešmo smailių plastinių deformacijų traukinio važiavimo atšakinio kelio kryptimi bei nustatė, kad kontaktinis spaudimas aširačio rato ir iešmo smailės tiesiogiai proporcingas jėgos dydžiui ir kontakto vietos pločiui.

Björn ir Pålsson (2013) atliekant tyrimus pastebėta, kad kontaktinis spaudimas didėja didėjant aširačio apkrovai. Pakitusi nuo nuovargio poveikio aširačio bei smailės geometrija, padidina iešmo smailių nusidėvėjimo intensyvumą. Tiriant problemines iešmų smailių vietas buvo modeliuojamos skirtingos iešmo smailės geometrijos. Taip ieškant patikimesnės iešmo smailės profilio geometrijos, norint padidinti iešmo smailės tarnavimo laikotarpį.

Apžvelgus mokslinius darbus pastabėta, kad mokslininkai keisdami iešmo smailės geometriją tam, kad sumažinti jos apkrovas ar atliekant smailės geometrijos dilimo dėl nuovargio matavimus neatliko tyrimų su smailių perdavimo mechanizmu (iešmo pavaros) darbu kurio paskirtis perjungti, užrakinti ir kontroliuoti iešmo padėtį. Šiam tikslui sukurtas iešmo smailių ir pavaros matematinis modelis, kuris sudarytas iš elektros variklio, pavaros reduktoriaus, krumpliaračių, velenų, krumpliatstiebio tarpusavio sąveikos su knitančios geometrijos iešmo smailėmis. Iešmo pavara ir smailės yra didelės rizikos ir pavojaus elementas galintis įtakoti eismo saugumą geležinkelio viršutine kelio konstrukcija.

Tyrimo metodika

Tyrimo metu, geležinkelio viršutinės kelio konstrukcijos elemento iešmo ir jo pavaros sąveikai buvo sukurtas matematinis modelis. Iešmo pavaros tipas „SP“.

Atliekamas dinaminių procesų tarpusavio tyrimas norint nustatyti ir išsiaiškinti Lietuvoje esančių viršutinių kelio konstrukcijos iešmo ir iešmo pavaros tarpusavio sąveiką, įvertinti pavaros darbą su kintamos geometrijos iešmo smaile.

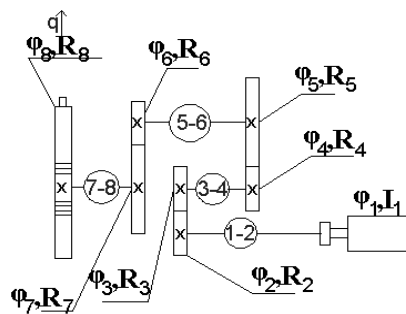
Iešmo smailės ir pavaros matematinis modelis

Tiriamą sistemą sudaro tipo iešmas su kintamos geometrijos smailėmis, taip pat Lietuvoje daugiausiai paplitusi neatlenkiamo tipo „SP“ iešmo elektros pavara su pasipriešinimo ir standumo elementais.

Sudaromas transmisijos modelis yra universalus, dėl to, kad: Lietuvos, Rusijos, Ukrainos, Baltarusijos, Latvijos, Estijos geležinkeliuose daugiausiai naudojamos „SP“ tipo elektros pavaros. Skirtingų tipų „SP“ elektros pavarose naudojami skirtingų tipų varikliai, priklausomai nuo pavaros paskirties: lėtaeigės arba greitaeigės, tai pat „SP“ tipo pavarose naudojamas skirtingų tipų reduktoriai: skirtingų tipų reduktoriuose elementų kiekis ir išdėstymas vienodas tačiau krumpliaračių dydis ir krumplių skaičius skiriasi.

Iešmas su iešmo pavara padalinamas į atskirus elementus.

Iešmo pavaros matematinis modelis. Pavaros dinaminis modelis susideda iš pasipriešinimo ir standumo elementų, kietųjų kūnų pavaizduotas (5 pav.).



5 pav. Dinaminis iešmo pavaros modelis

Elektros variklio sukimo momento kitimo lygtis:

$$\dot{M}_v = c_v(\omega_{v0} - \dot{\varphi}_1) - d_v M_v, \quad (1)$$

čia: M_v – variklio sukimo momentas; $\frac{dM_v}{dt} \equiv \dot{M}_v$; c_v, d_v

– elektros variklio charakteringi parametrai; ω_{v0} – variklio sinchroninis kampinis greitis; $\dot{\varphi}_1$ – variklio rotoriaus kampinis greitis.

$$I_1 \ddot{\varphi}_1 = M_v - k_{12}(\varphi_1 - \varphi_2) - c_{12}(\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2), \quad (2)$$

čia: c – veleno standumas, k – pasipriešinimo koeficientas.

