

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Liudas TUMONIS

ELEKTROMAGNETINĖS ŠAUDYKLĖS MECHANINĖS ELGSENOS MODELIAVIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
MECHANIKOS INŽINERIJA (09T)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2009

Disertacija rengta 2005–2009 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Mokslinis vadovas

doc. dr. Arnas KAČENIAUSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

<http://leidykla.vgtu.lt>

VGTU leidyklos TECHNIKA 1688-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-511-3

© Tumonis, L., 2009

© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2009

Liudas.Tumonis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Liudas TUMONIS

SIMULATION OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF THE ELECTROMAGNETIC RAILGUN BY FINITE ELEMENT METHOD

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
MECHANICAL ENGINEERING (09T)



Vilnius LEIDYKLA TECHNIKA 2009

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2005–2009.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Arnas KAČENIAUSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T).

Dedikuoju šią disertaciją Jolitai Mažulytei ir jos šeimai už meilę, nepaprastą gerumą, kantrybę ir palaikymą; savo tėveliams Jokūbui ir Stasei Tumoniams už meilę ir teisingą auklėjimą; mokytojui Sauliui Žilinskui už pažinimo džiaugsmą.

Dėkoju prof. Rimantui Kačianauskui už visapusišką pagalbą ruošiant šią disertaciją.

Santrauka

Disertacijoje baigtinių elementų metodu nagrinėjamas elektromagnetinės šaudyklės (EMŠ) konstrukcinių dalių mechaninis būvis, veikiant dinaminei apkrovai. Tyrimo objektas yra EMŠ „EMA-3“. Šaudyklės mechaninė dalis sudaryta iš elektrai laidžių bėgių, pritvirtintų prie dielektrinio pagrindo. Tiriama mechaninio būvio rodiklių priklausomybė nuo apkrovos pobūdžio ir šaudyklės bėgių įtvirtinimo. Šaudyklės mechaninio būvio nustatymas jos darbo metu leistų tiksliau prognozuoti jos elgseną, pagreintų projektavimą, tobulinimą ir atpigintų eksploatavimą. Disertacijos tikslas yra skaitiniais metodais aprašyti ir ištirti šaudyklės mechaninį deformavimą, veikiant dinaminei apkrovai, ištirti mechaninio būvio rodiklių priklausomybes nuo apkrovos parametrų, palyginti skirtingus apkrovų režimus. Remiantis gautais skaičiavimo rezultatais, siekiama įvertinti šių veiksmų įtaką ir teikti siūlymus režimų patobulinimui.

Darbe spręsti keli uždaviniai: sudarytas ir ištirtas „EMA-3“ šaudyklės skaitinis baigtinių elementų modelis. Pasiūlytais rodikliais įvertintas šaudyklės mechaninis būvis ir palyginta realių apkrovų įtaką bėgių deformavimui. Uždaviniai suformuluoti atsižvelgiant į esamų modelių ribotumą, į šaudyklės rezonansinę elgseną kritinio greičio aplinkoje ir į tinkamo darbinio režimo parinkimo problemą.

Disertaciją sudaro įvadas ir keturi skyriai.

Įvade apibūdėta tyrimų sritis ir aktualumas, aprašyta mokslo problema, suformuluotas darbo tikslas ir uždaviniai, paminėti naudoti tyrimo metodai, aptartas darbo naujumas ir originalumas, paaiškinta praktinė vertė, pristatyti autoriaus pranešimai ir publikacijos, disertacijos struktūra.

Pirmajame skyriuje pateikta literatūros apžvalga elektromagnetinės šaudyklės tema. Aprašyta konstrukcija, šaudyklių tipai, skaičiuojamieji modeliai, skirti mechaniniams reiškiniams analizuoti.

Antrajame skyriuje pateiktas EMŠ skaičiuojamasis BEM modelis. Aprašyti modelio sudarymo etapai ir pateikti modelio tyrimų rezultatai.

Trečiajame skyriuje pateikti rodikliai mechaniniam EMŠ būviui įvertinti, aprašyti originalūs skaitiniai EMŠ tyrimai, veikiant pastoviu greičiu judančiai apkrovai ir pateiktas mechaninio būvio rodiklių sugretinimas su kitais metodais gautais rezultatais.

Ketvirtajame skyriuje pirmą kartą ištirti ir palyginti du realūs darbiniai šaudyklės apkrovos režimai. Parodytas vieno iš tirtų režimų pranašumas.

Disertacijos tema perskaityti 2 pranešimai Lietuvos ir kitų šalių konferencijose ir paskelbti 4 straipsniai leidiniuose, referuojamuose Thomson ISI duomenų bazėje.

Abstract

The numerical analysis of electromagnetic railgun dynamics under transient load is considered in current PhD thesis. The object of investigation is electromagnetic accelerator EMA-3 at French-German institute of Sain-Louis (ISL). The aim of work covers the development of the finite element model of the EMA-3 rail gun and its application for investigation of the mechanical behaviour of railgun under differently induced loading regimes.

There are several tasks under consideration. The first one is development of the finite element model. The 2D model consisting of four node plane and elastic springs was suggested and examined. The second one is evaluation of influence particular loading to dynamic behaviour and giving of recommendations.

This thesis contains introduction, four chapters, the summary of results and conclusions, and the list of cited literature and list of publications of the author.

In introductory chapter, the problem is formulated and relevance of the work is discussed. The goals and objectives of the work, research methodology and scientific novelty, practical significance and defended propositions are briefly described. Publications and reports at conferences on the theme of dissertation are presented at the end of introduction.

The first chapter covers the review of the references on the electromagnetic railgun. It contains description of the development history, physical principles and decisive factors. Later, the gun structure is considered with the focus on the mechanic behaviour, various types. Review of computational models is mainly devoted to the finite element method. The conclusions and particular tasks of this work stemming from the review are formulated at the end of this chapter.

The finite element model of the electromagnetic railgun is considered in the second section. Model details and quality examinations tests are presented.

The third section contains description of factors used for characterisation of mechanical behaviour of the electromagnetic railgun. The original results on the railgun behaviour under action of moving load with constant velocity are presented. Comparison with other results is given.

Two experimentally measured loadings under differently induced current injections are investigated in the fourth section. The detailed comparison and analysis of advantages and shortcomings is presented. 4 reports at conferences in Lithuania and 2 reports at international conferences were presented on the theme of dissertation. 5 articles were published: 4 in journals included in Thomson ISI Web of Science list, 1 in conference materials referred in ISI Proceedings database.

Žymėjimai

Simboliai

q – apkrovos jėga, N;

u_y – skersiniai poslinkiai, m;

w – įlinkiai, m;

q – apkrovos slėgis, Pa.

Santrumpos

BE – baigtiniai elementai (baigtinių elementų);

BEM – baigtinių elementų metodas;

el. – elektros, elektrinis;

EM – elektromagnetinė;

EMŠ – elektromagnetinė šaudyklė;

l. l. – laisvumo laipsnis

n. k. – naudingumo koeficientas;

PET – paskirstytas energijos tiekimas.

Turinys

IVADAS.....	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas.....	2
Darbo tikslas.....	3
Darbo uždaviniai	3
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	4
Ginamieji teiginiai.....	4
Darbo rezultatų aprobavimas.....	4
Disertacijos struktūra.....	5
1. ELEKTROMAGNETINIŲ ŠAUDYKLIŲ IR JŲ ANALIZĖS METODŲ APŽVALGA.....	7
1.1. Trumpa kūrimo istorija.....	7
1.2. Veikimo principai.....	8
1.2.1. Taikymo sritys	10
1.2.2. Efektyvumą ribojantys veiksniai	11
1.2.3. Konstrukcijų tipai	13

1.3. Modeliavimo metodų apžvalga	16
1.3.1. Analiziniai modeliavimo metodai.....	16
1.3.2. Baigtinių elementų metodas.....	18
1.3.3. Baigtinių elementų metodo taikymai elektromagnetinių šaudyklių modeliavimui	18
1.4. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas.....	21
2. ŠAUDYKLĖS „EMA-3“ SKAITINIS MODELIS.....	23
2.1. Šaudyklės „EMA-3“ konstrukcija ir savybės	23
2.2. Skaitinis baigtinių elementų modelis.....	26
2.3. Elektromagnetinių apkrovų bendrosios savybės	28
2.4. Skaitinio modelio tyrimas.....	29
2.4.1. Baigtinių elementų tinklo tankio įvertinimas.....	29
2.4.2. Skaitinio modelio testavimas pagal kritinį greitį	31
2.4.3. Atramų diskretiškumo įtakos tyrimai veikiant statinei apkrovai	33
2.5. Antrojo skyriaus išvados	35
3. ŠAUDYKLĖS MECHANINIŲ RODIKLIŲ PRIKLAUSOMYBĖS NUO APKROVOS JUDEJIMO GREIČIO TYRIMAS.....	37
3.1. Efektinė amplitudė.....	38
3.2. Trinties rodiklis	39
3.2.1. Bematis trinties rodiklis	39
3.2.2. Deformavimo ploto skaičiavimas	41
3.3. Dinaminis sprendinys, veikiant pastovios amplitudės apkrovai, judančiai pastoviu greičiu	43
3.3.1. Bėgio efektingos amplitudės priklausomybė nuo greičio	48
3.3.2. Trinties rodiklio kitimas.....	50
3.4. Skaitinio ir natūrinio eksperimentų rezultatų sugretinimas	51
3.5. Trečiojo skyriaus išvados	52
4. ŠAUDYKLĖS DINAMINĖS SAVYBĖS VEIKIANT REALIOMS APKROVOMS	53
4.1. Elektromagnetinės šaudyklės „EMA-3“ darbiniai apkrovos režimai	53
4.1.1. Maitinimo bėgio pradžioje režimas ir bėgi veikiančios apkrovos55	
4.1.2. Skaitiniai EMŠ modeliavimo BEM įprastuoju apkrovos režimu rezultatai	56
4.1.3. Paskirstyto energijos tiekimo režimas	57
4.1.4. Skaitiniai EMŠ modeliavimo BEM PET apkrovos režimu rezultatai	60
4.2. Skirtingų apkrovos režimų palyginimas	61
4.2.1. Poslinkių kitimo palyginimas	61

4.2.2. Dinamiškumo koeficiento palyginimas	63
4.2.3. Efektinės amplitudės palyginimas	64
4.2.4. Trinties rodiklio palyginimas.....	65
4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados	66
BENDROSIOS IŠVADOS.....	67
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	69
AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS.....	73
PRIEDAI.....	75
A priedas. Apkrovų skaičiavimo programa „Apkrovos“	75
B priedas. Dvimačių poslinkių grafikų vaizdavimo programa.....	75

Contents

INTRODUCTION.....	1
Problem formulation.....	1
Topicality of the problem.....	2
The object of investigations	2
Aim of the work	3
Tasks of the work	3
Methodology of research.....	3
Scientific novelty.....	3
Practical value	4
Defended propositions.....	4
Approval of the results	4
The scope of the scientific work.....	5
1. REVIEW OF ELECTROMAGNETIC RAILGUNS AND ANALYSIS	
METHODS.....	7
1.1. Developement history.....	7
1.2. Working principles	8
1.2.1. Application area.....	10
1.2.2. Efficiency limitation	11
1.2.3. Construction types	13

1.3. Review of modelling methods.....	16
1.3.1. Analytical methods	16
1.3.2. Finite Element Method	18
1.3.3. Applications of the Finite Element Method to railguns	18
1.4. Summary. Formulation of the tasks.....	21
2. NUMERICAL MODEL OF THE EMA-3.....	23
2.1. EMA-3 railgun.....	23
2.2. The numerical Finite Element model	26
2.3. Common properties of electromagnetic loads	28
2.4. Validation of the FE model	29
2.4.1. Evaluation of mesh density.....	29
2.4.2. Validation of model by critical velocity	31
2.4.3. Influence of discrete supports	33
2.5. Conclusions for Chapter 2	35
3. INVESTIGATION OF VELOCITY DEPENDENT MECHANICAL BEHAVIOR	37
3.1. Effective amplitude	38
3.2. Friction factor	39
3.2.1. Dimensionless friction factor.....	39
3.2.2. Computation of the deformation area	41
3.3. Dynamic solution under loading with constant velocity	43
3.1.1. Dependence of effective amplitude on loading velocity.....	48
3.2.3. Variation of friction factor.....	50
3.4. Comparison of the numerical and experimentally obtained results.....	51
3.5. Conclusions for Chapter 3	52
4. CHARACTERIZATION OF DYNAMIC BEHAVIOR UNDER REAL LOADINGS	53
4.1. Working regimes of the EMA-3 railgun.....	53
4.1.1. Breech-feed regime and loadings acting on the rail.....	55
4.1.2. Results of numerical FE modelling for breech-feed regime	56
4.1.3. Distributed Energy System regime	57
4.1.4. Results of numerical FE modelling for DES regime	60
4.2. Comparison of loading regimes.....	61
4.2.1. Comparison of displacements.....	61
4.2.2. Comparison of dynamic coefficient.....	63
4.2.3. Comparison of effective amplitude.....	64
4.2.4. Comparison of the friction factor.....	65
4.3. Conclusions for Chapter 4	66

GENERAL CONCLUSIONS.....	69
REFERENCES.....	69
LIST OF THE AUTHOR’S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION.....	73
ANNEXES.....	31
Annex A. Software code for calculation of loads.....	75
Annex B. Code for two-dimension visualisation of displacement histories.	75

Ivadas

Problemos formulavimas

Šiuo metu sparčiai vystantis kosmoso, gynybos, branduolinės energetikos ir superdidelių slėgių tyrimo sritims, vis aktualesniais tampa naujų, ypač tvirtų medžiagų paieška, modernių gynybos priemonių kūrimas. Itin svarbūs šiuo atveju pasidaro sukurtų naujų medžiagų natūriniai bandymai. Jie leidžia greičiau pritaikyti naujas technologijas modernių prietaisų sukūrimui. Nauji termobranduolinės energetikos, didelių slėgių tyrimų ir gynybos poreikiai reikalauja naujų kokybiškų prietaisų.

Šiems tikslams vis dažniau naudojami mechatroniniai įrenginiai, vadinami elektromagnetinėmis šaudyklėmis (EMŠ). Šie modernūs įrenginiai naudojami įvairiose technikos ir mokslo srityse. Siekiant pagerinti jų darbą, EMŠ nuolat tobulinamos.

Įvairiose mokslo ir technikos srityse šiuo metu yra populiarūs skaitiniai tyrimų metodai, kurie leidžia modeliuoti įvairius reiškinius, kartoti skaitinį eksperimentą reikiamą kartų skaičių, keisti jo sąlygas. Tai ekonomiškai racionaliau, nes nereikalinga brangi eksperimentų įranga. Skaitinis eksperimentas nekelia pavojaus aplinkai ir personalui. Vienas labiausiai paplitusių skaitinių metodų yra baigtinių elementų metodas (BEM), plačiai taikomas inžinerijoje. Projektuojant EMŠ, BEM taikomas elektromagnetiniams, termoelektriniams ir

mechaniniams reiškiniams modeliuoti. Dažniausiai modeliuojami statiniai reiškiniai. Kadangi EMŠ vyksta intensyvūs dinaminiai mechaniniai reiškiniai, statinis reiškinų modeliavimas neatspindi tikros EMŠ elgsenos.

Dinaminis modeliavimas, analizuojant EMŠ mechaniką iki šiol buvo atliekamas pasitelkus tradicinius lenkiamų strypų baigtinius elementus (BE) ir analizes išraiškas. Deja, tokiu atveju lieka neatsakyta į tokius klausimus, kaip atramų ir apkrovos režimų įtaka EMŠ mechaninei elgsenai. Dinaminis mechaninių reiškinų EMŠ modeliavimas kontinuumo baigtiniais elementais, leidžiančiais tiksliau aprašyti konstrukciją, apkrovas ir kt., suteikia daugiau informacijos apie mechaninį EMŠ būvį jos darbo metu, leistų tiksliau prognozuoti elgseną, pagreintų projektavimą, tobulinimą ir atpigintų eksploatavimą.

Taigi, disertacijoje numatoma baigtinių elementų metodu nagrinėti EMŠ mechaninį deformavimą veikiant dinaminei apkrovai, siekiant atskleisti šaudyklės dinaminę elgseną, nustatyti pavojingus būvius ir juos lemiančius veiksnius.

Darbo aktualumas

Viena pagrindinių elektromagnetinės šaudyklės (EMŠ) kokybę lemiančių veiksnių yra jos konstrukcija, kuri pritaikyta atlaikyti didelius elektros srovės srautus ir dinamines apkrovas. EMŠ gebėjimo atlaikyti mechanines apkrovas ir elgsenos prognozė darbo metu yra aktualus klausimas tiriant ir projektuojant šaudyklės ir gerinant jų savybes. Iki šiol darbai, nagrinėjantys EMŠ mechaninį būvį, apsiribojo tradicinių lenkiamų strypų baigtinių elementų modeliais ir analizinėmis išraiškomis. Tai rodo nepakankamą EMŠ mechaninės elgsenos jos darbo metu ištyrimą.

Teorinėmis žiniomis pagrįstas šaudyklės elgsenos modeliavimas yra sudėtingas ir svarbus, padedantis pažinti ir kurti naujus arba patobulinti esamus įrenginius.

Tyrimų objektas

Šios disertacijos tyrimų objektas – EMŠ „EMA-3“, įrengta Prancūzijos ir Vokietijos tyrimų institute ISL (Institute of Saint-Louis).

Baigtinių elementų metodu nagrinėjamas EMŠ konstrukcinių dalių dinaminis mechaninis būvis veikiant dinaminei apkrovai. Tirama būvio

mechaninių rodiklių priklausomybė nuo apkrovos pobūdžio ir bėgių įtvirtinimo. Remiantis skaičiavimų rezultatais, siekiama įvertinti šių veiksnių sąryšį ir teikti siūlymus įrenginio darbinių režimų patobulinimui.

Darbo tikslas

Šio darbo tikslas yra skaitiniais metodais aprašyti ir ištirti „EMA-3“ šaudyklės mechaninį deformavimą veikiant dinaminei apkrovai, ištirti mechaninio būvio rodiklių priklausomybes nuo apkrovos parametrų, palyginti skirtingus apkrovų režimus. Remiantis tyrimų rezultatais, siekiama įvertinti šių veiksnių įtaką ir teikti siūlymus apkrovos režimų patobulinimui.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Sudaryti ir ištirti „EMA-3“ šaudyklės skaitinį BE modelį.
2. Pasiūlyti rodiklius EMŠ dinaminei elgsenai apibūdinti ir jais vertinti mechaninį būvį.
3. Palyginti apkrovos režimų įtaką šaudyklės bėgių deformavimui, apibendrinti skaitinius rezultatus.
4. Sukurti pasiūlytų metodikų įgyvendinimo algoritmus ir jų kompiuterines realizacijas.

Tyrimų metodika

Darbe panaudoti šie tyrimų metodai: skaitinė analizė ir baigtinių elementų metodas, taikomi mechanikos inžinerijoje. Taip pat naudoti pusiau analiziniai, duomenų analizės, sintezės metodai ir lyginamoji analizė.

Darbo mokslinis naujumas ir jo reikšmė

Rengiant disertaciją gauti šie mechanikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Detaliai ištirta mechaninė EMŠ „EMA-3“ elgsena darbo metu.

2. Šaudyklės bėgių elgsenai tirti pasiūlyti du rodikliai: trinties jėgų rodiklis, įvertinantis apkrovos jėgą, bėgio paviršiaus nelygumą, bėgių deformaciją, apkrovos dinamiškumą; efektinės amplitudės rodiklis, išreiškiantis statinio ir dinaminio būvių skirtumus.
3. Nustatyta diskretinių atramų įtaka EMŠ mechaninio būvio rodikliams.
4. Sukurtos originalios programos, skirtos automatizuotai paruošti duomenis, analizuoti rezultatus, rodikliams skaičiuoti, rezultatus grafiškai apipavidalinti.
5. Lyginant skirtingus EMŠ apkrovos režimus ištirta šaudyklės dinaminė elgsena veikiant realioms apkrovoms, pagrįsti paskirstyto energijos tiekimo režimo pranašumai.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimų rezultatai gali būti taikomi projektuojant naujas elektromagnetines šaudykles arba tobulinant esamas, ieškant optimalių ir efektyvių darbo režimų.

Ginamieji teiginiai

1. Dvimatis elektromagnetinės šaudyklės „EMA-3“ baigtinių elementų modelis, atspindintis jos konstrukciją. Sukurtas modelis yra pranašesnis už žinomus analizinius ir skaitinius vienmačius modelius, nes įvertina diskretinių atramų įtaką. Skaičiavimais nustatytas bėgio mechaninis būvis sutampa su analiziniais teoriniais ir su eksperimentiniais rezultatais.
2. Pirmą kartą gauti palyginamieji realių apkrovų dinaminio poveikio į šaudyklės bėgius rezultatai.
3. Sukurtos originalios programos, skirtos automatizuotai ruošti pradinius duomenis, analizuoti rezultatus ir grafiškai juos apipavidalinti.

Darbo rezultatų apibavimas

Disertacijos tema publikuoti 4 moksliniai straipsniai žurnaluose, referuojamuose Thomson ISI duomenų bazėje (Tumonis ir kiti 2007a, 2007b,

2009a, 2009b) ir vienas straipsnis (Tumonis 2008) – tarptautinės konferencijos medžiagoje, referuojamoje Thomson ISI duomenų bazėje.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti dviejose tarptautinėse mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

Tarptautinėje konferencijoje „*Mechatronic Systems and Materials*“, 2007 m., Kaune.

Tarptautinėje konferencijoje „14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology“ 2008 m., Victoria, BC, Kanadoje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas ir keturi skyriai. Taip pat yra du priedai.

Darbo apimtis yra 93 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudota 30 numeruotų formulių, 41 paveikslas ir 3 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 66 literatūros šaltiniai.

Įvade apibrėžta tyrimų sritis ir aktualumas, aprašyta mokslo krypties problema, suformuluotas darbo tikslas ir uždaviniai, paminėti naudoti tyrimo metodai, aptartas darbo naujumas ir originalumas, paaiškinta praktinė vertė, pateiktas autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema.

Pirmajame skyriuje pateikta literatūros apžvalga elektromagnetinės šaudyklės tema. Aprašyta konstrukcija, šaudyklių tipai, skaičiuojamieji modeliai, skirti mechaniniams reiškiniams analizuoti.

Antrajame skyriuje pateiktas EMŠ skaičiuojamasis BEM modelis. Aprašyti modelio sudarymo etapai ir pateikti modelio tyrimų rezultatai.

Trečiajame skyriuje pateikti rodikliai mechaniniam EMŠ būviui įvertinti, aprašyti originalūs skaitiniai EMŠ tyrimai, veikiant pastoviu greičiu judančiai apkrovai ir pateiktas mechaninio būvio rodiklių sugretinimas su kitais metodais gautais rezultatais.

Ketvirtajame skyriuje pirmą kartą ištirti ir palyginti du realūs darbiniai šaudyklės apkrovos režimai. Parodytas paskirstyto energijos tiekimo pranašumas.

Elektromagnetinių šaudyklių ir jų analizės metodų apžvalga

Skyriuje apžvelgiama elektromagnetinė šaudyklė, trumpa jos kūrimo istorija, pritaikymo sritys. Aprašyti šaudyklės kokybę ribojantys veiksniai, mechaninių reiškinių analizės metodai. Didžiausias dėmesys skiriamas mechaninei EMŠ daliai – vamzdžiui, ir su juo susijusių mechaninių reiškinių analizei.

1.1. Trumpa kūrimo istorija

Mintis panaudoti elektros energiją kūnams greitinti vietoj cheminio kuro (pvz., parako) nėra nauja. Pirmosios žinios apie bandymus sukurti elektromagnetinę šaudyklę siekia dar XIX a., nes 1844 metais Benningfield'as reklamavo įrenginį „SIVA“ arba „DESTROYER“, kuris pasak jo, turėjo sukelti revoliuciją mūšio lauke. Tai stebėtinas įvykis, nes tuo metu dar nebuvo paskelbta Lorencio teorija, kuri pasirodė tik 1878 m. Taigi, revoliucija neįvyko, o kur dingo ponas Benningfield'as ir jo elektrinis pabūklas – nežinoma (Railguns from the late 1800s to 1980).

Po to ėjo trumpi, bet produktyvūs EMŠ tyrinėjimo etapai, vykdyti garsių išradėjų 1901 m. (Birkeland, Norvegijoje) ir 1917 m. (Fauchon-Villaplee, Prancūzijoje) (McNab ir kiti 2005). Praėjus maždaug šimtui metų po Benningfield'o pranešimo – 1944 metais Joachim Hansleris (Joachim Hänsler), sukūrė pirmąją veikiančią EMŠ, kuri gebėjo 10 g masės kulka pagreitinti iki 1000 m/s. Hanslerio sukurta šaudyklė kaip energijos šaltinį naudojo baterijų energiją. Po Hanslerio išradimo, EMŠ tobulėjo lėtai, kol XX a. šeštajame dešimtmetyje buvo pradėti sparčiai tobulinti.

Nuo 1972 metų didelis dėmesys sutelktas į tiesinius elektrinius variklius (Kolm ir kiti 1980). Jų tobulinimą stabdė tai, kad nebuvo sukurta didelės galios nuolatinės elektros srovės šaltinių. Kiek vėliau sukurti homopoliariniai generatoriai (Weldon ir kiti 1974), ir kompulsatoriai (Gagnon ir kiti 1976) leido toliau tobulinti tiesinius variklius.

Pagrindinis proveržis įvyko nuo XX a. devintojo dešimtmečio vidurio. Tuo metu imta kas du metus organizuoti tarptautinę konferenciją (International EML symposium), skirtą EMŠ problemoms nagrinėti.

1.2. Veikimo principai

Elektromagnetinė šaudyklė yra sąlyginai paprastas elektromechaninis įrenginys. Jis skirtas įgreitinti kulkoms iki labai didelių greičių. Pasiekiamų kulku greičių intervalas svyruoja 1–10 km/s ribose. Tai žymiai daugiau, nei įprastais pabūklais pasiekiamas kulku greitis. Elektromagnetinės šaudyklės mechaninė dalis sudaryta iš dviejų elektrai laidžių bėgių, pritvirtintų prie elektrai nelaidaus korpuso. Korpusas suvaržomas varžtais arba laminuojamas. EMŠ skersinis pjūvis parodytas (1.1 pav., a).

Pats EMŠ veikimo principas paremtas Lorencio dėsnio. Elektrai laidūs šaudyklės bėgiai prijungti prie elektros srovės šaltinio. Kai tarp bėgių įstumama kulka su elektrai laidžiais dalimi (inkaru), elektros grandinė uždaroma, ir ja ima tekėti srovė (1.1 pav., b). Sąveikaujant bėgių aplinkoje atsiradusiam magnetiniam laukui ir kulkos inkaru tekančiai elektros srovei, atsiranda elektromagnetinė Lorencio jėga, lygiagreti bėgiams. Ši jėga greitina kulka, o jos dydis (Cowan 1993):

$$F = L' I^2 / 2, \quad (1.1)$$

čia L' – bėgio induktyvumo gradientas [H/m]; I – tekančios bėgiais ir kulkos inkaru srovės stipris.

Daugelio laboratorijose naudojamų EMŠ bėgių L' svyruoja (0,3 – 0,55) $\mu\text{H/m}$ ribose. Dažniausiai naudojamas el. srovės stipris I kinta (10^5 – $3 \cdot 10^6$) A ribose (Haugh 1995).

Kulkos greičio didėjimo šaudyklėje priklausomybė:

$$v(t) = \frac{1}{m} \int \frac{L' I^2}{2} dt, \quad (1.2)$$

o nueitas atstumas vamzdyje nuo šūvio pradžios (Yun 1999) skaičiuojamas taip:

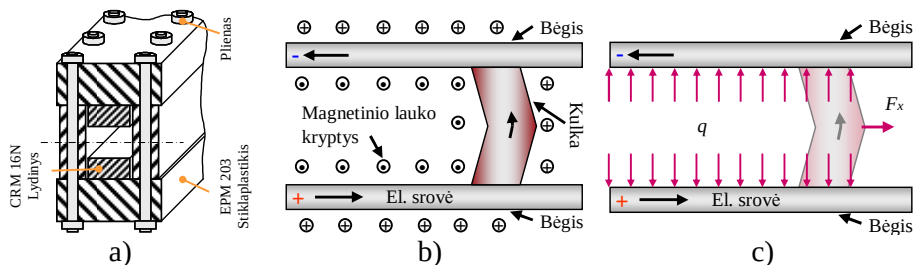
$$x(t) = \frac{1}{m} \iint \frac{L' I^2}{2} dt dt. \quad (1.3)$$

Iš Lorencio dėsnio gauname, kad elektromagnetinės jėgos veikia ne tik kulka, bet ir bėgius. Jos yra statmenos bėgių paviršiui ir nukreiptos į išorę (1.1 pav., c). Šios jėgos vadinamos skečiančiosiomis jėgomis (Peter ir kiti 1995). Skečiančiųjų jėgų F_y intensyvumas:

$$\frac{F_y}{x} = \frac{1}{2} \frac{\partial L'}{\partial y} I^2, \quad (1.4)$$

čia x – atstumas nuo bėgių (el. srovės maitinimo taško) pradžios iki kulkos.

Skečiančioji jėga susidaro tik toje bėgių dalyje, kurioje teka elektros srovė, todėl slystant kulakai, bėgių apkrovimas kinta.



1.1 pav. Elektromagnetinė šaudyklė: a) skersinis pjūvis; b) principinė veikimo schema; c) veikiančios jėgos

Fig. 1.1. Illustration of railgun: a) cross-section; b) principal scheme; c) acting loads

Norint pagreitinti 100 g eilės masės kulka iki 2 km/s greičio, reikalinga apie 2 MA stiprio el. srovė. Tekėdama bėgiais tokio stiprio elektros srovė sukuria apie 20 MN/m dydžio išskirstytas skečiančiąsias jėgas (Lehmann ir kiti 2005). Kad atlaikytų šį jėgų poveikį, korpusas yra suvaržomas varžtais arba laminuojamas.

Kad korpuse neatsirastų parazitinių el. srovių, mažinančių šaudyklės našumą, korpusas gaminamas iš dielektrinės medžiagos.

Neatsiejama EMŠ dalis yra elektros energijos talpyklos. Energijos talpyklos turi ne tik sukaupti apie 6 MJ el. energijos kiekius, bet ir per labai trumpą laiką (3 ms eilės) atpalaiduoti šią energiją, t. y., pasižymėti didele galia. Kadangi įprasti akumulatoriai ar baterijos pasižymi labai ilgu energijos atpalaidavimo periodu, jie visiškai netinka. Maitinti EMŠ naudojami elektriniai kondensatoriai, magnetinės ritės ar kompulsatoriai (Weldon ir kiti 1974), kurie pasižymi didele galia. Deja, šių elementų sukaupiamos el. energijos tūrinis tankis yra labai žemas (Marshall 2001). Reikiamų techninių rodiklių talpyklos turi užimti santykinai didelį tūrį, palyginus su pačia šaudykle, todėl jos yra viena brangiausių EMŠ sistemos dalių. Šis faktas riboja praktinį EMŠ taikymą gynybos ir kitose srityse. EMŠ veikimo principas ir joje atsiradusių jėgų savybės nulemia savitą šaudyklės konstrukciją. Norint užtikrinti kokybišką šaudyklės darbą, ji turi tenkinti griežtas konstrukcijos standumo ir stiprumo sąlygas. Tam reikia žinoti šaudyklės mechaninį būvį ir ją veikiančias mechanines apkrovas.

1.2.1. Taikymo sritys

Viena pagrindinių numatomų EMŠ taikymo sričių – gynybos tikslai. Vienas iš potencialių taikymų – karo laivuose įrengtos EMŠ, ateityje pakeisiančios įprastus pabūklus (patrankas). Jų privalumas prieš tradicinius ginklus yra žymiai didesnis sviedinio greitis (2–3 km/s), kuris viršija įprastoje ginkluotėje pasiekiamą sviedinių greitį (McNab ir kiti 2005). Dėl šios priežasties, ženkliai padidėja sviedinio kinetinė energija, griaunamoji galia, sutrumpėja sviedinio skridimo laikas iki taikinio (padidėja pataikymo tikimybė), ir pabūklo veikimo spindulys. Naudojant EMŠ, atsisakoma iš esmės nesaugių ir nestabilių, greitai užsiliepsnojančių ar sprogstančių cheminių reagentų (Haugh 1995).

Be taikymo gynybos reikmėms, EMŠ reikalingos ir kitose mokslo ir technikos šakose, tokiose kaip ypatingai didelio slėgio tyrimai (Hivley, Condit 1991), kosmoso pramonė ar termobranduolinės sintezės tyrimai.

Nuo pat pirmųjų skrydžių į kosmosą inžinieriai pradėjo kurti palydovų išorinio apvalkalo medžiagas, kurios apsaugotų šių aparatų elektroninę įrangą tiek nuo atšiaurių kosmoso sąlygų, tiek nuo žalingo kosmoso dulkių (mikrometeoritų) poveikio. Šios dulkės, esančios Saulės sistemoje nuolat bombarduoja Žemę. Didelis jų kiekis reiškia, jog bet koks objektas, skriejantis orbitoje, neišvengiamai susidurs su jomis. Šių susidūrimų žalos įvertinimas yra svarbus kosmoso pramonei. Natūriniai bandymai, kai apsauginė medžiaga tiesiogiai veikiama orbitoje, yra pernelyg brangūs ir ilgai trunka, todėl pasitelkiamos EMŠ. Jos naudojamos mikrometeoritų smūgių į apsaugines medžiagas pasekmių tyrinėjimui, kai taikinį smūgiuoja 10^{-4} – 10^{-7} g masės

dalelės, įgreitintos iki 11 km/s. EMŠ privalumai atliekant tokius eksperimentus yra akivaizdūs: tai pigumas, greitumas, valdoma eksperimento aplinka (Upshaw, Kajs 1991). Panašiai tiriami įvairūs gynybiniai šarvai (neperšaunamos liemenės ir kt.).

Valdoma termobranduolinė sintezė yra ateities energetikos viltis. Šiuose tyrimuose naudojamas ciklinis vandenilio izotopų gniutulėlių transportavimas į magnetiškai izoliuotą plazmą yra plačiai taikoma priemonė. Ji leidžia efektyviai palaikyti nuolatinę termobranduolinę sintezę. Šiam tikslui taip pat naudojamos EMŠ. Šaudyklių pagalba termobranduolinio kuro gniutulėliai į plazmą, kurioje vyksta sintezė, išaunami apie 10 km/s greičiu, o šūvių pasikartojimo dažnis viršija 10 s^{-1} (Tompkins ir kiti 1995). Taikant EMŠ išsprendžiami du svarbūs uždaviniai: sumažinama arba pašalinama šaudyklės sienelių erozija; pasiekiamas reikiamas gniutulėlio greitinimas. Šios dvi savybės užtikrina ilgalaikį ir efektyvų EMŠ naudojimą.

1950 metais žymus fantastas Arturas Klarkas pasiūlė kosminius aparatus į kosmosą siųsti naudojant elektromagnetinę šaudyklę (Clarke 1950). Deja, net ir dabar, pasiekti sviedinio greitį, viršiantį 7,5 km/s ir krovinio kinetinę energiją, viršijančią 10 GJ, yra gana sunkus, bet pasiekiamas technologinis iššūkis. Kuriamos įvairios EMŠ taikymo kosminių aparatų paleidimui į kosmosą koncepcijos, tokios, kaip UTSTAR, kuri turi daug pranašumų, lyginant su kitomis koncepcijomis. Pagrindiniai projektiniai UTSTAR rodikliai: krovinio masė 1 t; aparato greitis 7,5 km/s; kinetinė energija 35 GJ; sistemos n. k. 80 %; bėgių ilgis 1,6 km; šūvio trukmė 0,43 s. Vienas svarbiausių tokios EMŠ privalumų – paleidimo kaina, kuri neturėtų viršyti 600 JAV dolerių/kg, kai tuo tarpu kosminio keldo „Space Shuttle“ išvedimo į kosmosą kaina viršija 20000 JAV dolerių/kg (McNab 2003). Tyrimai šia kryptimi toliau plėtojami.

Platus EMŠ taikymas tik prasideda. Ateityje šie įrenginiai bus naudojami tiek paminėtose srityse, tiek daugelyje kitų mokslo ir pramonės sričių.

1.2.2. Efektyvumą ribojantys veiksniai

Elektromagnetinių šaudyklių, kaip mechatroninių didelės galios įrenginių, našumą (n. k., kulkos greitį) įtakoja įvairūs susieti fiziniai reiškiniai, konstrukcinės ypatybės ir medžiagų savybės. Pagrindiniai veiksniai, ribojantys EMŠ efektyvumą – didelis bėgių ir kulkos inkaro kaitimas, bėgio paviršiaus ėsdinimas, el. kontakto netekimas šūvio metu, didelės trinties jėgos, bėgio ir korpuso mechaniniai ir terminiai pažeidimai.

EMŠ efektyvumas priklauso nuo tokių veiksnių: el. impulso formavimo tinklo: energijos šaltinių, perjungiklių, jungčių kokybės, varžos, įkrovimo įtampos; srovės maitinimo režimų; bėgių formos: induktyvumo gradiento, srovės pasiskirstymo; mechaninės konstrukcijos, apkrovų pasiskirstymo, parazitinių el.

srovių. Kadangi šaudyklės našumo priklausomybė yra daugiaparmetrinė, nėra auksinės taisyklės, pagal kurią vienareikšmiškai būtų galima optimizuoti EMŠ. Įvairūs parametrai veikia kartu, arba slopina vienas kitą (Lehman ir kiti 1995).

ISL 3 MJ EMŠ nuostoliai įvairiose sistemos dalyse pateikti 1.1 lentelėje (Wey, Lehman, Peter 1995).

1.1 lentelė. Tipiniai energijos nuostoliai šaudyklėje

Table 1.1. Typical energy losses in railgun

Sistemos dalis	Nuostoliai, %
Energijos tiekimas ir kabeliai	34
Jungtys	22
Bėgiai	10
Kinetinė energija	15
Nuostoliai kulkoje ir kontakte	12
Likutinė magnetinio lauko energija	7
Visa energija	100

Iš Lorencio dėsnio gaunama, kad teoriškai didžiausias galimas kulkos greitis yra artimas šviesos greičiui c . Ankstyvaisiais EMŠ vystymosi metais pasiektas 6 km/s greitis teikė vilčių, kad nesudėtinga pasiekti 15–30 km/s greitį. Detalūs tyrimai parodė, jog didesnį, nei 6 km/s greitį riboja abliacija, šiluminė radiacija, trinties jėga ir antrinių elektros lankų formavimasis (Pyatt, McNab 1993). Kulkos elektrinis inkaras yra kritinė sistemos dalis. Per ją teka visa el. srovė. Kontakto tarp šepetėlių ir bėgio kaitimas atsiradęs dėl el. nuostolių ir trinties, gali išlydyti šią sritį; kietas kontaktas pereina į skystą ar plazminį kontaktą, o atsiradęs el. lankas skatina medžiagos pernašos reiškinius. Šio kontakto būvio pasikeitimo rezultatas yra padidėjęs kontakto ir bėgio dėvėjimasis (Gallant, Lehmann 2005). Kulkos greitį taip pat riboja ir dėl dinaminių mechaninių reiškinių viršijama stiprumo riba. Medžiagos mechaninis atsparumas mažėja kylant temperatūrai. Trintis yra vienas šilumos šaltinių (Weldon 1989). Įprastinėms medžiagoms, šis ribinis kontaktuojančių paviršių reliatyvus greitis yra apie 1 km/s. Jis riboja inkarų iš įprastų medžiagų naudojimą EMŠ. Šis greitis mažas dėl plono paviršinio magnetinio sluoksnio, labai didelio srovės tankio, nuo kurio priklauso elektriniai nuostoliai (Shvetsov, Stankevich 2001). Paviršinės bangos forma, vietinis kontakto slėgis ir kiti reiškiniai dar labiau sustiprina šiuos minėtus reiškinius (Meger ir kiti 2005). Vis gi, esminė kietakūnių inkarų suirimo priežastis yra per didelis šilumos kiekis, atsiradęs dėl elektrinių nuostolių (el. varžos), išsiskiriantis bėgio-inkaro kontakto aplinkoje (James 2003).

Tvirtesnės kulkos turi mažesnę pasipriešinimą greitiniui, nei minkštos. Plastmasinės kulkos išsiplečia labiau, nei metalinės ir įstrigusios vamzdyje

stabdo tolesnį greitėjimą (Peterson ir kiti 1984). Pritaikius daugiasluoksnius inkarus, kulkos greitis gali padidėti 2 – 3,5 kartų (Shvetsov, Stankevich 1997).

Šie trūkumai yra bendri visoms esamoms EMŠ. Tai paskatimo imtis kurti naujos kartos EMŠ (Kareev ir kiti 2001), siekiant mažinti paminėtų veiksmų įtaką.

1.2.3. Konstrukcijų tipai

Pasaulyje sukurta įvairių konstrukcijų EMŠ, pritaikytų skirtingiems tikslams. Kiekvieno tipo šaudyklės sukurtos taip, kad sumažintų atitinkamų žalingų veiksmų, mažinančią jų efektyvumą, įtaką.

Kulkos inkarui skiriamas didelis dėmesys, nes jis tiesiogiai kontaktuoja su bėgiais ir šio kontakto aplinkos savybės įtakoja kitas EMŠ savybes (Meger, Cooper, Jones ir kiti 2005). EMŠ pagal naudojamą kulkos el. inkaro tipą yra skirstomos į dvi grupes:

- inkaras yra elektrai laidus plazma, savo slėgiu greitinanti kulka;
- inkaras yra elektrai laidus kieta medžiaga.

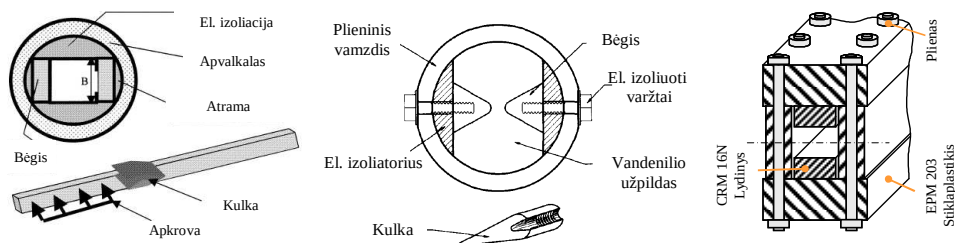
Pirmosios grupės inkarai nebus toliau nagrinėjami, nes disertacijoje nagrinėjama šaudyklė naudoja kulkas su antrajai grupei priskiriamais el. inkarais. Antrosios grupės inkarai skirstomi į keletą pogrupių: pagal konstrukciją – inkarai pagaminti iš vienalytės medžiagos, iš plokštelių, vielos šepetėlių, kelių medžiagų sluoksnių; pagal formą – į „C“ pavidalo, cilindro, stačiakampio gretasienio ar šepetėlių (Schneider, Schneider 2007).

Metalinių inkarų pranašumas prieš plazminius – maža el. varža, mažesnė bėgių erozija, galimybė tolygiai paskirstyti srovę ir greitinančias jėgas visame inkaro tūryje, o taip pat efektyviai greitinanti kulkas, kurių ilgio ir kalibro santykis didesnis už 40 (Lehmann, Vo, Wenning 2005).

Metalinio inkaro efektyvumas yra pats didžiausias, nes įtampos kritimas tarp bėgio ir inkaro yra pats mažiausias iš visų inkarų tipų. Kietakūniai inkarai daromi kreivi tam, kad Lorencos skeičiančios jėgos prispaustų kreivą inkarą prie bėgių ir sukurtų reikiamo stiprumo mechaninį kontaktą (Marshall 2001).

Judant kulka labai dideliu greičiu, ji ima stipriai sąveikauti su išsikreivinusiu, deformuotu bėgio paviršiumi. Ši stipri ir intensyvi sąveika iššaukia reikšmingus kontakto slėgio pokyčius. „C“ formos inkaro privalumas – jis geriau, nei kitų konstrukcijų inkarai, sugeba prisitaikyti prie bėgio paviršiaus kitimo (Johnson, Moon 2007). Kai inkaras sudarytas iš metalinės vielos šepetėlių, padaugėja individualių kontaktų skaičius ir tai leidžia ilgesniam laikotarpiui užtikrinti kokybiškesnį el. kontaktą, padidinant slenkstinį greitį, nuo kurio bėgio-inkaro kontakto zonoje ima formuotis elektros lankai. Gerai sukonstruotas inkaras yra inkaras, kuris kuo ilgiau šūvio eigoje išlaiko gerą elektrinį kontaktą (Haugh 1995).

Ne mažiau svarbi yra bėgio ir korpuso forma. Skirtingai nuo įprastinių pabūklų, kuriuose veikia ašiai simetriškos jėgos, EMŠ bėgius veikia ašiai nesimetriškos jėgos. Jos labiau sukoncentruotos bėgių, korpuso ir jį varžančių atramų kryptimi. Taip pat, konstrukciją veikia dinaminės apkrovos. Kadangi skirtingos EMŠ dalys skirtingai apkrautos, EMŠ neįmanoma pagaminti iš vienos medžiagos. Dėl šios priežasties EMŠ konstrukcija laikoma sudėtinga (Tzeng 2005). Daugelis veikiančių EMŠ yra įrengtos laboratorijose, kuriose konstrukcija sustandinta neatsižvelgiant į šaudyklės masę, tačiau tokių EMŠ konstrukcinės dalys nesudėtingai ir greitai pakeičiamos (Werst ir kiti 2005). Šaudyklei, skirtai eksploatuoti lauko sąlygomis, tiek vamzdžio išilginis standumas, tiek masė yra aktualūs rodikliai. Priklausomai nuo reikalavimų, sukurta įvairių konstrukcijų EMŠ vamzdžių. Keletas jų tipų parodyti 1.2 pav.



1.2 pav. Įvairūs elektromagnetinių šaudyklių konstrukcijų tipai

Fig. 1.2. Various types of railgun structures

Egzistuoja pagrindinės dvi tyrinėtojų stovyklos, naudojančios stačiakampio ir apvalaus skerspjūvių EMŠ vamzdžius. Daugiaparametrinė analizė rodo, kad stačiakampio pavidalo kiaurymės turinčios EMŠ labiausiai tinka laboratorinėms šaudyklėms (Marshall 1999). Šaudyklė su stačiakampio skerspjūvio bėgiais pasižymi tolygesne bėgių apkrova, nes jų paviršius statmenas elektromagnetinėms apkrovoms.

Šaudyklės korpusas turi laikyti mechanines apkrovas, tvirtai laikyti bėgius apibrėžtoje padėtyje, t. y. išlaikyti pastovų kalibrą. Korpuso dielektrinė medžiaga leidžia išvengti parazitinių srovių (tuo pačiu ir el. nuostolių, korpuso šilimo). Dar vienas dielektrinio korpuso privalumas – maža erozija šūvio metu. Stiklaplastikio korpusas neatsparus tempimui, todėl iš anksto įtempiamas plieniniais varžtais skersai šūvio kryptimi. Stiklaplastikis yra skaidrus rentgeno spinduliams, o tai leidžia naudoti rentgeno spindulių blykstes, kurių pagalba kulka fotografuojama šūvio metu. Nuotraukų analizė parodė, kad šūvio metu bėgiai atitolsta vienas nuo kito apie 2 mm (Lehmann, Vo, Wenning 2005).

Korpuso atramos perima veikiančias bėgius apkrovas ir perduoda jas kitoms besipriešinančioms atatrakai konstrukcijos dalims (Peter, Jamet, Wegner 1995).

Egzistuoja EMŠ modeliai turintys daugiau, nei du bėgius. Teorinė analizė rodo, kad vienas iš tokio tipo EMŠ privalumų – tolygesnė apkrova, tenkanti bėgiams. Tokiose šaudyklėse naudojama ne nuolatinė, o kintanti el. srovė, kuri slopina el. lankų formavimąsi ir leidžia sumažinti bėgių eroziją (Driga 1993).

Viena galimų EMŠ konfigūracijų yra daugiapakopė EMŠ. Daugiapakopė EMŠ yra suskirstyta į keletą elektriškai atskirtų pakopų. Kiekviena pakopa turi nuosavą el. maitinimo šaltinį. Šūvio metu pirmoji pakopa įjungiamą valdomai, o po to kiekviena pakopa įsijungia sinchroniškai, priklausomai nuo kulkos padėties. Teoriniai skaičiavimai rodo, kad dvipakopėje šaudyklėje pasiekiamas greitis yra 17 % didesnis, nei tokio pat ilgio vienpakopėje EMŠ, o tripakopėje EMŠ 22 % didesnis. Didėjant pakopų skaičiui, jų efektyvumas mažėja. Taigi daugiapakopės EMŠ potencialiai gali viršyti šiuo metu pasiektus greičius vienpakopės sistemose (Musolino ir kiti 2001).