Iešmo pavaros transmisijos matematinis modelis:

$$I_2 \ddot{\varphi}_2 = -k_{12}(\varphi_2 - \varphi_1) - c_{12}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) - k_{23}R_2(R_2\varphi_2 + R_3\varphi_3 - \Delta_{23})H(\delta_{23}) \quad (3)$$

$$I_3 \ddot{\varphi}_3 = -k_{23}R_2(R_2\varphi_2 + R_3\varphi_3) - c_{12}(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) - k_{23}R_2(R_2\varphi_2 + R_3\varphi_3 - \Delta_{23})H(\delta_{23}) - c_{23}R_3(R_2\dot{\varphi}_2 + R_3\dot{\varphi}_3)H(\delta_{23}) \quad (4)$$

$$I_4 \ddot{\varphi}_4 = -k_{34}(\varphi_4 + \varphi_3) - c_{34}(\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_3) - k_{45}R_4(R_4\varphi_4 + R_4\varphi_5 - \Delta_{45})H(\delta_{45}) - c_{45}R_4(R_4\dot{\varphi}_4 + R_5\dot{\varphi}_5)H(\delta_{45}) \quad (5)$$

$$I_5 \ddot{\varphi}_5 = -k_{45}H(\delta_{45}) \cdot R_5 - H(\delta_{45}) - c_{45}R_5(\delta_{45})H(\delta_{45}) - k_{56}(\varphi_5 - \varphi_6) - C_{56}(\dot{\varphi}_5 - \dot{\varphi}_6) \quad (6)$$

$$I_6 \ddot{\varphi}_6 = -k_{56}(\varphi_6 + \varphi_5) - c_{56}(\dot{\varphi}_6 - \dot{\varphi}_5) - k_{67}R_6(R_6\varphi_6 + R_7\varphi_7 - \Delta_{67})H(\delta_{67}) - C_{67}R_6(\delta_{67})H(\delta_{67}) \quad (7)$$

$$I_7 \ddot{\varphi}_7 = -k_{67}R_7\delta_{67}H(\delta_{67}) - c_{67}R_7\delta_{67}H(\delta_{67}) - k_{78}(\varphi_7 - \varphi_8) - c_{78}(\dot{\varphi}_7 - \dot{\varphi}_8) \quad (8)$$

$$I_8 \ddot{\varphi}_8 = -k_8(R_8\varphi_8 - q - \Delta_8) \cdot H(\delta_8) - c_8(R_8\dot{\varphi}_8 - \dot{q})R_8H(\delta_8) - k_{78}(\varphi_8 - \varphi_7) - c_8(\dot{\varphi}_8 - \dot{\varphi}_7) \quad (9)$$

$$m\ddot{q} = -(k_8(q - R_8\varphi_8 - \Delta_8) + c_8(q - R_8\dot{\varphi}_8))H(q - R_8\varphi_8 - \Delta_8) - k_8q \quad (10)$$

čia: I_i – inercijos momentai; φ_i – elementų posūkio kampai, sistemą apibendrinančios koordinatės; R_i – krumpliaračių spinduliai; $H(\delta)$ – Hevisaido funkcija; q – traukės poslinkis; Δ – krumpliaračio krumplių tarpų dydis; c_i – elementų inercijos momentai; k_i – elemento pasipriešinimo koeficientas; m – krumpliaštiebio ir smailės masė; k_s – smailės standumo koeficientas.

Pavaros lygčių sistema (1) – (10) užrašoma pirmojo laipsnio diferencialinių lygčių sistema:

$$\{\dot{Y}\} = \{F(x, t)\}, \quad (11)$$

$$\{Y\}^T = [M_v, \varphi_1, \{X\}^T, q, \varphi_1, \{\dot{X}\}^T, \dot{q}], \quad (12)$$

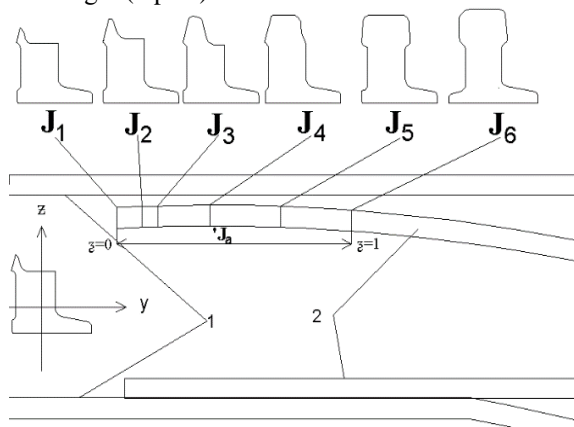
čia: $\{F(x, t)\}$ – lygčių sistemos dešinės pusės vektorius; $\{X\}$ – reduktoriaus kampų vektorius, $\{X\} = [\varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8]$.

Iešmo smailė yra kintančio profilio geometrijos, tai įtakoja iešmo smailės pasipriešinimą lenkimui naudojant „SP“ tipo elektros pavarą. Iešmo smailės profilio geometrija pavaizduota (6 pav.).