Koaksialinė EMŠ pasižymi tolygia išorinio bėgio ir visos atraminės konstrukcijos apkrova ir deformavimu, didesniu induktyvumo gradientu, kuris leidžia naudoti mažesnio stiprio el. srovę. Taip pat nėra labai stipraus magnetinio lauko prieš inkarą, dėl ko kulkoje įmontuota elektronika neperdegtų. Didžiausi tokių sistemų trūkumai, neleidžiantys jų plačiau taikyti – nevienalytis jėgų inkare pasiskirstymas ir centrinio elektrodo stabilumo problema. Dėl centrinio bėgio nestabilumo, ar nukrypimo nuo idealios padėties, iššaukiami reikšmingi skersiniai virpesiai. Be to, koaksialinėms EMŠ dėl konstrukcijos ypatumų neįmanoma pritaikyti paskirstyto energijos tiekimo (PET) sistemų, leidžiančių sumažinti nuostolius dėl el. varžos. Šie trūkumai ypač išryškėja kuriant didesnes sistemas (Shaaf, Audeh 1989). Teoriškai koaksialinėse EMŠ kulkos greitis gali būti padidintas daugiau nei 2,5 karto, lyginant su įprastinėmis EMŠ (Kareev ir kiti 2001). Naudojant plastmasines kulkas, išvengiama bėgių išėdimo (Tidman ir kiti 1993).

Aptarti šaudyklių konstrukcijų tipai turi savus privalumus ir trūkumus. Laboratorinėms EMŠ taikomi ne tokie griežti dydžio ir masės reikalavimai. EMŠ, pritaikytoms dirbti lauko sąlygoms, minėtos konstrukcinės savybės įgyja lemiamą reikšmę. Aptartos šaudyklės turi vieną bendrą savybę – jų vamzdžiai skirti atlaikyti ašiai nesimetriškoms apkrovų jėgoms ir yra sudėtingos konstrukcijos – turi bėgius, korpusą ir atramas. Konstrukcinių dalių mechaninio būvio skaitinis modeliavimas ir analizė yra svarbus mokslui žingsnis konstrukcinių savybių tyrime.

1.3. Modeliavimo metodų apžvalga

Šiame poskyriuje apžvelgiami EMŠ mechaninės elgsenos modeliavimo metodai, aptarti jų privalumai ir trūkumai.

1.3.1. Analiziniai modeliavimo metodai

Modeliuojant EMŠ daugelyje publikacijų nagrinėjami Eulerio lenkiamieji strypai arba įvertinantys šlytį Timošenko lenkiamieji strypai, paremti tampriu pagrindu. Strypai apkrauti pastovios amplitudės, laiptelio pavidalo pasiskirstymą turinčiomis jėgomis, o laiptelio išilginis judėjimo greitis yra pastovus. Bėgių neutraliosios ašies įlinkius ir žadinančią apkrovos jėgą siejanti diferencialinė lygtis (Daneshjoo ir kiti 2007) atrodo taip:

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI_x \frac{\partial^4 w}{\partial t^4} + K_p w = q(1 - H(x - vt)), \quad (1.5)$$

čia $q(1 - H(x - vt))$ yra apkrovos kitimas. H – Heavisaido laiptelio pavidalo funkcija. Lygties (1.5) sprendinys įlinkiams gautas pasinaudojus Furjė baigtinių sinusinių integralinių transformacijų metodu ir išreikštas tokiu pavidalu:

$$w(x, t) = \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} W(n, t) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right), \quad (1.6)$$

čia $W(n, t) = \frac{Q_n}{\lambda_n^2 \mu_n^2} \left(1 + \frac{1}{\lambda_n^2 - \mu_n^2} (\mu_n^2 \cos \lambda_n t - \lambda_n^2 \cos \mu_n t) \right)$ ir $Q_n = \frac{qn\pi v^2}{\rho AL}$, $\mu_n = \frac{n\pi v}{L}$ ir

$\lambda_n = \left(\frac{K_p}{\rho A} + \frac{EI_x n^4 \pi^4}{\rho AL^4} \right)^{0.5}$; strypą aprašantys rodikliai: ρ – efektyvusis tankis; A –

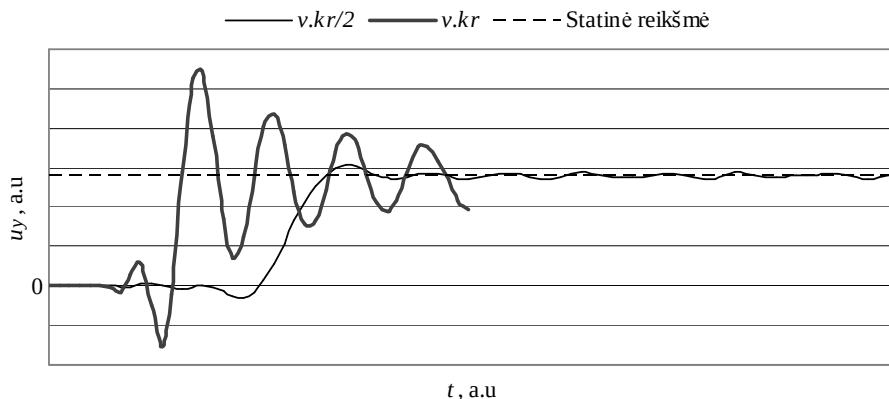
stryo skerspjūvio plotas; EI_x – lenkiamasis strypo skerspjūvio standis; x – koordinatė; t – laikas.

Kokybinis bėgio mazgo įlinkių kitimas laike (1.6) judant apkrovai išilgai bėgio greičiu, lygiu pusei kritinio greičio ir judant kritiniu greičiu pavaizduotas 1.3 paveiksle. Kritinis greitis yra strypo rodiklis, apibūdinantis mažiausią galimą strypo, atremto į tamprųjį pagrindą, negestančiai sklindančios sužadintos poslinkių bangos greitį (Johnson, Moon 2007).

Žymus dinamikos pasikeitimas stebimas, kai apkrova juda kritiniu greičiu (1.3 pav.). Šis skirtumas paaiškinamas inercinių efektų įtaka. Kai apkrova juda mažesniu už kritinį greičiu, žadinančio poveikio dažnis žymiai skiriasi nuo strypo tikrinio svyravimų dažnio.

Tokiu atveju deformuoto strypo forma leistinu nuokrypiu panaši į formą, gautą statinės tiesinės analizės metodais. Kai žadinančio poveikio dažnis artėja

prie vamzdžio žemiausiojo svyravimų dažnio, pasireiškia rezonansiniai efektai. Tokiu atveju svyravimų amplitudė, lyginant su statiniu įlinkiu, pasidaro reikšminga ir turi būti įvertinta dinamiškumo įtaka (Daneshjoo ir kiti 2007).



1.3 pav. Apkrovos greičio įtaka bėgio mazgo įlinkiams

Fig. 1.3. Influence of loading velocity to rail deflections

Kai strypas veikiamas kritiniu greičiu judančia apkrova, atsiranda rezonansinė lenkimo banga. Dėl lenkimo atsiradę įtempiai gali viršyti strypo medžiagos stiprumo ribą ir jis gali suirti (Lewis, Nechitailo 2007).

Aprašomo (1.5) diferencialine lygtimi lenkiamo strypo kritinis greitis:

$$v_{kr} = \sqrt[4]{\frac{4EI_x K_p}{(\rho A)^2}}. \quad (1.7)$$

Čia E – strypo medžiagos tamprumo modulis [Pa]; I_x – strypo skerspjūvio ašinis inercijos momentas [m^4]; K_p – tampraus pagrindo, į kurį paremtas strypas, tamprumo modulis [Pa]; ρ – strypo tankis [kg/m^3]; A – skerspjūvio plotas [m^2].

EMŠ vamzdžio dinaminėms savybėms apibūdinti, kritinis greitis naudojamas gana dažnai. Kritiniam greičiui suskaičiuoti pakanka žinoti konstrukcinius ir geometrinius EMŠ parametrus (Reck 2005).

Pažymėtina, kad išraiška (1.6) gaunamos įlinkių reikšmės apibūdina strypo skersinį nukrypimą nuo neutralios ašies (deviacijas). Šis sprendinys gautas veikiant pastovios amplitudės apkrovai, turinčiai laiptelio formos pasiskirstymą ir judančiai išilgai bėgio pastoviu greičiu. Analitiniai sprendiniai su sudėtingesniu apkrovos kitimu nėra žinomi, todėl šių metodų taikymas EMŠ dinamikai tirti yra problematiškas.

1.3.2. Baigtinių elementų metodas

Baigtinių elementų metodas (BEM) – vienas iš plačiausiai taikomų skaitinių metodų, skirtų mechaninių, šiluminių, hidraulinių, elektromagnetinių ir kitokių fizikinių sistemų uždaviniams spręsti ir dinaminiais procesams modeliuoti.

Baigtinių elementų metodo raidos istorija prasideda XX a. šeštajame dešimtmetyje. Vieną iš pirmųjų straipsnių 1956 metais su bendraautorais parašė Turner (Turner ir kiti 1956), o besibaigiant septintajam dešimtmečiui pasirodė pirmosios knygos, skirtos baigtinių elementų metodui. Didelę raidą BEM raidai turėjo Zienkiewicz (Zienkiewicz 1967) darbai.

Lietuvoje skaitinio modeliavimo klausimai, sprendžiant įvairias mechanikos problemas pradėti tyrinėti akad. A. Čyro ir jo mokinių darbuose (Kačianauskas 1994, 1995), (Barauskas, Belevičius, Kačianauskas 2004).

Baigtinių elementų metodo algoritmas yra universalus, sprendžiant įvairių fizikinių sistemų uždavinius, todėl nebereikia gilintis į daugelį tradicinių analitinių lygčių sprendimo būdų, kurių didžiausias trūkumas yra tas, kad jie yra specifiniai kiekvienai uždavinių klasei.

Esminiai skaičiavimo baigtinių elementų metodu etapai:

- bet kuri sudėtingos geometrinės formos sritis pavaizduojama baigtiniu nesudėtingos formos elementų skaičiumi;
- kiekvieno elemento srityje diferencialinė reiškinį aprašanti lygtis dalinėmis išvestinėmis apytiksliai pakeičiama algebrinių lygčių sistema;
- elementų algebrinės lygtys jungiamos į vienareikšmiškai išsprendžiamą algebrinių lygčių sistemą.

Fizikinis procesas, nagrinėjamas kiekviename baigtiniame elemente, yra pilnai aprašomas, laikant juos mažomis sritimis su iš pradžių nežinomomis kraštinėmis sąlygomis.

1.3.3. Baigtinių elementų metodo taikymai elektromagnetinių šaudyklių modeliavimui

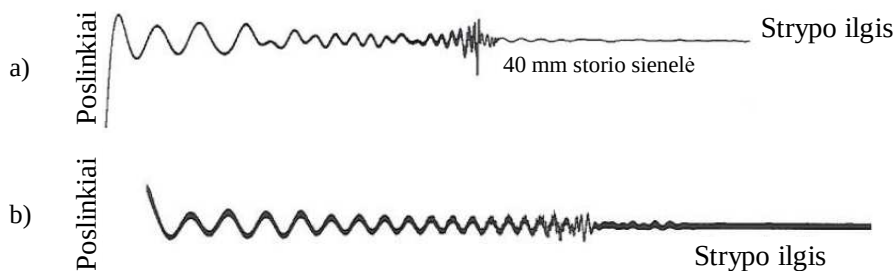
Publikuotų darbų apie EMŠ apžvalga rodo, kad pagrindinis dėmesys sutelktas į elektrinio našumo optimizavimą. Nepaisant tokių publikacijų gausos, taip pat yra paskelbta publikacijų, skirtų mechaninėms EMŠ dalims ir mechaniniams reiškiniams analizuoti.

Dažniausiai mokslinėje literatūroje, nagrinėjančioje EMŠ, minima statinė analizė, leidžianti parinkti pradinius konstrukcijos parametrus (Daneshjoo ir kiti 2007). Nustatyta, kad didėjant kulkos greičiui ir lengvėjant vamzdžiams, dinaminis jų atsakas tampa kritiniu, t. y., pasireiškia rezonanso reiškinys. Šis atsakas turi būti kruopščiai nagrinėjamas, nes didelis kulkos greitis įtakoja EMŠ našumą (Tzeng 2005).

Nustatyta, kad santykinai didesnio standumo, inercijos momento ir mažesnio tankio EMS yra parengta atlaikyti dideles dinamines apkrovas. Kritinis greitis nuo šių parametrų didėja netiesiškai, o proporcingai $x^{1/4}$. Cikliškai pasikartojantys įtempiai ardo vamzdį, pagreitina defektų vystymąsi ir žymiai sumažina bėgių tarnavimo laikotarpį (Tzeng 2003).

Dažnai realaus eksperimento metu gauti apkrovų duomenys panaudojami aprašyti skaitinio eksperimento kraštines sąlygas. Panašiu principu remiantis disertacijoje atlikti skaitiniai eksperimentai. Darbe (Reck 2005) erdvinis el. srovės pasiskirstymas paverstas tūrinėmis jėgomis, panaudotomis kaip kraštinės sąlygos erdvinei mechaninei sistemai modeliuoti. Gauti modeliavimo rezultatai parodė, kad tam tikrose vietose įtempiai viršija konstrukcijos medžiagos statinę stiprumo ribą.

Darbe (Lewis, Nechitailo 2007) buvo lyginami skirtingų BE įtaka skaitiniams rezultatams. Rasti kritinius vamzdžio greičius, buvo pasitelkta BEM analizės programa ABAQUS. Du tirti skaitiniai modeliai naudojo skirtingus BE: kevalų ir kontinuumo. Rezultatai parodė, kad plonų kevalų teorijos neduoda gerų rezultatų, kai modeliuojama storasienių vamzdžių dinamika. Storasienių vamzdžių dinamikos modeliavimo taikant kevalų BE rezultatai pasižymi „užtriukšmintu“ arba daugiabangiu atsaku (1.4 pav., a), todėl kritinio greičio nustatymas tampa sudėtingas.



1.4 pav. Virpesių sklidimas bėgiu, kai taikomi skirtingi BE tipai: a) kevalų BE; b) ašiai simetriški kontinuumo BE

Fig. 1.4. Propagation of oscillations of the rail for different FE: a) shell type FE; b) axisymmetric continuum FE

Rasta kritinio greičio vertė naudojant kevalų BE $v_{kr} = 2$ km/s. Vamzdžiui modeliuoti pritaikius kontinuumo elementus, gautas atsakas yra tolydesnis (1.4 pav., b), o kritinio greičio reikšmė $v_{kr} = 2,51$ km/s.

BE modeliavimas padeda nustatyti kritinius greičius, vaizduoti deformacijos dinamiką, gauti poslinkių ir įtempių kitimo laike istorijas ir jų erdvinis

pasiskirstymus. Nustatyta, kad EMŠ realizuoti sąlyginai didesnės akceleracijos režimai ir didesnis virpesių slopinimas švelnina rezonansinius efektus.

Nustatyta, kad, kad dinaminio poveikio atveju poslinkių amplitudė yra dvigubai didesnė už statiškai paveiktos konstrukcijos poslinkius (Zowarka, Kajs 1993).

Baigtinių elementų metodas taikomas tiek EMŠ mechaniniam būviui nustatyti, tiek ir kulkos-bėgių kontaktui modeliuoti. Publikacijoje (Knoth, Bauer 1995) skelbiama, kad inkaro kontakto jėgos dydžiui išreikšti tradiciškai imamas „statinis“ dydis, gaunamas įskaičius elektromagnetines ir mechanines apkrovas. Kulkos inkaro dinaminis atsakas į bėgio paviršiaus trikdžius dažniausiai nežinomas. Žemo standžio „C“ tipo inkaro kontaktas su bėgiais išlieka be trūkių. Pernelyg standus inkaras nespėja atkartoti bėgio paviršiaus formos. Inkaro našumas priklauso nuo jų atsako į bėgio paviršiaus formos kitimą. Paprastas spyruoklės su slopinimu modelis tinka nagrinėti inkaro dinaminiam atsakui į bėgio paviršiaus formos kitimą. Toks įrankis leidžia identifikuoti kontakto praradimą šūvio metu ir inkaro stiprumo problemą, atsiradusią dėl per didelių dinaminių apkrovų veikimo.

Publikacijoje (Chu 1993) nagrinėta vamzdžio pradinio kreivio įtaka kulkos-bėgio kontaktui. Vamzdžio pradinis kreivis iššaukia papildomas skersines jėgas, kurių dydis atvirkščiai proporcingas kreivio spinduliui. Nežymus vamzdžio kreivis neiššaukia reikšmingų skersinių jėgų. Šūvių metu suardyti vamzdžiai turėjo žymų kreivį, periodiškai kintantį per vamzdžio ilgį. Dėl šios priežasties atsiradusios skersinės jėgos neigiamai paveikė EMŠ našumą, galiausiai suardė konstrukciją.

Darbe (Kierner, Kitzinger 1993), pasinaudojus BEM analizės paketais MSC/EMAS ir MSC/DYNA, modeliuotas srovės tankio ir įtempių pasiskirstymas šaudyklės bėgiuose. Dinaminiai efektai straipsnyje nenagrinėti. Teoriškai apskaičiuotas ISL „EMA-1“ šaudyklėje pasiekiamas kulkos greitis, neįskaičius trinties yra 1600 m/s, o įskaičius trintį – 1400 m/s. Gauti modeliavimo rezultatai sutapo su eksperimentų rezultatais (1380 m/s).

Apžvelgtuose straipsniuose panaudoti skaitinio modeliavimo metodai, skirti nagrinėti įvairiai EMŠ mechaninei elgsenai. Straipsniuose pasigendama skaitinių tyrimų, kuriose kraštinėms sąlygoms aprašyti panaudojamos eksperimentų metu gautos apkrovos.

1.4. Apibendrinimas. Uždavinių formulavimas

Skyriuje apžvelgti įvairūs EMŠ konstrukcijų tipai, aptarti jų privalumai ir trūkumai. EMŠ su stačiakampio skerspjuvio bėgiais ir stačiakampio skerspjuvio kulka – vienas labiausiai paplitusių laboratorinių įrenginių.

EMŠ yra sudėtingas įrenginys, todėl jame vykstančių pagrindinių reiškinių nagrinėjimas ir valdymas yra praktiškai naudingas.

Elektriniai reiškiniai turi lemiamą reikšmę EMŠ našumui, galingumui ir kitiems rodikliams. Elektromagnetinės prigimties jėgų ašinis pasiskirstymas lemia sudėtingą EMŠ konstrukciją. Dėl elektrinės varžos išsiskyrusi šiluma lemia aukštą bėgių, kulkos inkaro ir kitų konstrukcinių dalių temperatūrą. Šioms dalims svarbu parinkti tinkamas medžiagas.

Šūvio metu atsiradusios ženklios dinaminės apkrovos taip pat įtakoja įvairius EMŠ rodiklius: vamzdžio masę, trinties nuostolius, kontakto stiprumą, bėgių eroziją ir kt. Kritinis greitis būdingas kiekvienai EMŠ. Kulkos greičiui artėjant prie kritinio greičio, minėti reiškiniai įgauna rezonansinį pobūdį ir blogina kokybinius EMŠ rodiklius. Tad EMŠ vamzdžio mechaninio būvio analizė yra svarbus uždavinys, pastaruoju metu sulaukiantis vis didesnio susidomėjimo. Žinant mechaninį būvį, galima tobulinti konstrukciją, mažinant jos masę, ar keičiant apkrovų režimą. Šie rodikliai ypač svarbūs, norint EMŠ pritaikyti lauko sąlygoms.

Apžvelgus šaudyklių tyrimus konstatuota, jog literatūroje nagrinėti modeliai visumoje neatspindi „EMA-3“ EMŠ konstrukcijos ypatumų ir žinomi sprendiniai negali būti tiesiogiai taikomi jos dinaminio atsako, veikiant realioms apkrovoms, vertinimui.

Atsižvelgiant aukščiau aptartus argumentus, tikslinga spręsti šiuos uždavinius:

- išanalizuoti tinkamus EMŠ modelius ir parinkti tinkamiausią;
- sukurti skaitinį „EMA-3“ EMŠ modelį ir skaitiškai ištirti jo savybes;
- apibendrinti eksperimentų rezultatus ir pateikti apibendrinimus, siūlymus.

Šaudyklės „EMA-3“ skaitinis modelis

Skyriuje aptariamas šaudyklės „EMA-3“ skaitinis baigtinių elementų modelis. Šio tyrimo tikslas yra pagrįsti pasirinkto modelio tinkamumą šaudyklei nagrinėti. Gauta pasirinkto modelio konfigūracija: tinklelio tankis, atramų tipas. Atlikus svyravimų sklidimo greičio analizę, nustatytas šaudyklės kritinis greitis.

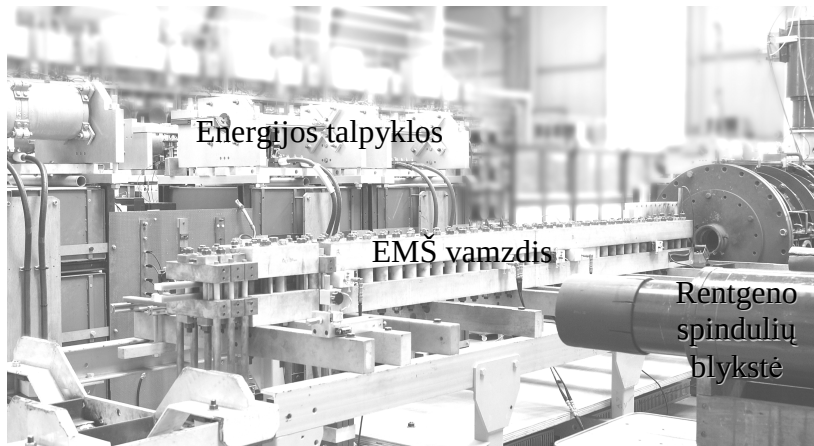
Skyriaus medžiaga paskelbta visuose autoriaus straipsniuose (Tumonis ir kiti 2007a, 2007b, 2008, 2009a, 2009b).

2.1. Šaudyklės „EMA-3“ konstrukcija ir savybės

Disertacija nagrinėja EMŠ „EMA-3“, įrengtą Prancūzijos – Vokietijos tyrimų institute. Pavadinimas „EMA“ yra žodžių „ElectroMagnetic Accelerator“ trumpinys.

Įrenginio bendras vaizdas parodytas (2.1 pav.). Pagrindiniai techniniai sistemos duomenys pateikti 2.1 lentelėje (Schneider, Schneider 2005). Šia šaudykle pasiekiamas kulkos greitis yra $v_{max} \approx 1200$ m/s (Schneider ir kiti 2003).

Elektros energija saugoma šešiose modulinėse energijos talpyklose (kondensatorių blokuose). Elektros grandinės dalys optimizuotos pasiekti didžiausią varomąją jėgą.



2.1 pav. EMŠ „EMA-3“ bendrasis vaizdas
Fig. 2.1. The ISL-railgun EMA-3

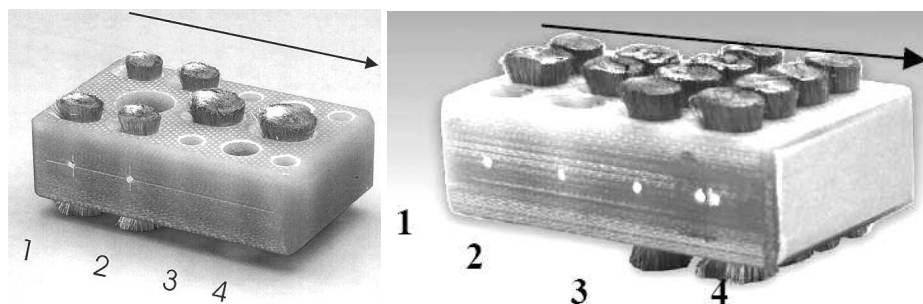
EMŠ konstrukcija ir medžiagos leidžia greitai surinkti ar išardyti vamzdį ir daryti rentgeno nuotraukas kulkos greitinimo metu.

2.1 lentelė. EMŠ „EMA-3“ techniniai duomenys
Table 2.1. Technical characteristics of the EMA-3 railgun

Energijos talpyklos	6 kondensatorių talpyklos. Maksimali sukaupta energija $6 \times 154 \text{ kJ} = 0,9 \text{ MJ}$
Perjungimas	Puslaidininkių įtaisai
Paskirstyto energijos tiekimo sistema (PET)	Daugiausia 3 pakopos
Kalibras (kulkos gabaritai)	15x30 mm
Bėgiai	Cu-Cr lydinys (3 m ilgio)
Mechaninė vamzdžio dalis	Plieno varžtai ir stiklaplastikio korpusas
Kulka	Stiklaplastikio korpusas ir Cu-Cr lydinio šepetėliai, $m \approx 50\text{--}60 \text{ g}$, $l \approx 5 \text{ cm}$

EMŠ bėgiai pritvirtinti prie stiklaplastikinių blokų, sujungtų plieniniais varžtais. Bėgiai pagaminti iš stačiakampio skerspjūvio Cu-Cr (vario-chromo) lydinio ištisinės medžiagos.

Naudotos eksperimentuose kulkos vaizdas parodytas (2.2 pav.). Kulka sudaryta iš stiklaplastikio medžiagos korpuso su kiaurymėmis.



2.2 pav. Šaudyklės „EMA-3“ kulkų su skirtingais šepetėlių išdėstymais bendras vaizdas. Rodyklė rodo kulkos slydimo bėgiais kryptį

Fig. 2.2. Projectile of the EMA-3 with different arrangement of the brushes.
Arrows indicate direction of the motion

Kiaurymėse įstatyti Cu-Cr lydinio šepetėliai, sudaryti iš daugybės laidelių. Šepetėlių pradinis ilgis yra didesnis už vamzdžio kalibrą, tam kad šepetėliai įgautų „C“ formos pavidalą, užtikrinantį prispaudimą prie bėgių dėl Lorencio jėgos poveikio, ir taip kompensuotų šepetėlių dilimą judant kulkai šūvio metu. Atskiri šepetėlių laideliai užtikrina geresnį elektrinį kontaktą nei šepetėliai, pagaminti iš ištisinės medžiagos. Dėl laidelių gausos jų dalis nuolat kontaktuoja su bėgiu palaikydami nepertraukiamą el. srovę.

2.2 lentelė. „EMA-3“ šaudyklės dalių mechaninės savybės

Table 2.2. Material properties of the EMA-3 structural members

Šaudyklės dalis	Medžiaga	Fizinės savybės
Korpusas	EPM 203	Tankis: $\rho = 1,85 \text{ g/cm}^3$ Tamprumo modulis: $E = 18,0 \text{ GPa}$ Puasono koeficientas: $\nu = 0,3$
Bėgis	CuCr1Zr (CRM 16N)	Tankis: $\rho = 8,90 \text{ g/cm}^3$ Tamprumo modulis: $E = 120 \text{ GPa}$ Puasono koeficientas: $\nu = 0,3$
Varžtai	Plienas	Tankis: $\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$ Tamprumo modulis: $E = 210 \text{ GPa}$ Puasono koeficientas: $\nu = 0,3$

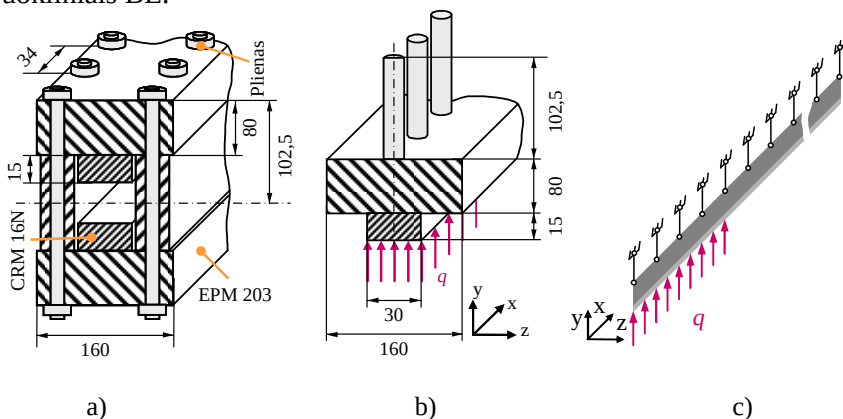
EMŠ vamzdį sudarančių dviejų bėgių, korpuso ir varžtų mechaninės savybės (2.2 lentelė) naudojamos sudarant BEM, o taip pat analizinėms išraiškoms apskaičiuoti.

2.2. Skaitinis baigtinių elementų modelis

Disertacijos literatūros apžvalga rodo, kad EMŠ vamzdžio modeliavimas BE apsiriboja statinių tiesinės analizės uždavinių sprendimu, o dinaminiais reiškiniams modeliuoti pasitelkiami paprasčiausi vienmačiai lenkiamų strypų arba kevalų baigtiniai elementai. Daugelis apžvelgtų darbų nagrinėja modelius su begalinio ilgio gembine sija ant tampraus pagrindo. Tai, autoriaus manymu, netikslu. Dėl kraštinių efektų nebuvimo, šie modeliai neįvertina kai kurių svarbių mechaninių vyksmų, vykstančių vamzdyje šūvio metu.

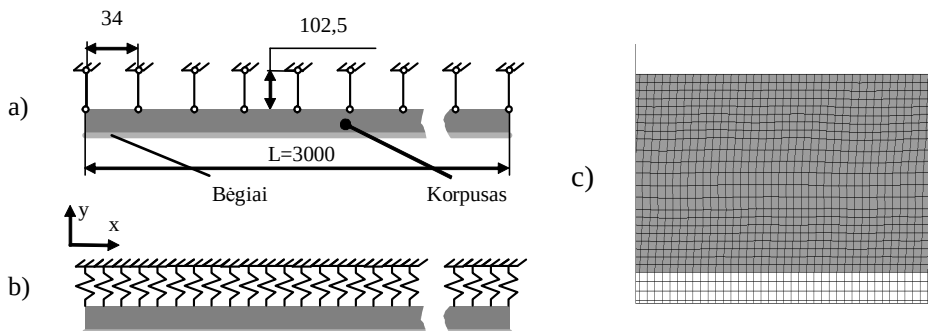
Atsižvelgus į šiuos faktus, skaitinei analizei nuspręsta naudoti sudėtingesnę BE modelį, kuris tiksliau atkartotų „EMA-3“ šaudyklės formą ir būtų baigtinio ilgio. Atsižvelgiant į mechaninių vyksmų greičius ir EMŠ matmenis buvo nuspręsta, kad uždavinio apimtį ir skaičiavimo laiką atžvilgiu tinkamiausias skaitinis BE modelis, sudarytas iš kontinuumo BE. Turimi kompiuteriniai resursai leido sukurti trimatį BE modelį, bet jį galima panaudoti tik statinei analizei, nes duomenų apimtis dinaminio modeliavimo metu viršija kompiuterio galimybes. Vienas svarbesnių dvimačio BE modelio su plokštuminiiais kontinuumo BE pranašumų prieš modelį su lenkiamų strypų BE – galimybė gauti konstrukcijos poslinkius bet kuriame skerspjūvio taške, o ne tik vamzdžio ašies poslinkius (deviacijas). Taip pat BE modelis įvertina skerspjūvio susispaudimą. Atsižvelgus į vamzdžio simetriją, nuspręsta nagrinėti modelį, sudarytą iš pusės vamzdžio skerspjūvio. Tai leido plokštuminių dvimačių elementų skaičių sumažinti dvigubai, tuo pačiu dvigubai sutrumpinant skaičiavimams reikalingą laiką. Nuspręsta nagrinėti $\frac{1}{2}$, o ne $\frac{1}{4}$ skerspjūvio todėl, kad pasirinkta analizuoti dvimatį modelį. Pasirinkus nagrinėti pusę skerspjūvio, jo geometriniai rodikliai be perskaičiavimų priskiriami dvimačio modelio geometriniais rodikliais. Kitu atveju reikalingi perskaičiavimai. Nagrinėta konstrukcijos dalis yra diskrečiosiomis atramomis paremtas sudėtinis strypas. Skaičiavimų ir analizės supaprastinimui konstrukcija pakeista mechaninėmis savybėmis analogiška konstrukcija. Tam dvi varžtų eilės (2.3 pav., a) buvo pakeistos atitinkamo standumo ir tokio pat ilgio tampriais strypais. Strypų vienas galas standžiai įtvirtintas, kitas sujungtas su stiklaplastikio korpusu. Šie modelio supaprastinimai nepakeičia vamzdžio mechaninių savybių. Tokiu būdu vamzdžio bėgių ir stiklaplastikinio korpuso blokai įgauna apverstos „T“ pavidalo skerspjūvį (2.3 pav., b).

Sukurtais skaitinis geometrinis modelis buvo suskaidytas BE: bėgis ir korpusas – dvimačiais kontinuumo baigtiniais elementais; strypai diskretizuoti spyruokliniais BE.



2.3 pav. EMŠ „EMA-3“ skerspjūvis: a) vamzdžio skerspjūvis; b) analogiškas skaičiuojamojo modelio skerspjūvis su veikiančiomis apkrovos jėgomis; c) dvimatis modelis su veikiančiomis apkrovomis

Fig. 2.3. Railgun structure: a) cross-section, b) simplified model; c) 2D model with loading



2.4 pav. Dvimatis EMŠ „EMA-3“ šaudyklės vamzdžio modelis: a) bėgis su diskretinėmis atramomis, b) bėgis ant tampraus pagrindo, c) bėgio dvimačio BE tinklo fragmentas

Fig. 2.4. 2D model of the EMA-3 railgun: a) beam with discrete supports; b) beam on elastic foundation; c) fragment of 2D FE mesh

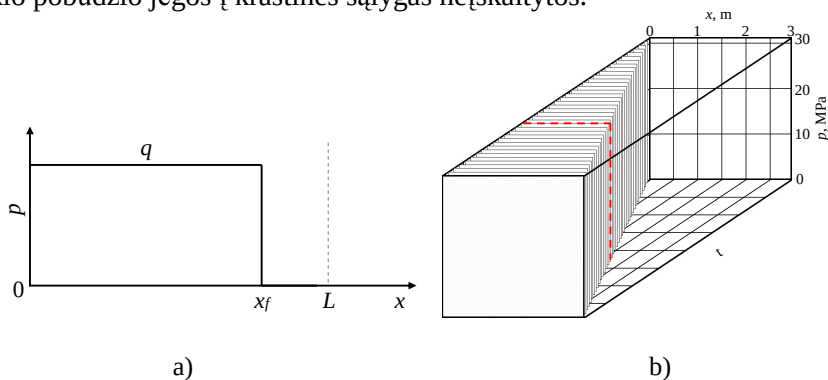
Vamzdžio skaičiuojamojo modelio (2.4 pav.) koordinatų sistema parinkta taip: absčių ašis ($0x$) yra lygiagreti bėgio slystamajam paviršiui, jos kryptis sutampa su kulkos judėjimo kryptimi. Ordinačių ašis ($0y$) yra nukreipta apkrovos veikimo kryptimi ir statmena bėgio paviršiui. Normaliniai poslinkiai $u_N = u_y$, veikiant statinei apkrovai visada būna teigiami.

Baigtinių elementų modelis sudarytas iš 18652 BE. Bėgiai ir korpusas diskretizuoti PLANE82 tipo plokštuminiais BE, atraminiai varžtai pakeisti 96 spyruokliniais LINK1 tipo baigtiniais elementais. Viso skaičiuojamasis modelis turi 56719 laisvumo laipsnius.

2.3. Elektromagnetinių apkrovų bendrosios savybės

Šūvio metu EMŠ bėgius veikia ašiai ($0x$) nesimetriškos jėgos. Šios jėgos yra sudėtinės, o jų dedamosios yra Lorencio, kontakto su kulka, trinties ir kt. jėgos.

Apkrovos į bėgius didžiausią dedamąją sudaro Lorencio jėga, todėl kraštinės sąlygos (apkrovos jėgos) yra supaprastintos: nagrinėjamas tik elektromagnetinės prigimties skečiančiųjų jėgų poveikis. Šios jėgos veikia tol, kol kulka juda bėgiais ir jais teka el. srovė. Vietinės, susijusios su kulkos mechaniniu kontaktu ir kitokio pobūdžio jėgos į kraštinės sąlygas neįskaitytos.



2.5 pav. Apkrovos į bėgius išilginis pasiskirstymas: a) momentinis; b) išilginio pasiskirstymo kitimas laike

Fig. 2.5. Longitudinal load variation on the rail: a) instantaneous profile; b) variation in time

Skečiančios bėgius Lorencio jėgos išilginis pasiskirstymas EMŠ bėgio paviršiuje turi laiptelio pavidalą. Laiptelio kraštas, arba jėgos fronto padėtis vienareikšmiškai susijusi su kulkos padėtimi, nes elektros srovė, tekanti per pirmąjį bėgį iki kulkos inkaro, o po to, pratekėjusi per inkarą, teką kitu bėgiu link

jo pradžios. Prieš kulką elektros srovė neteka, todėl bėgio ruože prieš kulką apkrovos jėga neveikia (1.1 pav., c).

Apkrovos išilginio pasiskirstymo (2.3 pav., c) bet kuriame bėgio paviršiaus taške x reikšmė aprašoma kaip Heavisaido laiptelio pavidalo funkcija (2.5 pav., a):

$$q(x,t) = \begin{cases} p(x), & \text{jei } x \leq x_f(t) \\ 0, & \text{jei } x > x_f(t) \end{cases} \quad (2.1)$$

čia q – apkrovos slėgio reikšmė [Pa]; x_f yra apkrovos fronto padėtis [m], sutampanti su kulkos priekio padėtimi, laiko momentu t :

$$x_f(t) = vt, \quad (2.2)$$

čia v yra pastovus kulkos greitis [m/s].

Trimatis apkrovos išilginio pasiskirstymo bėgyje kitimo grafikas, susiejantis laiką, kulkos padėtį, ir apkrovos dydį pavaizduotas (2.5 pav., b). Šiame grafike apkrovos dydis nekinta, o apkrova juda pastoviu greičiu. Pastovaus slėgio $q = 31,2$ MPa reikšmė atitinka vidutinį eksperimentiškai išmatuotą slėgį šūvio metu. Punktyriniu laipteliu išskirtas momentinis apkrovos pasiskirstymas bėgyje (2.1), kokybiškai atitinkantis (2.5 pav., a) atitinkantį apkrovos pasiskirstymą.

2.4. Skaitinio modelio tyrimas

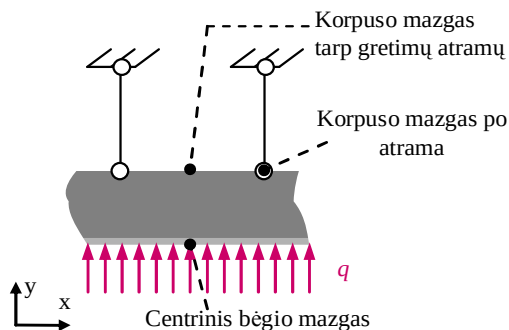
Sukurtas skaitinis elektromagnetinės šaudyklės „EMA-3“ BE modelis buvo tikrinamas, norint nustatyti jo tinkamumą atlikti skaitinius tyrimus, taip pat norint įvertinti BE tinklo tankumą. Gauti rezultatai, pagrindžiantys modelio tinkamumą tolesniems tyrimams išdėstyti sekančiuose poskyriuose.

2.4.1. Baigtinių elementų tinklo tankio įvertinimas

BE tinklo tankio įtakai skaitiniams rezultatams nustatyti, ištirta statinio uždavinio rezultatų priklausomybė nuo tinklo tankio. Modelio tinklo elementų dydis kito nuo 17 mm iki 2,063 mm, t. y. elementų skaičius tarp dviejų gretimų atramų (strypu) kito nuo 2 iki 16 (2.8 pav.). Kairėje spalvos žymi skirtingas medžiagas, dešinėje – skirtingas poslinkių u_y reikšmes.

Modelis su rečiausiuoju tinklu sudarytas iš 1410 BE ir turi 3901 l. l. Modelis su tankiausiu tinklu sudarytas iš 73564 BE ir turi 222913 l. l. Sprendžiant statinį uždavinį, bėgio paviršius apkrautas tolygiai išskirstyta $q = 31,2$ MPa apkrova. Tirtos bėgio paviršiaus centrinio mazgo, korpuso mazgo po atrama ir korpuso

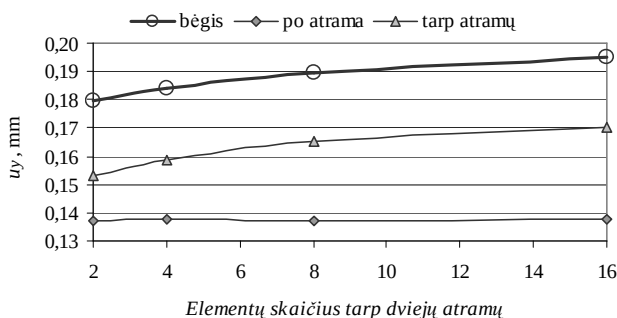
mazgo esančio dviejų atramų viduryje poslinkių priklausomybės nuo BE tankio (2.6 pav.). Šios priklausomybės parodytos (2.7 pav.).



2.6 pav. Tolygiai apkrautos EMŠ tiriamieji mazgai BE tinklo tankio įtakai skersiniams poslinkiams įvertinti

Fig. 2.6. Specified nodes for investigation of influence of FE density for transversal displacements

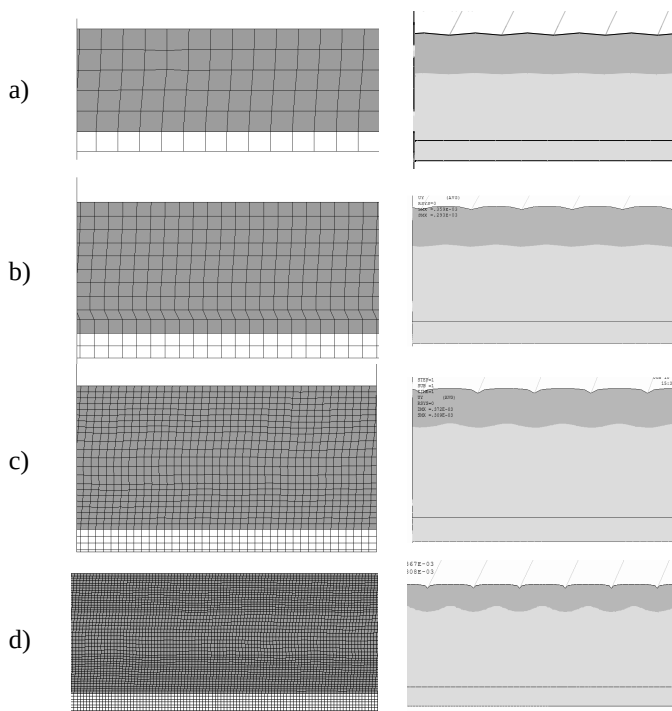
Rezultatai rodo, kad tinklo su 8,25 mm dydžio kvadratiniais elementais (kai tarp dviejų atramų telpa 4 elementai) tikslumas yra pakankamas. Šiuo modeliu gautas nagrinėtų mazgų poslinkių skirtumas nuo tirto modelio su tankiausiu BE tinklu, sudaro ne daugiau, kaip 3 %. Šis skirtumas yra toleruotinas. Dėl šios priežasties kitiems tyrimams pasirinktas modelis sudarytas iš 18652 BE ir turintis 56719 l. l. Pasirinktame modelyje tarp dviejų gretimų atramų telpa 4 BE.



2.7 pav. Būdingų taškų šaudyklės skerspjūvyje poslinkių u_y priklausomybė nuo BE skaičiaus tarp gretimų atramų

Fig. 2.7. Variation of transversal displacement u_y against the number of FE between two supports

Pasirinktas modelis tenkina skaičiavimo trukmės ir apimties reikalavimus: vieno skaitinio eksperimento trukmė neturi viršyti 12 valandų, o duomenų kiekis neviršyti kompiuterio laikmenos talpos. Pavyzdžiui, statiniam uždaviniui spręsti turimais ištekliais užtrunkama mažiau, nei 1 min, o duomenų kiekis neviršija 16 MB. Sprendžiant dinaminį uždavinį, sugaištama apie 5 valandas, o duomenys užima apie 18 GB.



2.8 pav. BE tinklo tankio įtakos tyrimų rezultatai – bėgio fragmentas su skirtingu elementų skaičiumi n tarp gretimų atramų ir deformuota schema su apskaičiuotais skersiniais poslinkiais u_y ; a) $n = 2$; b) $n = 4$; c) $n = 8$; d) $n = 16$
Fig. 2.8. Results of the FE refinement – fragments of rail between two supports with different numbers n of FE and deformed shape and transversal displacements u_y ; a) $n = 2$; b) $n = 4$; c) $n = 8$; d) $n = 16$

2.4.2. Skaitinio modelio testavimas pagal kritinį greitį

Kaip buvo minėta, kritinis greitis yra būdingas konkrečiai konstrukcijai ir apibūdinamas kaip mažiausias paviršinių bangų sklidimo greitis. Siekiant patikrinti BE modelį pagal kritinį greitį, analitiškai gautas kritinis greitis

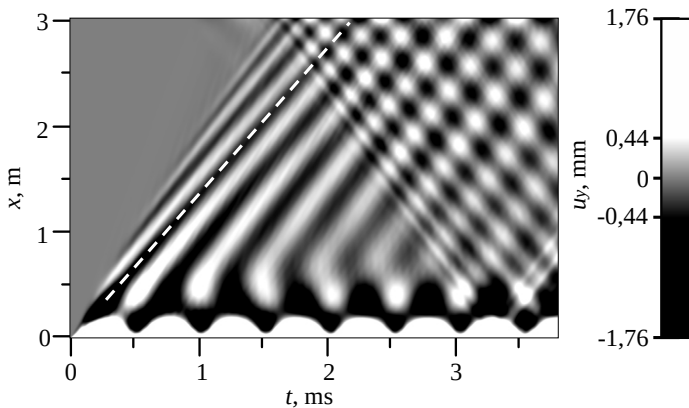
sugretintas su skaitiniu modeliavimu gautu trikdžių sklaidimo bėgio paviršiumi greičiu.

Modeliuojant skaitiškai, bėgio paviršinis mazgas, esantis bėgio pradžioje buvo apkrautas 1989 N sutelktąja jėga, ekvivalentiška 31,2 MPa slėgiui į BE elementą. Jėgos pridėjimo greitis yra $6,63 \cdot 10^7$ N/s. Apkrovai pasiekus minėtą reikšmę, ji lieka pastovi visą skaičiuojamąjį laiką. Šios jėgos sukelti trikdžiai laisvai sklinda bėgio paviršiumi kritiniu greičiu.

Bėgio paviršiaus mazgų skersinių poslinkių u_y laiko istorija pavaizduota (2.9 pav.). Paveiksle aiškiai matyti, kad svyravimai sklinda nuo bėgio pradžios link galo, o ten atsispindėję sklinda atgal interferuodami su sutiktais svyravimais. Punktyrine linija pavaizduota pasirinktos bangos sklaidimo laiko istorija. Tiesės pokrypio kampo tangentes yra lygus kritiniam greičiui:

$$v_{kr} = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (2.3)$$

Pagal išraišką (2.3) gauta kritinio greičio reikšmė yra $v_{kr}=1378$ m/s.



2.9 pav. Dvimatis laisvai sklindančių bėgio paviršiaus mazgų skersinių poslinkių vaizdas

Fig. 2.9. Two-dimensional illustration of time history of propagation of transversal displacements

Apskaičiuojant kritinį greitį pagal analitinę išraišką (1.7), EMŠ laikoma sudėtinu „T“ formos lenkiamu strypu, aprašomu efektyviaisiais rodikliais. Pasinaudojus pateiktomis EMŠ vamzdį sudarančių medžiagų fizikinėmis savybėmis (2.2 lentelė), apskaičiuotos efektyviųjų parametrų reikšmės: $(\rho A)_{ef} = 27,62$ kg/m ir $(EI)_{ef} = 125$ kNm². Varžtų standžiai pakeisti lygiaverčiu ištisiniu vienalyčiu tampriuoju pagrindu, kurio išraiška bus pateikta žemiau, su

standžiu $K = 6,71 \text{ GPa}$. Įstačius šias reikšmes į (1.7) gauta kritinio greičio reikšmė yra $v_{kr} = 1440 \text{ m/s}$.

BEM gautą kritinio greičio vertę sugretinus su apskaičiuotąja analitiškai, skirtumas neviršija 5 % apskaičiuotos analitiškai kritinio greičio reikšmės.