Kintamos geometrijos iešmo smailės standumas yra lygus:

$$k_s = \int_0^1 \frac{E}{L^3} \frac{d^2 N_1(z)}{dz^2} \frac{d^2 N_1(z)}{dz^2} J_s(z) dz \quad (13)$$

čia: $N_1(z)$ – pirmos eilės Ermito daugianaris; L_s – smailės ilgis; E – smailės tamprumo modulis; $J_s(z)$ – smailės skerspjūvio inercijos momentas, kuris yra kintamas išilgai smailės ilgio (6 pav.).



6 pav. Iešmo smailės profilio geometrija: 1 – rėminiai bėgiai; 2 – iešmo smailės; $J_1, J_2, J_3, J_4, J_5, J_6$ – iešmo smailės pjūvio profilio geometrija

Literatūra

- Katoh, Y; Kakegawa, H. 1977. Effects of Runner-pad under Concrete tie on Pulverization of Ballast, Vibration and Noise. *Quarterly Reports Railway Research Institute, Japanese National Railways*, Vol 18, No. 1.
- Techninio geležinkelių naudojimo nuostatai. 1996. Lietuvos Respublikos susisiekimo ministro 1996 m. rugsėjo 20 d. įsakymu Nr. 297. Vilnius.
- Shenton, M. J. 1995. Ballast deformation and track deterioration, Track technology of the next decadel. *Proceedings of a Conference organized by the Institution of Civil Engineers and held at the University of Nottingham*. Thomas Telford Ltd, London, p. 253-265.
- Knothe, K. 2001. *Track dynamics*. Ernst & Sohn. Berlin, p. 50.
- Kassa, E.; Andersson, C.; Nielsen, J.C.O. 2006. Simulation of dynamic interaction between train and railway turnout, *Vehicle System Dynamics*, 44:3, 247-258.
- Pålsson, B. A. 2013. Design optimization of switch rails in railway turnouts, *Vehicle System Dynamics*, 51:10, 1619-1639.

Smailės skerspjūvio inercijos aproksimuojamas panaudojant Lagranžo interpoliacines funkcijas yra lygus:

$$J(z) = \sum_{i=1}^6 N_s(z) J_i \quad (14)$$

čia: J_i – smailės i -tajame taške paskaičiuotas skerspjūvio inercijos momentas.

Išvados

Sukurtas universalus iešmo pavaros transmisijos matematinis modelis kuris susideda iš pasipriešinimo ir standumo elementų, kietųjų kūnų. Šis transmisijos modelis yra universalus, dėl to, kad: Lietuvos, Rusijos, Ukrainos, Baltarusijos, Latvijos, Estijos geležinkeliuose daugiausiai naudojamos „SP“ tipo elektros pavaros. Skirtingų modelių „SP“ elektros pavarose naudojami skirtingų tipų varikliai: priklausomai nuo pavaros paskirties: lėtaeigės, greitaeigės, tai pat „SP“ modelio iešmų smailių pervedimo pavarose naudojamas skirtingų tipų reduktoriai: skirtingų tipų reduktoriuose elementų kiekis ir išdėstymas vienodas tačiau krumpliaračių dydis ir krumplių skaičius skiriasi.

Sukurtas matematinis modelis įvertinus tai, kad iešmų smailės yra kintančio profilio geometrijos tai įtakoja pasipriešinimą lenkimui iešmo smailių elektros pavarą. Kaip viršutinės kelio konstrukcijos elemento dalis kuri yra riedėjimo paviršius – pastoviai veikiama aširačio ratų smailė dyla ir keičia profilio geometriją nuo to kinta smailės skerspjūvio inercijos momentas atskirame smailės pjūvyje.

Iešmai yra brangūs konstrukcijos elementai, svarbiai įtakoiantys traukinių eismo saugumą ir viršutinės kelio konstrukcijos išlaidas. Iešmai turi būti ir išdėstomi kuo palankiau atsižvelgiant į dinaminį riedmenų važiavimo pobūdį. Analizuojant kitų autorių mokslinius darbus, pastebėta, kad autoriai dažniausiai tirdami riedmens važiavimą per bėgius ar iešmą, neatliko tyrimų su riedėjimo paviršiumi kurio geometrija buvo pakitusi. Pastebėta, kad kintant iešmo smailės geometrijai kinta smailių inercijos momentas ir iešmo smailių pasipriešinimas lenkimui naudojant „SP“ tipo elektros pavarą.

Priziūrint iešmą galima užtikrinti tinkamą smailių pervedimo mechanizmo darbą kurio paskirtis perjungti, užrakinti ir kontroliuoti iešmo padėtį, išvengti iešmo pervedimo trukdžių, kurie gali įtakoti tinkamą iešmo ir iešmo pavaros darbą, kuomet įrenginiai veikia ribiniame režime ir taip užtikrinti ilgą įrenginių eksploatacijos laiką.