2.4.3. Atramų diskretiškumo įtakos tyrimai veikiant statinei apkrovai

EMŠ „EMA-3“ korpusas suvaržytas diskretiškai (varžtais). Apžvelgtuose darbuose (Daneshjoo ir kiti 2007), šaudyklės vamzdžio skaitinis modelis – sija ant tampraus Vinklerio pagrindo, pasižyminčio tiesinėmis savybėmis ($\sigma \sim u_y$). Toks modelis tinka tik šaudyklėms, kuriose bėgiai ir korpusas įtvirtinti apvaliuose ar ovaliuose vamzdžiuose (1.2 pav.), tarnaujančiuose kaip bėgių atramos. Tokie modeliai su ištisinėmis atramomis netinkamai atvaizduoja EMŠ „EMA-3“ atramas, kurios išdėstytos diskretiškai, o pačioms atramoms panaudoti strypai.

Norint įvertinti šių dviejų artinių mechaninio būvio skirtumus, spręsta užduotis palyginti atramų diskretiškumo įtaką skaitiniams rezultatams.

Sprendžiant uždavinį siekta nustatyti bėgio ir varžtų skersinius poslinkius, o taip pat nesutapimus, susijusius su atramų diskretizavimu. Nagrinėti du modeliai: vamzdis paremtas į ištisinį tamprų pagrindą ir vamzdis paremtas diskretinėmis atramomis. Abiejų modelių mechaninės savybės yra analogiškos. Tampraus pagrindo tamprumo koeficientas:

$$K_p = \frac{E_s A_s}{LL_s}. \quad (2.4)$$

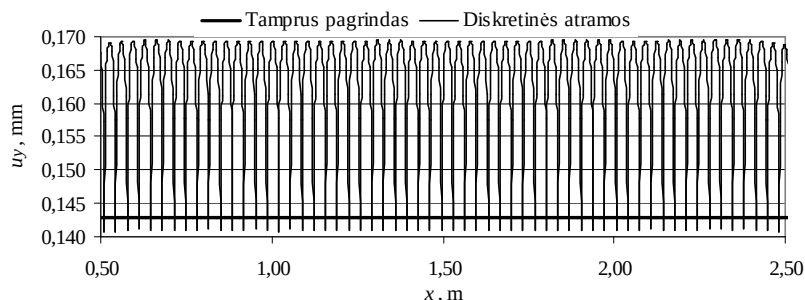
Čia $E_s = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$ – plieninių strypų tamprumo modulis; $A_s = 9,831 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ – bendras strypų skerspjūvio plotas; $L = 3 \text{ m}$ – bėgio ilgis, $L_s = 0,1025 \text{ m}$ – strypo (spyruoklės) skaičiuojamasis ilgis.

Įstačius reikšmes į išraišką (2.4), gaunama tampraus pagrindo tamprumo koeficiento reikšmė, lygi $K_p = 6,714 \text{ GPa}$.

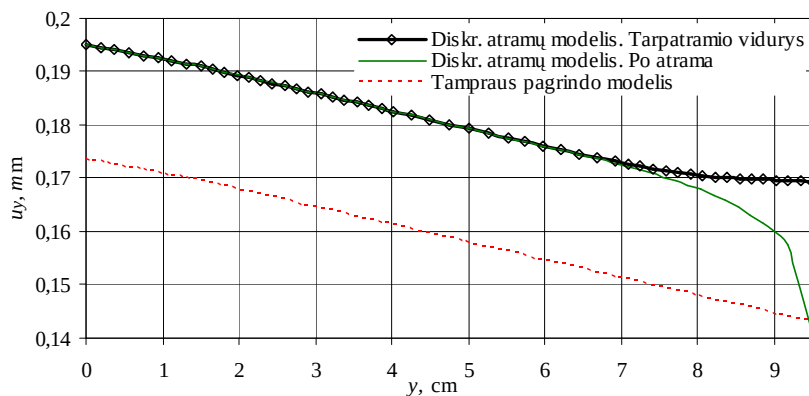
Tiriant atramų įtaką rezultatams, bėgis apkrautas tolygiai pasiskirsčiusia pastovaus $q = 31,2 \text{ MPa}$ slėgio apkrova, lygia eksperimento metu išmatuotos apkrovos vidurkiui. Skerspjūvio poslinkiai aprašomi skersiniais poslinkiais u_y .

Atlikus skaičiavimus pasirinktais modeliais, nustatyta, kad apkrauto bėgio slystamojo paviršiaus forma abiejuose modeliuose išlieka nepakitusi. Gautos skirtingos poslinkių u_y reikšmės bėgio paviršiuje: modeliui su ištisine atrama $u_y = 0,174 \text{ mm}$ ir modeliui su diskretinėmis atramomis $u_y = 0,195 \text{ mm}$. Poslinkių skirtumas $\Delta u_y \approx 0,02 \text{ mm}$ gali būti laikomas kaip šių dviejų modelių rezultatų nesąryšis, atsiradęs dėl lokalių efektų korpuso-atramų zonoje.

Paremto šaudyklės korpuso išorinio paviršiaus skersiniai poslinkiai pavaizduoti (2.10 pav., a). Grafike matomas skirtingas poslinkių išilginis pasiskirstymas, atsiradęs dėl modeliuose taikomų skirtingų atramų tipų. Modelio su diskretinėmis atramomis poslinkių kreivė kinta periodiškai. Ji rodo dėl vietinių efektų atsiradusį stiprų taškinės diskretinės atramos (strypo) išsiskverbimą į korpusą. Poslinkio u_y žemutinė riba $u_y = 0,141$ mm praktiškai sutampa su bėgio ant tampraus pagrindo sprendiniu.



a)



b)

2.10 pav. Poslinkių kitimas bėgyje: a) korpuso išorinio paviršiaus poslinkių išilginis kitimas $0x$ kryptimi, b) skersinis kitimas $0y$ kryptimi

Fig. 2.10. Variation of transversal displacement of the rail: a) longitudinal variation on the external surface; b) variation through the height

Gautas poslinkių u_y skersinis kitimas nuo bėgio paviršiaus iki korpuso paviršiaus (2.10 pav., b) išryškina atramų skirtumus. Grafikas vaizduoja abiejų

modelių sprendinių skirtumų pobūdį atramų aplinkoje. Modelio su diskretinėmis atramomis poslinkių tarpatramyje kreivė kokybiškai panaši į modelio ant tampraus pagrindo kreivę. Tai paaiškinama lokalių efektų, atsiradusių dėl diskretinių atramų, susilpnėjusia įtaka. Esminis atramų skirtumas atsiranda gretinant poslinkius diskretinių atramų (strypų) srityse. Modelio su diskretinėmis atramomis poslinkiai po atrama, artėjant prie korpuso išorės, artėja prie modelio su ištisine atrama poslinkių reikšmės.

Rezultatai rodo, kad modeliui su diskretinėmis atramomis pilnutinis bėgio paviršiaus skersinis poslinkis $u_y \approx 0,195$ mm susideda iš skerspjuvio susispaudimo $\Delta u_{y.skersp} \approx 0,030$ mm ir diskretinių atramų lokalių efektų paklaidos $\Delta u_{y.modelo} \approx 0,020$ mm. Likęs poslinkis $\Delta u_{y.atram} \approx 0,145$ mm atsirado dėl varžtų sutrumpėjimo. Gautas skerspjuvio susispaudimas yra apytiksliai lygus 15 % viso skersinio bėgio paviršiaus poslinkio. Gautas modelio su diskretinėmis atramomis poslinkių nesąryšis s , lyginant su modelio ant tampraus pagrindo poslinkiais sudaro 10 %.

Didžiausi skirtumai tarp nagrinėtų atramų tipų atsiranda šaudyklės korpuso išorėje. Bėgio paviršiaus deformacijos skirtumas abiejų atramų artinių atveju yra nedidelis. Tolesniems tyrimams pasirinktas skaitinis modelis su diskretinėmis atramomis, nes jis tiksliau apibūdina bėgio formą ir įvertina skerspjuvio susispaudimą, ko iš principo neivertina lenkiamų strypų modeliai.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Pasirinktas EMŠ dvimatis BE modelis, lyginant su žinomais lenkiamų sijų tipo modeliais, tiksliau aprašo šaudyklės kompozitinę konstrukciją ir atramas, įvertina konstrukcijos skerspjuvių susispaudimą ir kraštinius efektus.

2. Parinktas BE tinklo tankis tenkina reikiamą tikslumą, nes gautos poslinkių reikšmės nuo modelio su tankiausiu BE tinklu gautų skersinių poslinkių skiriasi 3 %.

3. Ištyrus atramų diskretiškumo įtaką poslinkiams, gautas 10 % neatitikimas. Atsižvelgus į šią priežastį, pasirinktas modelis su diskrečiosiomis tamprėmis atramomis (spyruoklėmis).

4. Remiantis skaičiavimų rezultatais, nustatytas šaudyklės skerspjuvio susispaudimas sudaro 15 % slystamojo paviršiaus skersinio poslinkio.

5. Išanalizavus laisvai sklindančių paviršiaus bangų greitį, nustatyta jo reikšmė $v_{kr}=1378$ m/s. Skirtumas tarp skaitiškai gautos ir analitiškai gautos kritinio greičio $v_{kr}=1440$ m/s reikšmių neviršija 5 %.

Šaudyklės mechaninių rodiklių priklausomybės nuo apkrovos judėjimo greičio tyrimas

Tiriant EMŠ dinamiką labai svarbu parinkti tinkamus rodiklius kokybiškai ir kiekybiškai įvertinančius įvairių veiksnių įtaką mechaniniam būviui ar kulkos-bėgio kontaktui.

Šio tyrimo tikslas – parinkti tinkamus rodiklius ir gauti jų priklausomybes nuo apkrovos judėjimo greičio ir palyginti šias priklausomybes su analizinėmis išraiškomis ir kitų autorių gautais eksperimento rezultatais.

Šiame skyriuje aptarti pasirinkti rodikliai ir jų tyrimo rezultatai. Aptarti skaitinių eksperimentų rezultatai, kai bėgis veikiamas pastovaus dydžio pastoviu greičiu judančia apkrova. Bėgio dinamikai įvertinti pasiūlyti šie rodikliai: dinaminis koeficientas, efektinė amplitudė ir geometrinis trinties rodikliai.

Gautos šių rodiklių priklausomybės nuo apkrovos judėjimo greičio. Gautos priklausomybės palygintos su analiziniais rezultatais, o taip pat su eksperimento metu gautais rezultatais.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai (Tumonis ir kiti 2007a), (Tumonis ir kiti 2007b).

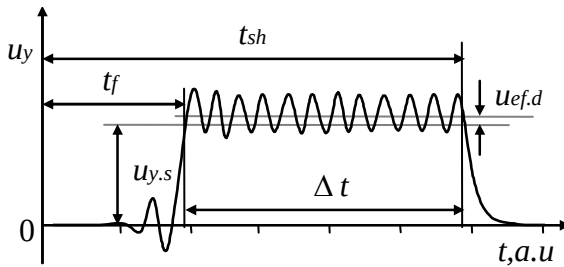
3.1. Efektinė amplitudė

Apkrautas statiškai apkrova q_s , EMŠ bėgio mazgas pasislenka skersine kryptimis $u_{y,s}$. Jei mazgas apkraunamas dinamiškai apkrova $q_d = q_s$, tai jis pradeda svyruoti, o mazgo poslinkių svyravimų vidurkis $\overline{u_{y,d}} = u_{y,s}$ lygus statiniam poslinkiui. Dinaminių poslinkių vidurkis neįvertina svyravimų nuokrypio nuo vidutinio poslinkio. Siekiant aprašyti apkrauto mazgo svyravimų nukrypimą nuo statinės reikšmės, pasiūlytas efektinės dinaminės amplitudės rodiklis, analogiškas elektronikoje taikomai el. įtampos efektinei amplitudei, rodančiai svyravimų nuokrypių nuo statinio sprendinio kvadratinį vidurkį.

Efektinė dinaminė amplitudė $u_{ef,d}$ išreiškiama naudojant mažiausių kvadratų metodą, integruojant apkrauto mazgo dinaminių poslinkių $u_y(t)$ ir statinių poslinkių $u_{y,s}$ skirtumo kvadratą.

$$u_{ef,d} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_{t_f}^{t_{sh}} (u_y(t) - u_{y,s})^2 dt}, \quad (3.1)$$

čia $\Delta t = t_{sh} - t_f$ yra mazgo žadinimo trukmė; t_{sh} – šūvio trukmė; t_f – laiko tarpas nuo šūvio pradžios iki mazgo apkrovimo. Statiškai apkrautas mazgas nesvyruoja, todėl $u_{ef,d} = 0$.



3.1 pav. Efektinės amplitudės skaičiavimo schema

Fig. 3.1. Concept of the effective amplitude

Efektinės amplitudės apskaičiavimo schema pavaizduota (3.1 pav.).

Mazgo, kurio padėtis x_n , žadinimo laikas Δt , apkrovai judant pastoviu greičiu v , aprašomas taip:

$$\Delta t = \frac{(L - x_n)}{v}. \quad (3.2)$$

Taigi, efektinė amplitudė rodo tikrai dinamiškai apkrauto mazgo poslinkių svyravimo nukrypimą nuo statinės reikšmės.

3.2. Trinties rodiklis

Šaudyklės mechaniniam efektyvumui didžiausią įtaką daro kulkos-bėgio kontakto zonoje vykstantys reiškiniai, tokie kaip trintis. Įvertinti statinės ir dinaminės trinties jėgų kitimą, autoriaus pasiūlytas originalus geometrinis trinties jėgų rodiklis.

Pasiūlytas rodiklis tenkina nurodytą tikslą – susieti kulkos-bėgio paviršiaus kontakto trinties pokyčius su bėgių deformacija. Rodiklis susieja geometrinės prigimties statinę ir dinaminę trinties jėgas su bėgio paviršiaus deformavimo plotu. Laikoma, kad kulkos-bėgio kontaktas yra nesusietas ir bėgio deformacijos atsiranda tik dėl išorinės jėgos poveikio. Apkrova aprašoma kaip slėgis q arba skersinė jėga F_n .

3.2.1. Bematis trinties rodiklis

Trinties jėga, nepaisant įvairių kitų, labiausiai priklauso nuo šių fizikinių reiškinių: besitrinančių paviršių reliatyvaus greičio, kontakto slėgio skersine kryptimi, mechaninių kontakto savybių. Statinę trintį ir normalinę jėgą susieja Kulono dėsnis:

$$F_{tr.s} = \mu_s R_{R.s}, \quad (3.3)$$

čia μ_s – statinis trinties koeficientas; $F_{R.s}$ – statinė normalinė reakcijos jėga.

Nesant kitų sąveikos efektų, statinė reakcijos jėga $F_{R.s}$ yra lygi veikiančios kulką išorinės jėgos normalinei dedamajai F_N , todėl trinties jėgos išraišką galima pertvarkyti taip:

$$F_{tr.s} = \mu_s F_N. \quad (3.4)$$

Čia normalinė jėga F_N atitinka elektromagnetinės prigimties skersinę jėgą, veikiančią šūvio metu.

Dinaminio poveikio atveju, tangentinė trinties jėga $F_{tr.d}$ kinta laike. Ši jėga kaip ir statiniu atveju yra proporcinga dinaminei normalinei reakcijos jėgai $F_{R.d}(t)$, t. y.:

$$F_{tr.d}(t) = \mu(v(t)) F_{R.d}(t). \quad (3.5)$$

Trinties koeficientas μ priklauso nuo kulkos greičio v ir sąveikaujančių paviršių medžiagų savybių. Šiek tiek duomenų apie trinties koeficiento dydį mažiems besitrinančių paviršių reliatyviems greičiams galima rasti (Ross, Ferrentino, Young 1982), bet trinties koeficiento reikšmės iki šiol nėra nustatytos esant dideliems besitrinančių paviršių greičiams. Remiantis keliomis prielaidomis, trinties koeficientas μ_d virsta pastoviu, kai kulka pasiekia tam tikrą greitį. Šiame darbe lygtis (3.5) supaprastinta, remiantis prielaida, kad kulkos greitis viršija tam tikrą slenkstinį greitį, nuo kurio μ_d tampa pastoviu. Tada galutinė dinaminė trinties jėga:

$$F_{tr,d}(t) = \mu_d F_{R,d}(t). \quad (3.6)$$

Ši išraiška išreiškia dinaminę trintį.

Norint ištirti trinties jėgų balanso priklausomybę nuo bėgių deformacijos dydžio, autoriaus pasiūlytas santykinis trinties jėgų rodiklis:

$$\eta = \frac{F_{tr,d}}{F_{tr,s}}. \quad (3.7)$$

Šis rodiklis rodo dinaminės (3.6) ir statinės trinties (3.3) jėgų santykį. Daroma prielaida, kad statinė trintis susijusi su nedeformuotu bėgio mechaniniu būviu, o dinaminė trintis aprašo kintantį laiką deformuotą bėgio mechaninį būvį. Šis rodiklis turi fizikinę prasmę, kai $\mu \geq 0$, ir gali būti nustatytas skaitiškai. Dinaminė normalinė reakcijos jėga gaunama suintegravus skersinius kontakto įtempius σ_N :

$$F_{R,d}(t) = \int_0^{S_p} \sigma_N(x, y, t) dS, \quad (3.8)$$

čia S_p yra kulkos-bėgio kontakto plotas. Remiantis tiesine tamprumo teorija, normalinis įtempis yra:

$$\sigma_N = K u_N, \quad (3.9)$$

čia K – standis [Pa/m].

Dvimačiu atveju, kontakto įtempiai išlieka pastovūs per visą bėgio plotą b . Tada lygtį (3.8) galima išreikšti taip:

$$F_{R,d}(t) = Kb \int_0^{L_{kulk}} u_N(x, t) dx, \quad (3.10)$$

arba

$$F_{R,d}(t) = KbS(t), \quad (3.11)$$

čia S yra efektyvus kontakto deformavimo plotas [m^2]; L_{kulk} – kulkos ilgis [m] (3.2b pav.). Deformavimo plotas po kulka

$$S(t) = \int_0^{L_{kulk}} u_N(x,t) dx. \quad (3.12)$$

Išrašius (3.4), (3.5) ir (3.7) lygtis į lygtį (3.3), bemačio trinties rodiklio išraiška įgauna tokį pavidalą:

$$\eta(t) = \kappa S(t), \quad (3.13)$$

čia

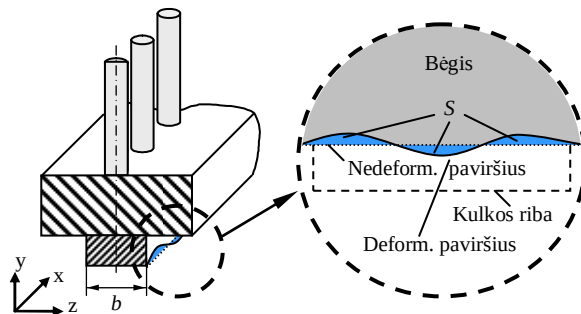
$$\kappa = \frac{\mu_d}{\mu_s} \frac{Kb}{F_N} \quad (3.14)$$

yra proporcingumo koeficientas [m^{-2}].

Iš lygties (3.13) daroma išvada, kad trinties η rodiklis tiesiogiai proporcingas kontakto deformavimo plotui S . Taigi, bematis trinties rodiklis įvertina kontakto reakcijos jėgą, paviršiaus išsikreivinimą, deformaciją ir judančios apkrovos greitį. Esant mažiems kulkos greičiams, dinaminė trinties jėga lygi statinei trinčiai, o $\eta \approx 1$.

3.2.2. Deformavimo ploto skaičiavimas

Deformavimo plotas S yra rodiklis, susiejantis bėgio-kulkos kontakto skersines deformacijas su normaline reakcijos jėga (3.2 pav.).



3.2 pav. Deformavimo ploto prigimtį aiškinanti schema

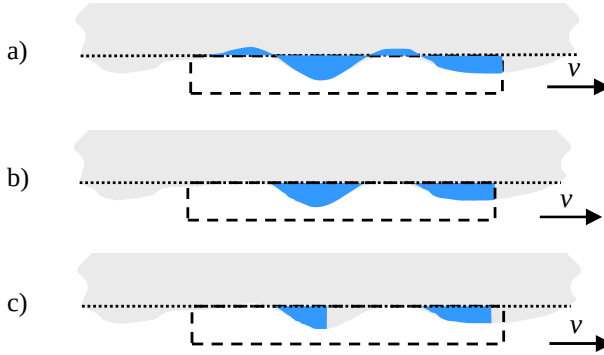
Fig. 3.2. Concept of the deformation area

Jis lygus figūros, ribojamos deformuoto ir nedeformuoto bėgio paviršiaus kreivėmis. Deformavimo ploto apskaičiavimo būdas priklauso nuo pasirinkto artinio, aprašančio trinties jėgos prigimtį.

Pasiūlyti keli šio ploto skaičiavimo būdai, besiremiantys skirtingais normalinių poslinkių įvertinimo metodais. Pirmasis artinys įskaito visas kontakto skersinio poslinkio u_y reikšmes:

$$u_N = u_y \cdot \quad (3.15)$$

Šis artinys pilnutinai apima visą kontaktuojantį paviršių.



3.3 pav. Deformavimo ploto skaičiavimo schemas:

a) pilnutinė trintis, (3.15) formulė; b) šepetėlio trintis, (3.16) formulė;

c) paviršiaus į paviršių trintis, (3.17) formulė

Fig. 3.3. Computation of deformation area: a) total friction, formula (3.15); b) brush friction, formula (3.16); c) surface-to-surface friction, formula (3.17)

Ploto skaičiavimui naudojant (3.15) formulę, skersiniai poslinkiai gali įgauti neigiamas reikšmes. Dėl šios priežasties, išraiškoje (3.12) dalis ploto gali būti neigiama ir tai mažina deformavimo ploto galutinę reikšmę. Šis artinys atspindi mažiausią trinties rodiklį. Lygtis (3.15) gali būti naudojama tik vaizdumo tikslais, kaip $S(t) \geq 0$ sąlygos pažeidimo indikatorius. Autorius pasiūlė artinius, korektiškiau nei (3.15) artinys apibūdinančius geometrinę dinaminės trinties prigimtį. Artinys, įvertinantis tik neigiamus kontakto poslinkius:

$$u_N = \begin{cases} 0, & \text{jei } u_y \geq 0 \\ |u_y|, & \text{jei } u_y < 0 \end{cases} \quad (3.16)$$

Šiuo atveju atsižvelgiama tik į tuos skersinius bėgio įlinkius, kurie nukreipti kulkos kryptimi, t. y., bėgio sritis, kurios kontaktuoja su lygiu kulkos paviršiumi.

Trečiasis artinys įvertina tiek kontaktuojančio bėgio paviršiaus skersinių poslinkių kryptį, tiek ir paviršiaus deformavimo greičio kryptį:

$$u_N = \begin{cases} 0, & \text{jei } u_y \geq 0 \\ |u_y|, & \text{jei } u_y < 0, \text{ ir } du_y / dt < 0 \end{cases} \quad (3.17)$$

Šis artinys iš visų paminėtų, turėtų geriausiai aprašyti mechaninį kulkos-bėgio kontaktą ir apibūdinti trinties jėgos geometrinę prigimtį.

Pasiūlytų deformavimo plotų skaičiavimo schemas pavaizduotos (3.3 pav.). Tamsi (žydra) spalva rodo deformuoto bėgio poslinkius, įskaitomus į bėgio deformavimo plotą. Punktyrinis kontūras žymi kulkos ribas, o rodyklė – kulkos judėjimo kryptį.

3.3. Dinaminis sprendinys, veikiant pastovios amplitudės apkrovai, judančiai pastoviu greičiu

Vienas dažniausiai skaičiavimams naudojamų EMŠ modelių (1.5) yra bėgis, apkrautas laiptelio pavidalą turinčia apkrova (2.1), judančia pastoviu greičiu.

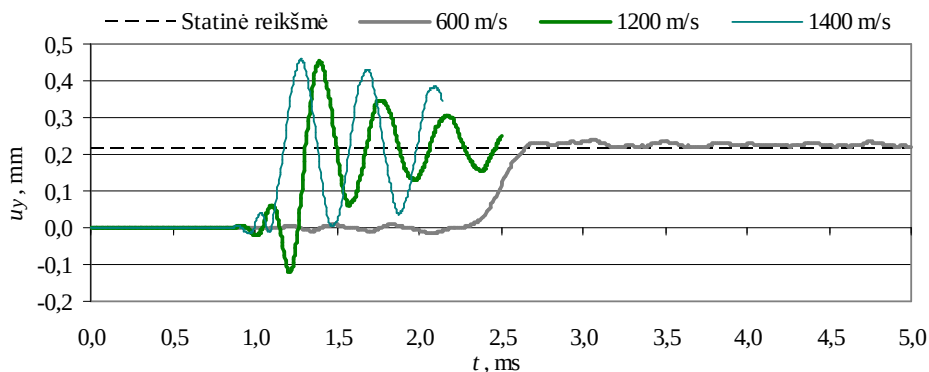
EMŠ, aprašoma (1.5), pasižymi savybe, kad apkrovos judėjimo greičiui artėjant prie kritinio greičio v_{kr} , dėl apkrovos žadinimo indukuojasi stiprūs rezonansiniai konstrukcijos virpesiai. Šis nepageidaujamas reiškinys mažina įrenginio efektyvumą ir tarnavimo trukmę.

Pažymėtina, kad šis apkrovos jėgos supaprastinimas (2.1) literatūroje labai paplitęs ir jį įprasta naudoti modeliuojant. Taikomas apkrovų modelis tik iš dalies atitinka apkrovą, veikiančią tikromis sąlygomis, nes neatsižvelgia tiek į apkrovos kitimą, tiek į jos fronto judėjimo greičio kitimą. Nepaisant minėtų trūkumų, šis supaprastintas EMŠ modelis leidžia aprašyti šaudyklės dinaminį būvį.

Darbe atlikta EMŠ dinaminė analizė naudojant BEM ir analizinį metodą ir palyginti rezultatai, gauti su apkrovos judėjimo greičiais, kintančiais nuo 600 m/s iki 1600 m/s. Šie greičiai telpa šaudyklėje „EMA-3“ realizuojamame greičių diapazone. Greičių režis pasirinktas tiksliai nustatyti pasiūlytų rodiklių priklausomybę nuo greičio. Į intervalą patenka šaudyklės kritinis greitis, lygus $v_{kr} = 1440$ m/s, todėl nustatyta šaudyklės ikikritinė, kritinė ir virškritinė dinaminė elgsena. Skaičiuojant slopinimo efektai į modelį neįskaityti.

Skaičiavimų rezultatai gauti BEM ir analizine (1.6) išraiška parodė žymų svyravimų pobūdžio skirtumą, kai apkrova juda ikikritiniu 600 m/s ir artimu kritiniam 1200 m/s greičiais. Pavyzdžiui, BEM gauta bėgio paviršiaus

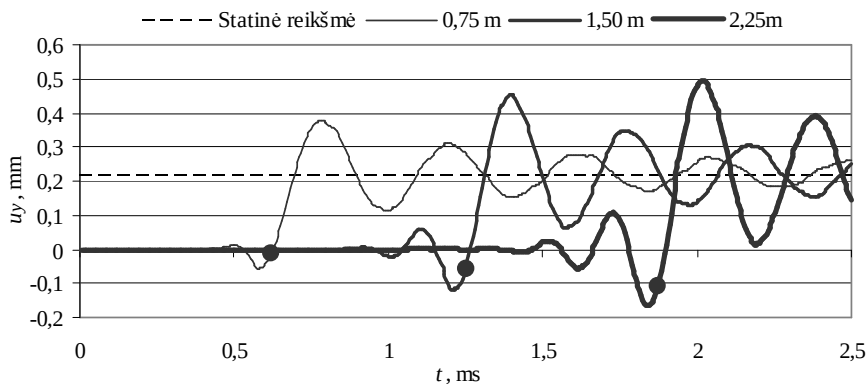
viduriniojo mazgo ($x = 1,5$ m) poslinkių svyravimų laiko istorija veikiant apkrovai, judančiai skirtingais greičiais (3.4 pav.).



3.4 pav. Bėgio paviršiaus viduriniojo mazgo ($x = 1,5$ m) poslinkių istorijos esant skirtingiems apkrovos judėjimo greičiams

Fig. 3.4. Displacement histories of point ($x = 1.5$ m) on the sliding surface at different velocities

Bėgį paveikus dinamine apkrova, poslinkių svyravimų amplitudė du kartus viršija statinę poslinkių reikšmę.



3.5 pav. Skirtingų bėgio mazgų poslinkių kitimas laike, veikiant bėgį apkrova, judančia 1200 m/s greičiu

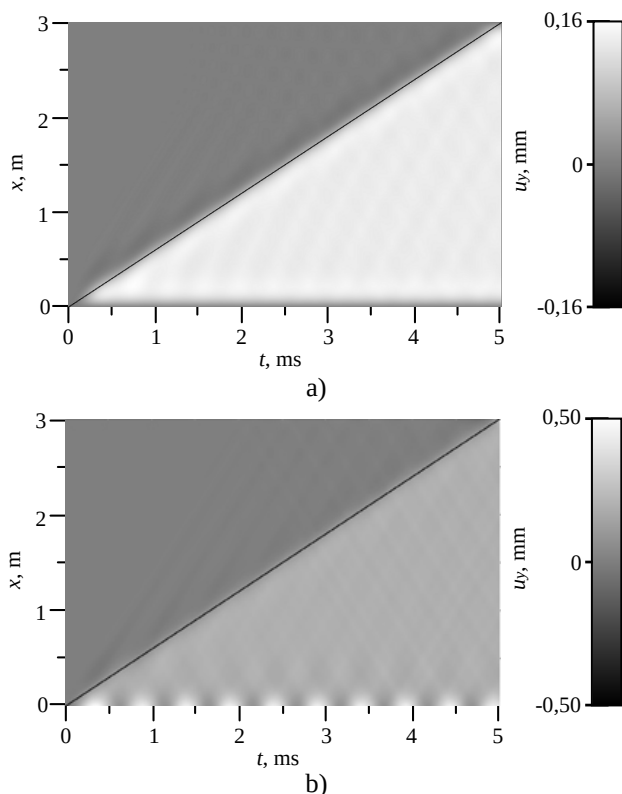
Fig. 3.5. Displacement histories of various points at velocity 1200 m/s

Skirtingų bėgio mazgų poslinkių kitimas laike judant apkrovai 1200 m/s greičiu parodytas (3.5 pav.). Mazgai, kurių koordinatės 0,75 m ir 2,25 m išsidėstę

simetriškai bėgio viduriniojo mazgo atžvilgiu. Paveiksle parodyti juodi taškai žymi laiko momentą, kai atitinkami mazgai yra apkraunami. Grafike horizontalia punktyrine linija parodyta mazgų poslinkio reikšmė statiniu atveju.

Pastebėtina, kad mazgai pradeda svyruoti dar iki apkrovos frontas pasiekia mazgą. Šis laiko tarpas didėja kintant mazgo padėčiai ir yra didžiausias mazgui, kurio padėtis 2,25 m. Tai paaiškinama tuo, kad apkrovos sužadinti svyravimai sklinda didesniu greičiu, nei apkrovos frontas. Didėjant mazgų atstumui nuo bėgio pradžios, didėja laiko intervalas tarp svyravimų pradžios ir mazgo apkrovimo akimirkos.

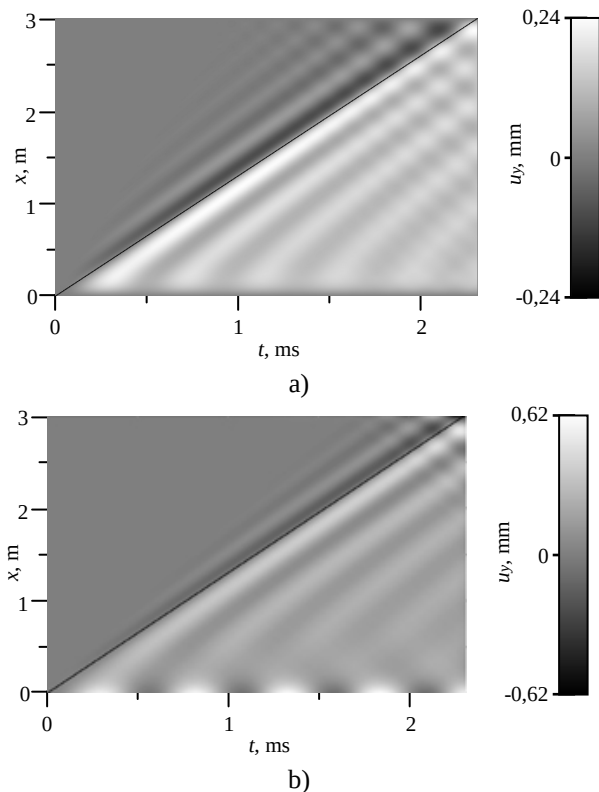
Viso bėgio slystamojo paviršiaus skersinių poslinkių u_y kitimas laike pavaizduotas dvimačiais grafikais (3.6 ir 3.7 pav.), kuriuose kiekvieno taško šviesumas rodo bėgio mazgo, kurio padėtis x laiko momentu t poslinkio u_y vertę.



3.6 pav. Dvimatis bėgio paviršiaus mazgų poslinkių vaizdas, judant apkrovai $v = 600$ m/s greičiu: a) analitinis sprendinys, b) BEM sprendinys.

Fig. 3.6. Two-dimensional illustration of time history of transversal displacements at $v = 600$ m/s: a) analytical results b) FEM results

Pilka spalva rodo nulinius poslinkius; šviesesnė – teigiamus; tamsesnė spalva – neigiamus poslinkius. Ryški tiesė rodo apkrovos fronto padėtį. Tokio tipo grafikams vaizduoti autoriaus sukurta originali programa. Pažymėtina, kad BEM ir analiziniu metodais gauti sprendiniai nesutampa. Šis skirtumas pasireiškia bėgio galuose.



3.7 pav. Dvimatis bėgio paviršiaus mazgų skersinių poslinkių vaizdas, judant apkrovai $v = 1300$ m/s greičiu: a) analitinis sprendinys; b) BEM sprendinys

Fig. 3.7. Two-dimensional illustration of time history of transversal displacements at $v = 1300$ m/s: a) analytical results; b) FEM results

Analizine (1.6) išraiška gautos poslinkių reikšmės bėgio galuose artėja prie nulio, kai BEM gautos reikšmės dėl susilpnėjusios atramų įtakos įgyja didesnes reikšmes, nei bėgio viduryje. BEM gauti rezultatai atspindi tikrą deformuoto bėgio formą, nes analitiniai sprendiniai grindžiami vienmačio modelio su ištisinėmis atramomis skaičiavimais.

Vaizdumo tikslais parodyti bėgio poslinkių kitimo laike grafikai, vaizduojantys visiškai skirtingą bėgio elgseną. Pirmuoju atveju (3.6 pav.), apkrovos judėjimo greitis $v = 600$ m/s yra žymiai mažesnis už kritinį $v_{kr} = 1440$ m/s, kitu atveju (3.7 pav.) apkrovos judėjimo greitis $v = 1300$ m/s artimas kritiniam.

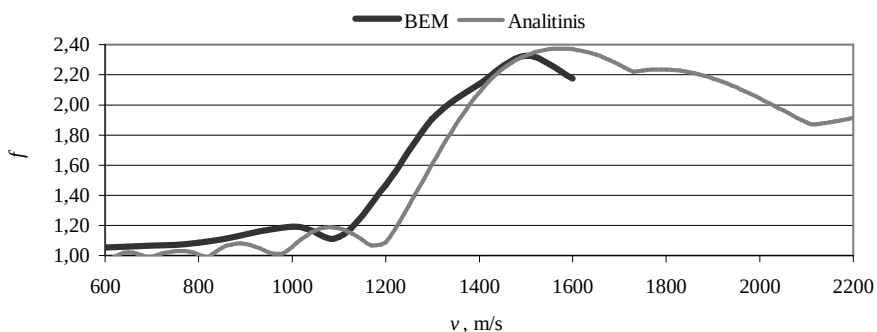
Grafike, rodančiame bėgio paviršiaus skersinių poslinkių kitimo istoriją (3.6 pav.), matomi nežymūs dinaminiai efektai. Maža šviesesnė sritis virš tiesės rodo nežymų poslinkių padidėjimą prieš poslinkių frontą. Bėgio būvis ir poslinkių vaizdas artimi statiniam sprendiniui, tačiau amplitudė yra šiek tiek didesnė, nei statiniu atveju ($u_{y,st} = 0,195$ mm).

Kai apkrovos greitis $v = 1300$ m/s artimas kritiniam (3.7 pav.), aiškiai matosi dinaminis deformacijų pobūdis. Matyti, kad žadinimo bangos sklinda tiek pirmyn, tiek atgal nuo apkrovos fronto, drastiškai paveikdamos kulkos-bėgio kontakto būvį.

Parodyti apkrovos judėjimo greičio įtaką bėgio būviui pasitelktas dinamiškumo koeficientas – vienas paprasčiausių rodiklių, naudojamų daugelyje medžiagos mechaninio atsparumo uždavinių. Dinamiškumo koeficientas (Fryba 1976) f išreiškiamas kaip didžiausių poslinkių bėgio taške $\max u_y(x,t)$ santykiu su statine poslinkių reikšme tame pačiame taške $u_{y,st}(x)$:

$$f(x) = \frac{\max u_y(x,t)}{u_{y,st}(x)}. \quad (3.18)$$

Dinamiškumo koeficientas atsižvelgia į bėgio skersinių poslinkių didžiausios amplitudės priklausomybę nuo greičio.



3.8 pav. Dinamiškumo koeficiento priklausomybė nuo apkrovos judėjimo greičio, panaudojus skirtingais metodais gautus bėgio paviršiaus poslinkius
Fig. 3.8. Variation of the dynamic coefficient against loading velocities for various calculating methods

Bėgio viduriniojo paviršiaus taško poslinkio statinė reikšmė, gauta BEM ir analiziniu metodu yra $u_{y.st} = 0,195$ mm.

Dinamiškumo koeficiento priklausomybei nustatyti pasinaudota BEM ir analitiškai gautomis poslinkių laiko istorijomis.

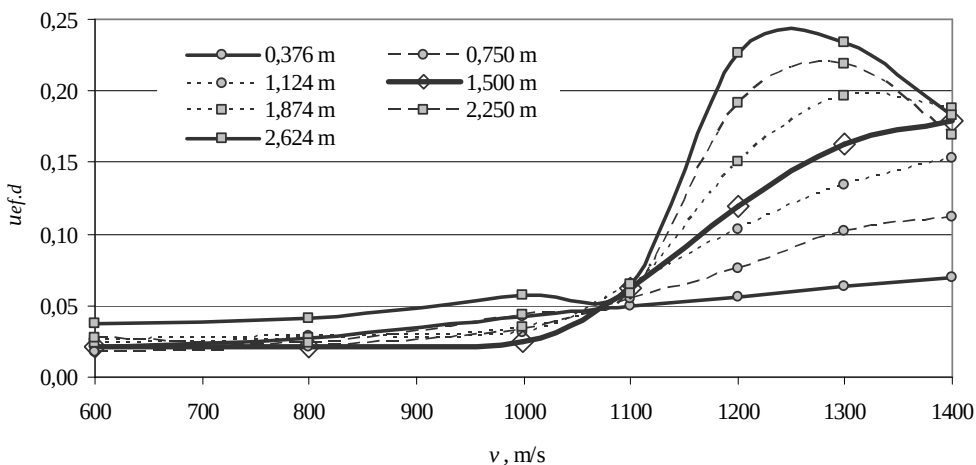
Dinamiškumo koeficiento (3.18) priklausomybė nuo apkrovos judėjimo greičio parodyta (3.8 pav.). Grafike stebimi rezonansiniai reiškiniai, stipriausiai pasireiškiantys 1400–1500 m/s aplinkoje.

Grafike pavaizduotos kreivės rodo BEM ir analizinio rezultatų nesutapimą. Skiriasi kokybinės f priklausomybės nuo greičio. Abiejų metodų nesutapimas, lyginant pagal kritinio greičio reikšmes, viršija 7 %.

3.3.1. Bėgio efektinės amplitudės priklausomybė nuo greičio

Bėgio mazgų poslinkių svyravimų efektinės amplitudės priklausomybė nuo greičio išreiškia apkrovos judėjimo greičio įtaką bėgių svyravimų dydžiui. Efektinė amplitudė skaičiuojama pagal anksčiau pateiktą metodiką. Sukurta originali programa efektinės amplitudės priklausomybei nuo greičio sudaryti. Programa, pasinaudodama bėgio mazgų poslinkių laiko istorijomis, gautomis BEM ir analiziniu metodais suskaičiuoja pasirinkto mazgo efektinę amplitudę tam tikram apkrovos judėjimo greičiui.

Gauta efektinės amplitudės (3.1) priklausomybė nuo skirtingų apkrovos judėjimo greičių (3.9 pav.).

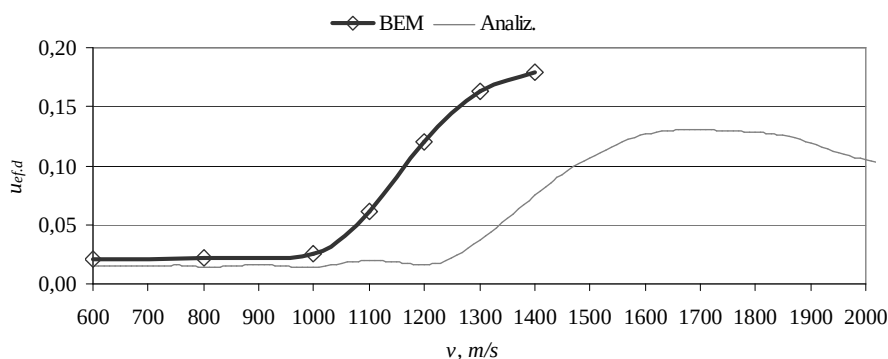


3.9 pav. Skirtingų bėgio mazgų efektinės amplitudės priklausomybė nuo apkrovos judėjimo greičio

Fig. 3.9. Variation of effective amplitudes against loading velocity in various points

Grafike matyti, kad efektinė amplitudė priklauso tiek nuo apkrovos judėjimo greičio, tiek ir nuo nagrinėjamos bėgio paviršiaus vietos. Išlaikant simetriją, labiausiai tinkama vieta bėgio dinamikai nagrinėti yra vidurinysis bėgio slystamojo paviršiaus taškas ($x = 1,5$ m). Kai apkrovos judėjimo greitis pasiekia 1400 m/s, stebimas rezonanso reiškiny

Viduriniojo bėgio paviršiaus taško efektinės amplitudės priklausomybė nuo judėjimo greičio, gauta remiantis analiziniais (1.5) ir BEM rezultatais, pavaizduota (3.10 pav.). Gauta pasinaudojus analiziniais rezultatais kreivė yra detalesnė dėl didesnio taškų skaičiaus.



3.10 pav. Bėgio viduriniojo mazgo efektinės amplitudės priklausomybė nuo apkrovos judėjimo greičio

Fig. 3.10. Variation of effective amplitude against loading velocity in mid-point of the rail

Gautos remiantis BEM rezultatais efektinės amplitudės didžiausia reikšmė stebima EMŠ kritinio greičio (1440 m/s) aplinkoje ir siekia 0,18 mm.

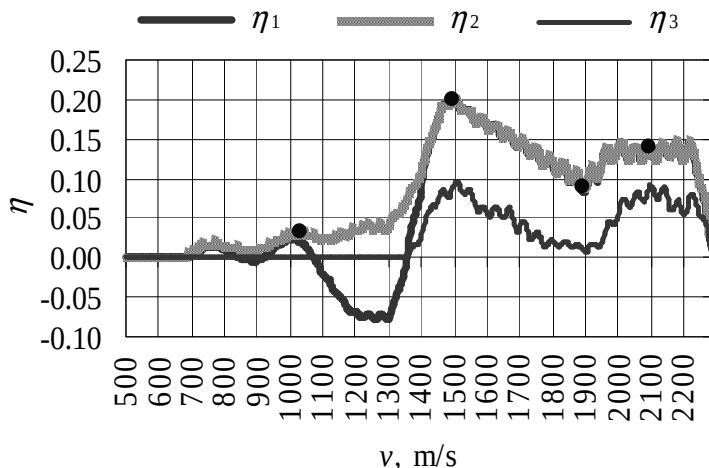
Gautos remiantis analiziniais rezultatais efektinės amplitudės didžiausia reikšmė stebima prie 1650 m/s greičio ir siekia 0,13 mm.

Šis reikšmingas rezultatų nesutapimas rodo skaitinių modelių savybių skirtumus. Efektinės amplitudės priklausomybės tarpusavyje skiriasi labiau, nei dinamiškumo koeficiento priklausomybės. BE modeliu gautos rodiklių priklausomybės rodo prastesnes EMŠ dinamines savybes. Projektuojant EMŠ, analizinio modelio rezultatai gali duoti pernelyg optimistinius rezultatus, neatsargius tinkamumo požiūriu.

3.3.2. Trinties rodiklio kitimas

Santykinio trinties jėgų rodiklio priklausomybė nuo greičio rodo statinės ir dinaminės trinties jėgų santykį. Šis geometrinės prigimties rodiklis skaičiuojamas pagal pasiūlytą metodiką. Autoriaus sukurta originali programa rodiklio (3.13) priklausomybei nuo greičio skaičiuoti, pasinaudodama bėgio mazgų skersinių poslinkių istorijomis $u_y(x, t)$, gautomis BEM ir analiziniu metodais, skaičiuoja rodiklį esant tam tikram apkrovos judėjimo greičiui.

Gauta trinties rodiklio priklausomybė (3.13) nuo skirtingų apkrovos judėjimo greičių parodyta (3.11 pav.) Čia η_1 suskaičiuotas, pasinaudojus (3.15) artiniu, η_2 – pasinaudojus (3.16), o η_3 – pasinaudojus (3.17) artiniu, įvertinančiu geometrinę trinties jėgos prigimtį.



3.11 pav. Trinties rodikliai η_1 , η_2 , η_3 , suskaičiuoti atitinkamai pasinaudojus (3.15), (3.16) ir (3.17) formulėmis

Fig. 3.11. Variation of various friction factors η_1 , η_2 , η_3 , obtained according to (3.15), (3.16) and (3.17) against loading velocity

Didžiausia trinties jėgų koeficiento reikšmė visose kreivėse stebima kritinio greičio $v_{kr} = 1440$ m/s aplinkoje.

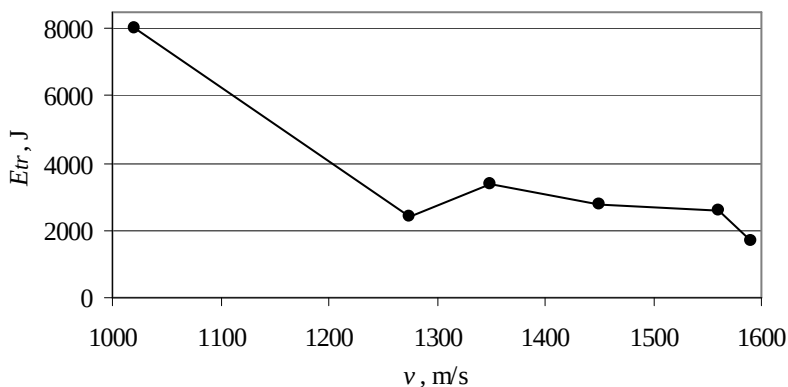
Pasiūlyti trinties rodikliai, atsižvelgiantys į poslinkių kitimą ir bėgio-kulkos kontakto geometrinį pavidalą, atspindi šaudyklės dinaminį būvį. Artinys, pilnutinai įvertinantis kontaktuojantį kulkos-bėgio paviršių (3.15), rodo didžiausius galimus mechaninius energijos nuostolius kontakto srityje, atsiradusius dėl trinties.

3.4. Skaitinio ir natūrinio eksperimentų rezultatų sugretinimas

Skaitinio eksperimento rezultatų sutapimas su natūrinių eksperimentų rezultatais yra itin svarbi skaitinių metodų tinkamumo tikrinimo sąlyga. Tiesioginis ar netiesioginis rezultatų sutapimas leidžia teigti, jog naudojamas modelis tinka. Deja, natūrinio eksperimento rezultatų, atspindinčių EMŠ „EMA-3“ mechaninį būvį yra labai mažai.

ISL publikacijoje (Schneider, Schneider 2005) tirtas „EMA-3“ šaudyklės bėgio-kulkos kontaktas.

Tyrimai parodė, kad didėjant kulkos greičiui, trinties nuostoliai prie 1000 m/s mažėja nuo $E_{tr}/E_{kin} = 0,5$ iki $E_{tr}/E_{kin} = 0,03$ viršijus 1400 m/s greitį. Publikacijoje (Schneider, Schneider 2007) skelbiama, kad viršijus 1400 m/s greitį, tarp kontaktuojančių paviršių atsiranda išlydyto metalo plėvelė, kuri tepdama paviršius drastiškai mažina trinties nuostolius. Nustatyta trinties koeficiento reikšmė $\mu < 0,1$. Eksperimentiškai nustatyta trinties nuostolių priklausomybė nuo galutinio kulkos greičio parodyta 3.12 paveiksle.



3.12 pav. Eksperimentiškai nustatyta trinties nuostolių priklausomybė nuo greičio.

Fig. 3.12. Experimentally obtained variation of friction losses against loading velocity

Trinties energijos didėjimas artėjant prie kritinio greičio (3.12 pav.) rodo, kad gautos pasiūlytų rodiklių priklausomybės kokybiškai atitinka skaitiniais eksperimentais gautas priklausomybes.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

1. BEM išanalizuotas EMŠ „EMA-3“ dinaminis būvis, kai vamzdžio bėgį veikia pastovaus dydžio pastoviu greičiu judanti šuoliškai pasiskirsčiusi apkrova. Skaičiavimai atlikti BEM ir pasinaudojus analizine išraiška. Gauti skersinių poslinkių ir nuo jų priklausančių rodiklių kitimo rezultatai parodė drastiškus šaudyklės bėgio dinaminės elgsenos skirtumus, kai apkrova juda ikikritiniu ir kritiniu greičiais. Šaudyklės bėgio skersinių svyravimų amplitudė prie 1300 m/s apkrovos judėjimo greičio išauga 24 %, lyginant su 600 m/s greičiu.

2. Pasiūlyti efektinės amplitudės ir trinties rodikliai pasižymi rezonansinėmis savybėmis. Rodiklių didžiausios reikšmės stebimos kritinio greičio srityje. Dinamiškumo koeficientas kritinio greičio aplinkoje išauga iki 2,4 karto, lyginant su ikikritiniais greičiais (iki 70 % v_{kr}). Lyginant su analogiškais ikikritiniais greičiais, efektinė amplitudė ir trinties rodiklis išauga iki 8,7 karto.

3. Nagrinėjant gautas rodiklių priklausomybes, nustatyti reikšmingi (iki 38,5 % pagal efektinės amplitudės reikšmę ir 14,6 % pagal v_{kr}) BEM ir analitiniu metodais gautų rezultatų skirtumai. Šis skirtumas atsiranda dėl pernelyg supaprastintų analitinio EMŠ modelio prielaidų.

4. BEM analizės rezultatai sugretinti su kitų autorių skelbtais natūrinių eksperimentų rezultatais. Rezultatų palyginimas rodo netiesioginį atitikimą.

5. Pasiūlyti originalūs ir universalūs algoritmai, kurie leidžia paruošti duomenis ir įgalina nagrinėti EMŠ mechaninį būvį, kai bėgį veikia sudėtingu pasiskirstymu pasižyminti apkrova. Tai žymiai trumpina skaičiuojamojo modelio paruošimo trukmę.

Šaudyklės dinaminės savybės veikiant realioms apkrovoms

EMŠ darbinių režimų, kai bėgius veikia realios apkrovos, skaitiniai tyrimai yra itin svarbūs, nes leidžia apibūdinti konstrukcijos elgseną veikiant tikram režimui, rasti silpniausias jos vietas ir palyginti ir įvertinti skirtingus apkrovos režimus.

Šio tyrimo tikslas palyginti ir įvertinti šaudyklės dinamiką apkraunant ją skirtingomis, eksperimentiškai išmatuotomis apkrovomis.

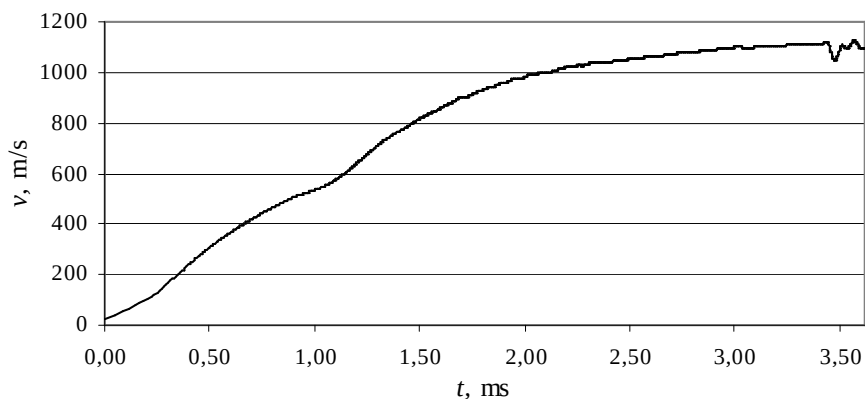
Skyriuje aptarti skaitinių eksperimentų rezultatai, kai bėgis veikiamas dviejų tipų realiomis apkrovomis. Bėgio dinamikai įvertinti panaudoti autoriaus pasiūlytieji efektinės amplitudės, trinties rodiklio ir dinamiškumo koeficiento ir vidutinių poslinkių po kulka rodikliai.

Skyriaus tematika paskelbtas autoriaus straipsnis (Tumonis ir kiti 2009b).

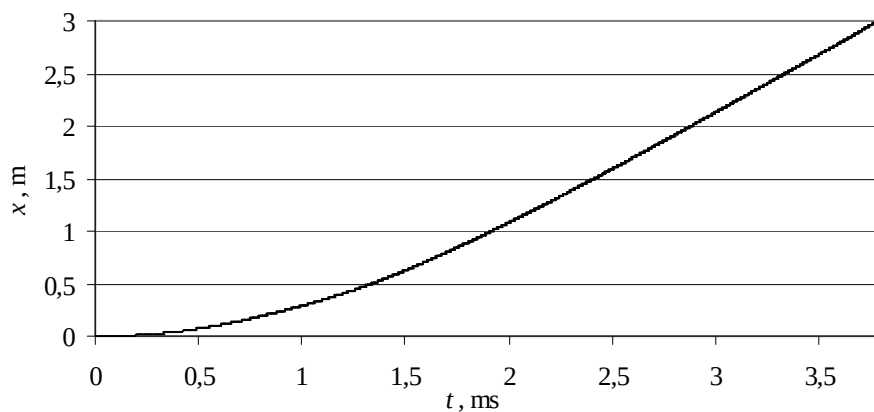
4.1. Elektromagnetinės šaudyklės „EMA-3“ darbiniai apkrovos režimai

EMŠ „EMA-3“ realizuojami du skirtingi darbiniai apkrovos režimai, besiskiriantys apkrovos pasiskirstymo bėgiuose pobūdžiu. Šiems apkrovos

režimams yra bendra kulkos greitėjimo priklausomybė ir galutinis kulkos greitis, siekiantis 1200 m/s. Abiems režimams bendra kulkos greičio kitimo laike priklausomybė parodyta (4.1 pav.). Kulkos padėties bėgyje kitimo laike priklausomybė parodyta (4.2 pav.).



4.1 pav. Kulkos greičio kitimas šūvio metu
Fig. 4.1. Velocity profile of a projectile accelerated during shot

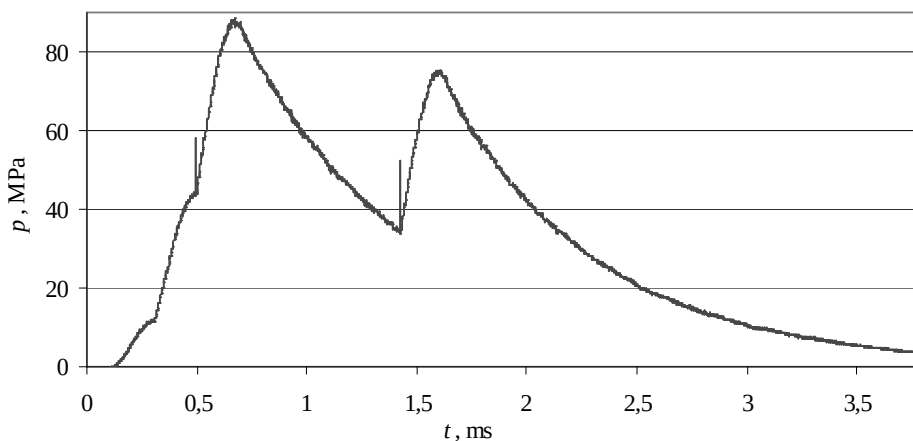


4.2 pav. Kulkos priekinės dalies (apkrovos fronto) padėties kitimas šūvio metu
Fig. 4.2. Position profile of a projectile front during shot

4.1.1. Maitinimo bėgio pradžioje režimas ir bėgį veikiančios apkrovos

Labiausiai paplitęs EMŠ apkrovos režimas, ypač plačiai naudotas ankstyvosiose šaudyklėse, yra maitinimo bėgio pradžioje režimas. Šaudyklei dirbant šiuo režimu, bėgiai maitinami elektros srove tik bėgio pradžioje. Veikiant šiam režimui, elektros srovė teka bėgiais nuo pat jų pradžios iki kulkos. Srovės kitimas laike yra nepastovus. Priklausomai nuo elektros šaltinio tipo, srovės kitimo laike grafikas turi vieną ar daugiau pikų. Šis režimas toliau bus vadinamas įprastuoju apkrovos režimu.

EMŠ „EMA-3“ energijos talpykla turi du modulius, kurių elektros energija į bėgius tiekama nepriklausomai. Dėl šios priežasties apkrovos į bėgius slėgio priklausomybė laike (4.3 pav.) turi du pikus. Šūvio pradžioje elektros srovė tiekama iš pirmojo talpyklos modulio. Pirmojo srovės pliūpsnio metu $t = 0,70$ ms, apkrova pasiekia 85,2 MPa ir ima mažėti. Laiko momentu $t = 1,43$ ms, kai kulka nuo bėgio pradžios nutolsta $x = 57$ cm atstumu, įjungiamas antrasis energijos talpyklos modulis. Antrasis srovės pliūpsnis vėl padidina apkrovą į bėgį ir kulką. Apkrova antrojo srovės pliūpsnio metu $t = 1,63$ ms pasiekia 73,3 MPa ir ima eksponentiškai mažėti.

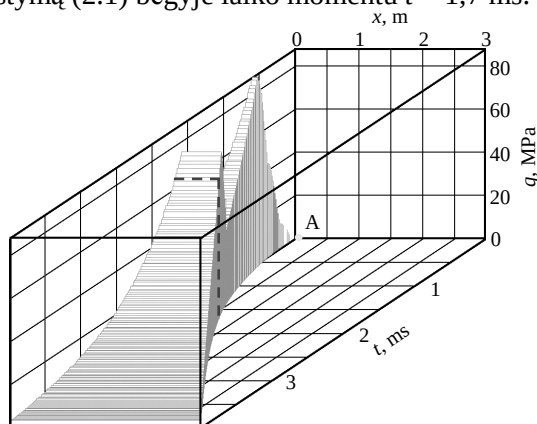


4.3 pav. Apkrovos slėgio kitimas laike esant maitinimo bėgio pradžioje darbo režimui

Fig. 4.3. Time variation of the pressure, acting on the rails for the Breech-feed regime

Dėl didėjančio atstumo tarp maitinimo taško ir kulkos, šūvio metu didėja el. varža, lemianti pagrindinius energijos nuostolius.

Šaudyklė šiuo režimu maitinama tik viename taške, todėl apkrovos pasiskirstymas bėgyje atitinka Heavisaido pasiskirstymą (4.3 pav.), aprašytą (2.1) išraiška. Grafikas, susiejantis apkrovos laikinę ir erdvinę priklausomybes pavaizduotas (4.4 pav.). Punktyrinė laiptelio pavidalo kreivė rodo išilginį apkrovos pasiskirstymą (2.1) bėgyje laiko momentu $t = 1,7$ ms.



4.4 pav. Apkrovos pasiskirstymo kitimas erdvėje ir laike įprastu, maitinimo bėgio pradžioje, režimu

Fig. 4.4. Two-dimensional illustration of the time history of load for Breech-feed regime

Apkrovos pasiskirstymo erdvėje grafikas rodo, kad bėgiai šūvio metu apkraunami nuo maitinimo pradžios iki pat kulkos. Prieš kulka bėgis nėra apkrautas. Šūvio pabaigoje apkrautas būna visas bėgis. Taškas „A“ rodo maitinimo taško padėtį bėgio pradžioje.

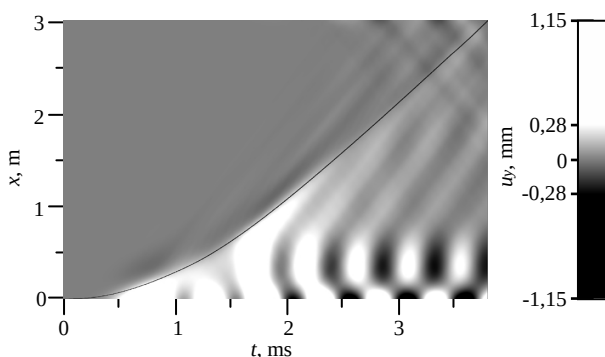
4.1.2. Skaitiniai EMŠ modeliavimo BEM įprastuoju apkrovos režimu rezultatai

EMŠ elgsenai nustatyti veikiant įprastuoju apkrovos režimu, atlikta skaitinė BEM analizė. Modeliavimui pasitelktas BEM analizės paketas ANSYS.

Skaičiavimams paruošti autoriaus sukurta originali programa „Apkrovos jėgos“, parašyta objektine C++ programavimo kalba. Ši programa apskaičiuoja visų bėgio paviršiaus mazgų apkrovas kiekvienu laiko momentu ir žymiai sutrumpina duomenų paruošimui skiriamą laiką. Programa galutinės mazgų apkrovas išsaugo makrokomandų rinkmenoje, ANSYS paketui suprantamu formatu. Rinkmenoje saugoma informacija apie BE mazgines jėgas kiekvienam apkrovimo laiko žingsniui. Skaičiavimams pasitelktas ANSYS 10.0 paketo

modulis STRUCTURAL, skirtas apkrautų konstrukcijų mechaninių rodiklių skaičiavimams atlikti.

Gauti skaičiavimų rezultatai parodė sudėtingą svyravimų pobūdį. Viso bėgio slystamojo paviršiaus skersinių poslinkių u_y kitimas laike pavaizduotas dvimačiame grafike (4.5 pav.). Grafike kiekvieno taško šviesumas rodo bėgio mazgo, kurio padėtis x laiko momentu t poslinkio u_y vertę. Teigiami poslinkiai pavaizduoti šviesesne pilka spalva, neigiami – tamsesne. Kad būtų labiau matomi maži poslinkiai, atsirandantys prieš apkrovos frontą, modifikuota spalvų skalė (padidintas kontrastas). Grafike tamsi kreivė rodo apkrovos fronto padėties kitimą laike. Ši kreivė analogiška aukščiau pavaizduotai (4.2 pav.) kreivei.



4.5 pav. Įprastu režimu apkrauto bėgio mazgų poslinkių dvimatis vaizdas
Fig. 4.5. Two-dimensional illustration of the time history of the displacements for the breech-feed load regime

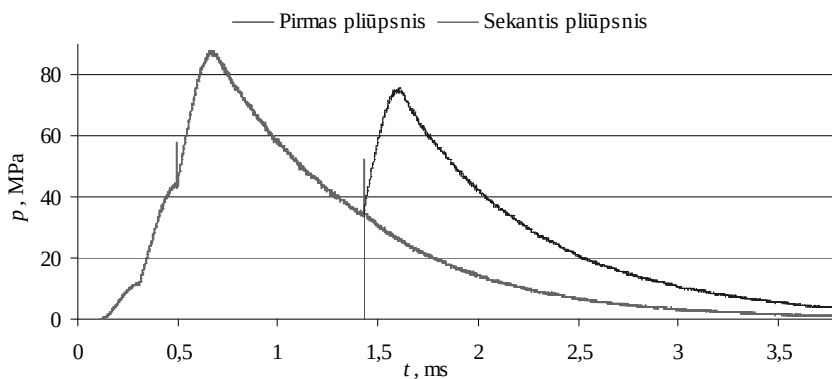
Aiškliai matyti (4.5 pav.), kad žadinimo bangos sklinda greičiau nei juda apkrova. Tai rodo bangos, sklindančios virš juodos kreivės. Didžiausia svyravimų amplitudė, siekianti 1,15 mm, stebima 0,5–2,0 ms laikotarpyje ir atkartoja apkrovos kitimą laike (4.3 pav.). Paveikslas rodo, kad viso šūvio metu stipriausiai svyruoja bėgio pradžia iki 0,75 m. Šioje srityje stebimi ir didžiausi mechaniniai įtempiai, todėl patartina skirti daugiau dėmesio EMŠ mechaniniam standžiui šioje konstrukcijos dalyje.

4.1.3. Paskirstyto energijos tiekimo režimas

Paskirstyto elektros energijos tiekimo režimas (PET) vis plačiau taikomas šiuolaikinėse EMŠ šaudyklėse. Šiam režimui veikiant, elektros srovė bėgiams tiekama ne mažiau kaip dviejose vietose. Ruožai, skiriantys tokius taškus vadinami pakopomis. „EMA-3“ šaudyklėje realizuotas dviejų pakopų PET

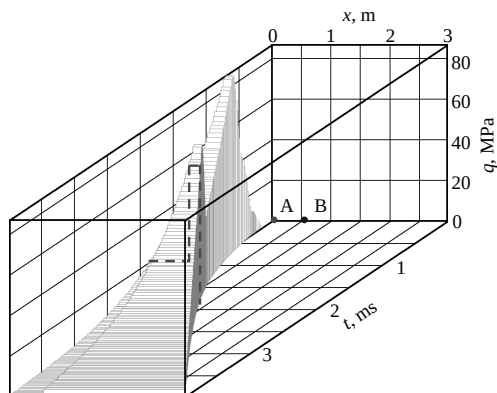
režimas. Apkrovos kitimas laike kiekvienoje pakopoje pavaizduotas (4.6 pav.), o erdvinio pasiskirstymo kitimas laike pavaizduotas (4.7 pav.).

Pirmojo maitinimo taško vieta (4.7 pav.) pažymėta raide „A“, sutampa su įprastojo režimo maitinimo taško vieta, t. y. bėgio pradžia. Antrasis maitinimo taškas yra nutolęs nuo pirmojo per 57 cm, jo padėtis žymima „B“. Bendruoju atveju šis atstumas gali kisti. Punktyrinė dvigubo laiptelio pavidalo kreivė rodo išilginį apkrovos pasiskirstymą (4.1) laiko momentu $t = 1,9$ ms. Pirmojo apkrovos pasiskirstymo kreivės trūkio vieta sutampa su taško „A“ padėtimi.



4.6 pav. Apkrovų, indukuojamų skirtinguose bėgio vietose, slėgio kitimas laike esant PET darbo režimu

Fig. 4.6. Time variation of the pressure, acting on the rails for the DES regime



4.7 pav. Apkrovos pasiskirstymo kitimas erdvėje ir laike PET režimu

Fig. 4.7. Two-dimensional illustration of the time history of load for DES regime

Antrojo trūkio vieta sutampa su taško „B“ padėtimi. Trečiojo trūkio vieta sutampa su apkrovos fronto padėtimi. Ši kreivė rodo žymiai mažesnę apkrovą pirmajame bėgio ruože, palyginus su antrajame ruože veikiančia apkrova.

Toks techninis sprendimas leidžia sumažinti didžiausią galimą nuotolį nuo maitinimo taško iki kulkos, sumažinant bėgių elektrinę varžą. Tai mažina elektrinius nuostolius bėgiuose. Elektros srovė į skirtingus maitinimo taškus tiekama iš dviejų nepriklausomų energijos talpyklos modulių.

Šūvio pradžioje įsijungia pirmoji PET pakopa. Elektros srovė į maitinimo tašką „A“ tiekama iš pirmojo talpyklos modulio. Kaip ir įprastame režime, pirmojo srovės pliūpsnio metu $t = 0,70$ ms apkrova pasiekia didžiausią 85,2 MPa vertę ir ima mažėti. Laiko momentu $t = 1,43$ ms, kai kulka pasiekia antrąjį maitinimo tašką „B“, nutolusį nuo bėgio pradžios $x_B = 57$ cm atstumu, įjungiamą antroji PET pakopa. Elektros srovė ima tekėti iš antrojo energijos talpyklos modulio. Skirtingai, nuo įprastojo režimo, maitinimas tiekiamas taške „B“. Kaip buvo minėta, tai leidžia mažinti atstumą nuo srovės padavimo taško iki kulkos, tuo pačiu mažinant elektros energijos nuostolius. Antrasis srovės pliūpsnis padidina apkrovą į bėgį ruože nuo taško „B“ iki kulkos. Apkrovos slėgis antrojo srovės pliūpsnio metu $t = 1,63$ ms pasiekia $p_B(1,36 \text{ ms}) = 73,3$ MPa ir pradeda mažėti. Skirtingai nuo įprastojo režimo, bėgio ruože tarp taškų „A“ ir „B“ (pirmojoje pakopoje), apkrova į bėgį jau būna sumažėjusi iki $p_B(1,36 \text{ ms}) = 25,3$ MPa, žymiai mažiau apkraudama bėgių pradžią.

El. srovės sukulto apkrovos slėgio į bėgius kitimas laike parodytas (4.6 pav.). Grafike skirtingomis spalvomis (kreivių storiais) parodytas slėgio kitimas atskirose pakopose (bėgio ruožuose). Pirmasis bėgio ruožas prasideda bėgio pradžioje ir baigiasi maitinimo taške „B“. Antrasis ruožas prasideda taške „B“ ir baigiasi bėgio gale. Kiekviename ruože srovės kitimo laike priklausomybė turi vieną piką. 4.7 paveiksle skirtingomis spalvomis pavaizduotas apkrovos kitimas ruožuose. Įsijungus antrajai PET pakopai, apkrovos išilginis pasiskirstymas taške „B“ patiria trūkį ir įgauna dvigubo laiptelio formą:

$$p_{PET}(x,t) = \begin{cases} p_A(t), & \text{jeigu } x \leq x_f(t) \text{ ir jeigu } x < x_B \\ p_B(t), & \text{jeigu } x \leq x_f(t) \text{ ir jeigu } x \geq x_B, \\ 0, & \text{kitu atveju} \end{cases} \quad (4.1)$$

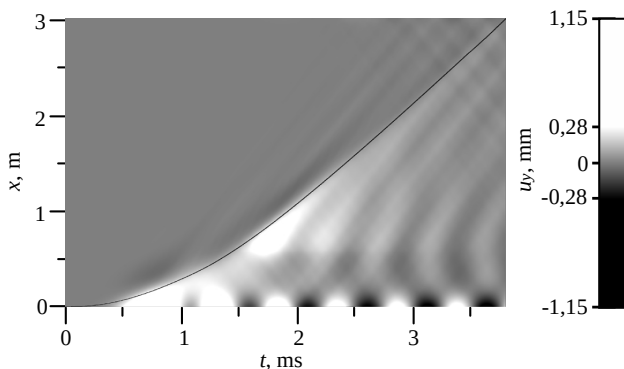
čia p_A ir p_B – apkrovų slėgiai pirmajame ir antrajame bėgio ruožuose, x_f – apkrovos fronto padėtis, x_B – antrojo maitinimo taško padėtis.

4.1.4. Skaitiniai EMŠ modeliavimo BEM PET apkrovos režimu rezultatai

Šaudyklės mechaninei elgsenai nustatyti, veikiant PET apkrovos režimu, atlikta skaitinė BE analizė. Modeliavimui pasitelktas BEM analizės paketas ANSYS.

Skaičiavimams paruošti pasitelkta autoriaus sukurta programa „Apkrovos jėgos“, aprašyta priede A. Skaičiavimams pasitelktas ANSYS 10.0 paketo modulis, skirtas struktūriniams skaičiavimams STRUCTURAL.

Rezultatai parodė sudėtingą bėgio paviršiaus svyravimų pobūdį. Svyravimai skiriasi nuo įprastojo apkrovos režimo svyravimų pobūdžio. Viso bėgio slystamojo paviršiaus skersinių poslinkių u_y kitimas laiko atžvilgiu pavaizduotas dvimačiame grafike (4.8 pav.). Grafike taško šviesumas rodo poslinkio dydį. Kad būtų labiau išryškinti maži poslinkiai prieš apkrovos frontą, modifikuota spalvų skalė (padidintas kontrastas). Tamsi kreivė rodo apkrovos fronto padėties kitimą laike. Ši kreivė analogiška (4.2 pav.) pavaizduotai kreivei ir sutampa su įprastojo režimo kreive, matoma (4.5 pav.).



4.8 pav. PET režimu apkrauto bėgio mazgų poslinkių dvimatis vaizdas

Fig. 4.8. Two-dimensional illustration of the time history of the displacements for the DES load regime

Grafike matomos sužadintos bangos sklinda greičiau nei juda apkrova. Tai rodo bangos, sklindančios virš juodos kreivės. Didžiausia u_y svyravimų amplitudė, siekianti 1,15 mm, stebima 0,5–2,0 ms laikotarpyje. Skirtingai nei įprastuoju režimu, PET režimu apkrovos paveikto bėgio pradžios svyravimai yra žymiai mažesni dėl skirtingo apkrovos pasiskirstymo. Po antrosios PET pakopos įjungimo, apkrova pirmajame bėgio ruože toliau mažėja, kai antrajame ruože – didėja. Įprastuoju režimu pirmajame ruože apkrova yra lygi antrajame ruože

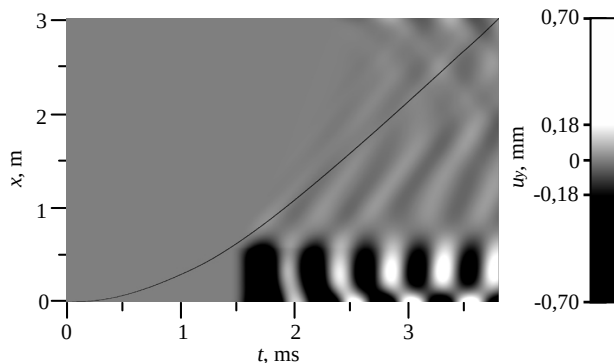
veikiančiai apkrovai. Šie, iš pažiūros nedideli apkrovų pasiskirstymo skirtumai drastiškai keičia bėgio dinamika. Nagrinėjant poslinkių kitimą, kaip apkrovų rezultatą, galima teigti, kad PET režimas yra pranašesnis už įprastąjį, mažina konstrukcijos apkrovas.

4.2. Skirtingų apkrovos režimų palyginimas

4.2.1. Poslinkių kitimo palyginimas

Elektromagnetinės šaudyklės „EMA-3“ bėgio svyravimai veikiant skirtingiems apkrovos režimams pavaizduoti (4.5 pav.) ir (4.8 pav.) Juose aiškiai matosi kokybiniai bėgio svyravimų skirtumai.

Abiejų režimų bėgio paviršiaus poslinkių u_y svyravimų skirtumai $\Delta u_y(x, t) = u_{y, IPR}(x, t) - u_{y, PET}(x, t)$ pavaizduoti (4.9 pav.).

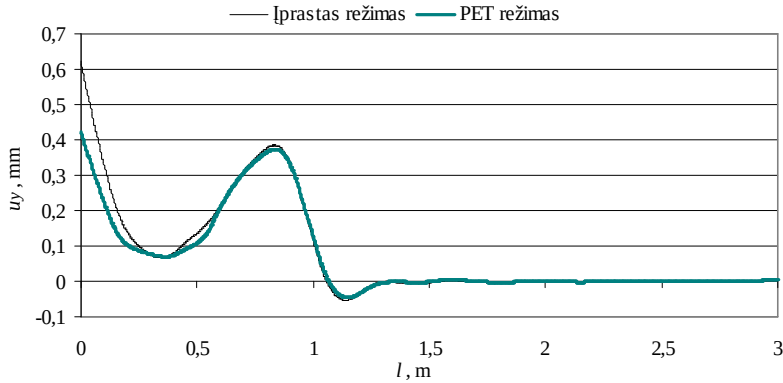


4.9 pav. Bėgio mazgų poslinkių svyravimų skirtumo, susidariusio dėl skirtingo apkrovos kitimo dvimatis vaizdas

Fig. 4.9. Two-dimensional illustration of time history differences between displacements in two loading regimes

Pilkos sritys (4.9 pav.) rodo vietas, kuriose poslinkių svyravimai sutampa. Aiškiai matoma sritis iki 1,5 ms, kur abiejuose režimuose bėgių svyravimai sutampa. Jie sutampa, nes abiejuose režimuose sutampa pirmo srovės pliūpsnio kitimas laike iki $t = 1,43$ ms ir todėl bėgis apkraunamas identišškai. Svyravimų skirtumas atsiranda dėl skirtingų antrojo srovės pliūpsnio maitinimo taškų vietos, kuri nulemia skirtingą bėgio apkrovimą minėtuose režimuose. Po $t = 1,43$ ms apkrovos pasiskirstymo bėgyje skirtumas tarp aptartųjų režimų atsiranda pirmajame bėgio ruože (0–57 cm), todėl šiame ruože stebimi ir didžiausi svyravimų skirtumai, matomi 4.9 pav.

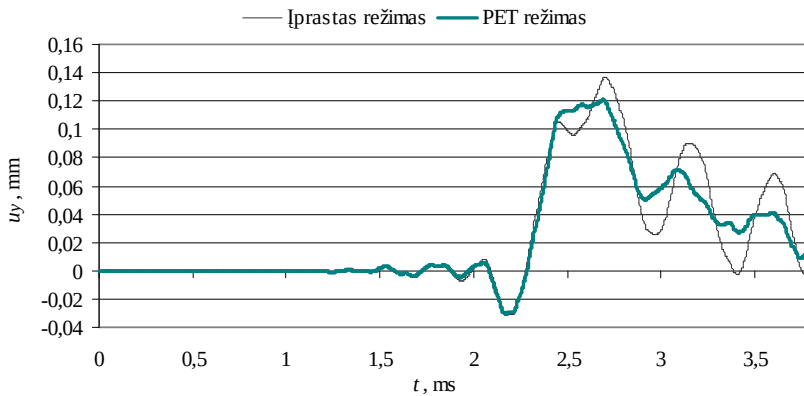
Grafike (4.9 pav.) matomas nežymus bangavimas virš pirmojo bėgio ruožo atsirado dėl trikdžių, susidariusių pirmajame bėgio ruože ir sklindančių kritiniu greičiu skirtumo.



4.10 pav. Bėgio paviršiaus mazgų poslinkių išilginis pasiskirstymas laiko momentu $t = 1,89$ ms, veikiant skirtingiems apkrovos režimams

Fig. 4.10. Longitudinal variation of transversal displacements at time $t = 1.89$ ms for the two loading regimes

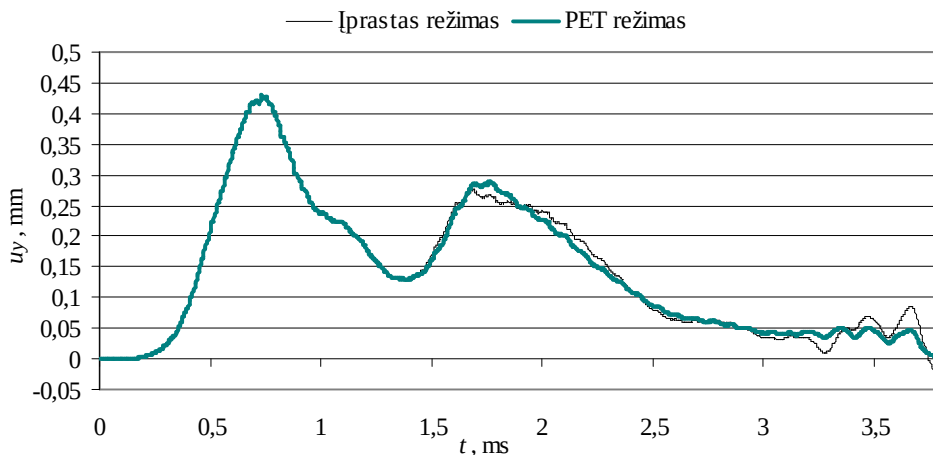
Svyravimų skirtumai, gauti tam tikruose (4.9 pav.) pjūviuose pavaizduoti 4.10 pav. ir 4.11 pav.



4.11 pav. Bėgio viduriniojo taško poslinkių laiko istorija veikiant skirtingiems apkrovos režimams

Fig. 4.11. Time histories of the rail surface displacements in mid-point $x = 1.5$ m for the two loading regimes

Bėgio skersinių poslinkių vaizdas įpusėjus šūvio laikui (4.10 pav.) rodo PET režimo pranašumą prieš įprastąjį režimą. Skersiniai poslinkiai bėgio pradžioje PET režimu yra apie 1,5 karto mažesni, nei įprastajame režime.



4.12 pav. Vidutinio poslinkio po kulka kitimas laike, veikiant skirtingiems apkrovos režimams

Fig. 4.12. Time histories of the average amplitude under projectile for the two loading regimes

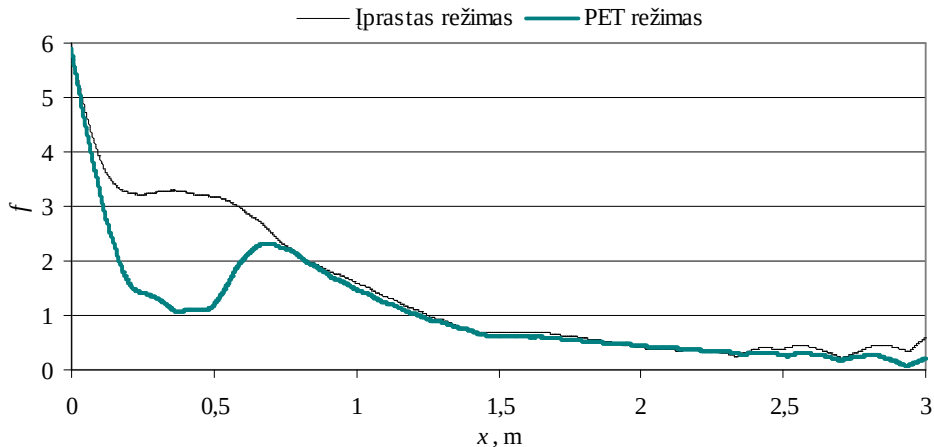
Bėgio viduriniojo mazgo skersinių poslinkių kitimas laike (4.11 pav.) taip pat atskleidžia režimų skirtumus, rodydamas PET režimo pranašumą prieš įprastąjį režimą. Skersiniai mazgo poslinkiai PET režimu kartais būna maždaug 1,5 karto mažesni, nei poslinkių reikšmės įprastuoju režimu. Įdomūs rezultatai stebimi 4.12 pav., kuriame pavaizduotas vidutinio skersinio poslinkio $\overline{u_y}$ (3.15) kitimas laike po kulka. Grafikas rodo, kad didžiausi poslinkio skirtumai, lyginant apkrovos režimus, stebimi šūvio pabaigoje. Po antros pakopos įjungimo (po $t = 1,43$ ms) poslinkio po kulka reikšmė PET režime yra 1,78 % mažesnė už poslinkio reikšmę įprastajame režime.

4.2.2. Dinamiškumo koeficiento palyginimas

Dinamiškumo koeficientas (3.18), įvertinantis dinaminių ir statinių skersinių poslinkių nuo dinaminių ir statinių apkrovų santykį bėgio paviršiaus viduriniajame ar kuriame kitame taške, taikytas palyginti apkrovos režimus.

Elektromagnetinės šaudyklės „EMA-3“ bėgio paviršiaus skersinių poslinkių dinamiškumo koeficientas pavaizduotas (4.13 pav.). Stebimas aiškus dinamiškumo koeficiento skirtumas bėgio pradžioje iki 0,75 m ir bėgio pabaigoje

nuo 2,4 m. Dinamiškumo koeficiento skirtumas bėgio pradžioje akivaizdžiai parodo PET režimo pranašumą prieš įprastąjį režimą.



4.13 pav. Dinamiškumo koeficiento bėgyje kitimas veikiant skirtingiems apkrovos režimams

Fig. 4.13. Longitudinal variation of dynamic coefficient for the two loading regimes

Dėl apkrovos sumažėjimo pirmajame bėgio ruože, mažėja svyravimai, tuo pačiu ir dinaminis koeficientas. Jis vietomis būna daugiau, nei 3 kartus mažesnis už įprastojo režimo dinaminį koeficientą. Vidutinė dinamiškumo koeficiento reikšmė PET režime yra 36,1 % mažesnė už įprastame režime gautą dinamiškumo koeficiento reikšmę.

Koeficiento skirtumas bėgio pabaigoje stebimas dėl interferavusių skirtingos amplitudės trikdžių. PET režime atsiradę trikdžiai yra mažesnės amplitudės, nei atsiradę įprastajame režime.

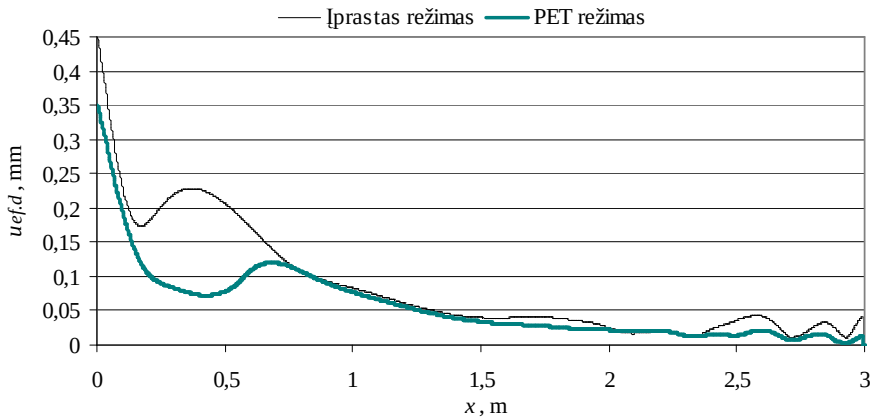
4.2.3. Efektinės amplitudės palyginimas

Efektinė amplitudė $u_{ef,d}$ (3.1), įvertinanti apkrauto mazgo svyravimų nuokrypį nuo statinės reikšmės, panaudota skirtingiems apkrovos režimams palyginti.

Elektromagnetinės šaudyklės „EMA-3“ bėgio paviršiaus mazgų efektinė amplitudė pavaizduota (4.14 pav.).

Efektinės amplitudės kitimo skirtumai panašūs į dinamiškumo koeficiento skirtumus (4.13 pav.). Skirtingų režimų grafikai labiausia skiriasi bėgio pradžioje ir pabaigoje. Efektinė amplitudė PET režime bėgio pradžioje (iki 0,75 m) būna

mažesnė daugiau, nei 3 kartus už įprastajame režime gautą efektingą amplitudę. PET režime gauta vidutinė efektingos amplitudės reikšmė yra 32,6 % mažesnė už įprastuoju režimu gautą vidutinę efektingos amplitudės reikšmę. Šis žymus skirtumas rodo mažesnes konstrukcijos apkrovas šūvio metu.



4.14 pav. Poslinkių efektingos amplitudės išilginis pasiskirstymas veikiant skirtingiems apkrovos režimams

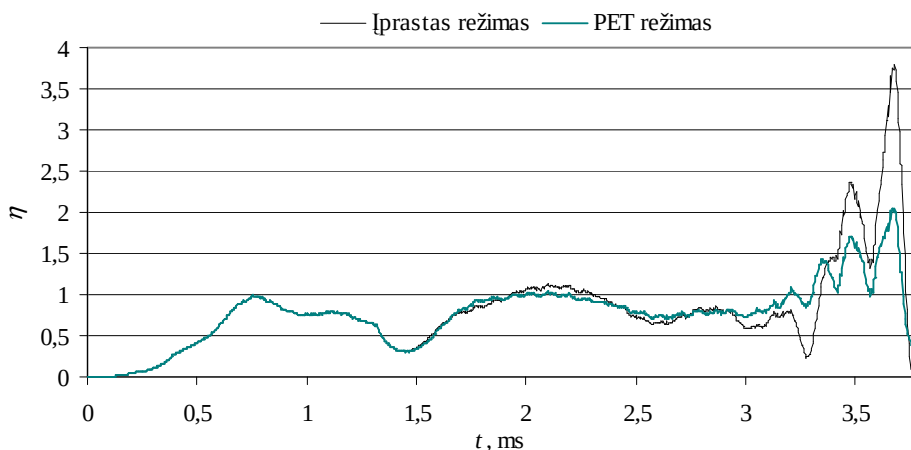
Fig. 4.14. Longitudinal variation of effective amplitude for the two loading regimes

4.2.4. Trinties rodiklio palyginimas

Geometrinės prigimties trinties rodiklis (3.13), priklauso tiek nuo bėgio formos po kulka, tiek nuo veikiančios jėgos. Šis rodiklis panaudotas palyginti apkrovos režimams.

Palyginimas leidžia apibendrinti bėgio būvį ir kulkos-bėgių kontakto aplinką. Rodiklio mažesnės reikšmės rodo mažesnę apkrovos įtaką kulkos-bėgio kontaktui. Trinties rodiklio kitimas pavaizduotas (4.13 pav.).

Grafike (4.15 pav.) stebimas trinties rodiklio kitimas laiko atžvilgiu turi visiškai skirtingą pobūdį, nei kitų aptartų rodiklių. Tai yra dėl to, kad šis rodiklis įskaito tiek bėgio deformacijas, tiek apkrovos jėgos dydį. Didžiausias trinties rodiklio skirtumas stebimas šūvio pabaigoje nuo $t > 3$ ms. Šis rodiklis parodo, kad kulkos-bėgio kontaktas labiausiai veikiamas trinties būtent šiame laikotarpyje. Po antros pakopos įjungimo (po $t = 1,43$ ms), PET režimu gauta vidutinė trinties koeficiento η reikšmė yra 6,9 % mažesnė už įprastajame režime gautą η reikšmę.



4.15 pav. Trinties rodiklio kitimas laike, veikiant skirtingiems apkrovos režimams

Fig. 4.15. Time variation of friction factor for the two loading regimes

Lyginant apkrovos režimus pagal trinties rodiklį, PET režimo pranašumas prieš įprastąjį režimą ypač žymus šūvio pabaigoje.

4.3. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Tiriant EMŠ el. energijos tiekimo režimus, nustatyta, kad jie sukelia skirtingo pobūdžio bėgio paviršiaus svyravimus. Veikiant paskirstyto energijos tiekimo (PET) režimui (2 maitinimo el. srove taškai), dinaminiai efektai yra mažesni, lyginant su įprastuoju (vienas maitinimo el. srove taškas) režimu: gautas dinamiškumo rodiklis mažesnis 36,1 %; efektinės amplitudės – 32,6 %; vidutinis skersinis poslinkis po kulka – 1,78 %, o trinties rodiklis mažesnis 6,9 %.

2. Nustatyta, kad paskirstyto energijos tiekimo režime, dėl apkrovų mažėjimo pirmajame šaudyklės ruože mažėja ir bėgių svyravimo amplitudė, o dinaminis koeficientas sumažėja net iki 3 kartų, lyginant su įprastuoju, maitinimo bėgio pradžioje režimu.

3. Apibendrinus tyrimus ir pasirinktais rodikliais įvertinus apkrovos režimus, parodytas PET režimo pranašumas. Šis režimas rekomenduojamas autoriaus kaip efektyvesnis mechanine prasme.

Bendrosios išvados

1. Įvertinus elektromagnetinės šaudyklės „EMA-3“ ypatumus, buvo sukurtas jos mechaninės konstrukcijos dvimatis baigtinių elementų modelis. Gautų rezultatų palyginimas su žinomais sprendiniais parodė, kad šis baigtinių elementų modelis yra tinkamas mechaninio būvio analizei.

2. Pasiūlytas šaudyklės BE modelis, lyginant su analogiškais lenkiamų strypų tipo modeliais, įvertina skerspjūvio susispaudimą. Pavyko nustatyti, kad šis efektas sudaro 15 % slystamojo paviršiaus skersinio poslinkio dydžio.

3. Ištirta diskrečiųjų atramų įtaka šaudyklės slystamojo paviršiaus deformavimui. Lyginant su tolydaus pagrindo atramos modeliu, gaunami 10 % didesni poslinkiai.

4. Pasitelkus šį modelį, buvo nustatytas šaudyklės kritinis greitis, kuris lygus 1440 m/s. Pagal šį rodiklį realios apkrovos priskiriamos ikikritinių režimų kategorijai.

5. Pasiūlyti efektinės amplitudės ir trinties rodikliai pasižymi rezonansinėmis savybėmis. Rodiklių didžiausios reikšmės stebimos kritinio greičio srityje. Dinamiškumo koeficientas kritinio greičio aplinkoje išauga iki 2,4 karto, lyginant su ikikritiniais greičiais (iki 70 % v_{kr}). Lyginant su analogiškais ikikritiniais greičiais, efektinė amplitudė ir trinties rodiklis išauga iki 8,7 karto.

6. Tiriant EMŠ el. energijos tiekimo režimus, nustatyta, kad jie sukelia skirtingo pobūdžio bėgio paviršiaus svyravimus. Veikiant paskirstyto energijos

tiekimo (PET) režimui (2 maitinimo el. srove taškai), dinaminiai efektai yra mažesni, lyginant su įprastuoju (vienas maitinimo el. srove taškas) režimu: gautas dinamiškumo rodiklis mažesnis 36,1 %; efektinės amplitudės – 32,6 %; vidutinis skersinis poslinkis po kulka – 1,78 %, o trinties rodiklis mažesnis 6,9 %.

7. Nustatyta, kad PET režime, dėl apkrovų mažėjimo pirmajame šaudyklės ruože mažėja ir bėgių svyravimo amplitudė, o dinaminis koeficientas sumažėja net iki 3 kartų, lyginant su įprastuoju maitinimo režimu.

8. Apibendrinus tyrimus ir pasirinktais rodikliais įvertinus apkrovos režimus, parodytas PET režimo pranašumas. Šis režimas autoriaus rekomenduojamas kaip efektyvesnis mechanine prasme.

Literatūros sąrašas

- Aigner, S.; Igenbergs, E. 1989. Friction and Ablation Measurements in a Round Bore Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 25(1): 33–39.
- Barauskas, R.; Kačianauskas, R.; Belevičius, R. 2004. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Vilnius: Technika.
- Chu, S. H. 1993. Barrel Lateral Force Modeling of a Curved EM Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 29(1): 1131–1136.
- Clarke, A. C. 1950. Electromagnetic Launching as a Major Contribution to Space Flight, *JBIS* 9(6).
- Cowan, M. 1993. A Momentum Limit for Electromagnetic Railguns, *IEEE Transactions on Magnetics* 29(1): 391–396.
- Daneshjoo, K.; Rahimzadeh, M.; Ahmadi R.; Ghassemi, M. 2007. Dynamic Response and Armature Critical Velocity Studies in an Electromagnetic Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 43(1): 126–131
- Davidson, R.; Cook, W.; Rabern, D.; Schnurr, N. 1986. Predicting Bore Deformations and Launcher Stresses in Railguns, *IEEE Transactions on Magnetics* 22(6): 1435–1440.
- Fryba, L. 1976. *Vibration of Solids and Structures under Moving Loads*. Gronningen, The Netherlands, Noordhoff.
- Gagnon, W. L. *Compensated Pulsed Alternator*. Lawrence Livermore Lab.
- Gallant, J.; Lehmann, P. 2005. Experiments with Brush Projectiles in a Parallel Augmented Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 188–193.

- Haugh, D. 1995. "Field" Guns Electromagnetic Launchers, *IEEE Review* 41(4): 155–158.
- James, C.; Shaaf Jr. 1989. Electromagnetic Coaxial Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 25(5): 3263–3265.
- James, T. E. 2003. Why Solid Armatures Fail and How They can be Improved, *IEEE Transactions on Magnetics* 39(1): 56–61.
- Johnson, A.; Moon, F. C. 2007. Elastic Waves in Electromagnetic Launchers, *IEEE Transactions on Magnetics* 43(1): 141–144.
- Kačianauskas, R. 1994. Architecture of Finite Element Method Programs for Personal Computer, *Lithuanian Journal of Computational Mechanics* 33: 130–143.
- Kačianauskas, R. 1995. *Computer Methods in Multilevel Modelling of Beams and Shells*, Vilnius, Technika. 395 p.
- Kareev, Yu. A.; Bazilevski, V. P.; Gendel, Yu. G.; Glushkov, I.S.; Kuharenko, A.T. 2001. A Coaxial Railgun as a Prototype of a New Generation Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 37(1): 421–424.
- Khandryga, D. V.; Plekhanov, A. V.; Tereschenko, A. N. 1995. Numerical Simulation and Experimental Results of the Metal Armature Acceleration, *IEEE Transactions on Magnetics* 31(1): 193–197.
- Kienner, P.; Kitzinger, K. 1993. ISL 500 kJ 15 mm Railgun Numerical Simulation, *IEEE Transactions on Magnetics* 29(1): 1180–1185.
- Kively, L. M.; Condit, W. C. 1991. Electromechanical Railgun Model, *IEEE Transactions on Magnetics* 27(4): 3731–3734.
- Knoth, E. A.; Bauer, D. P. 1995. Armature Contact Load Dynamics, *IEEE*: 198–202.
- Kolm, H.; Fine, K. Williams, F.; Mongeau, P. 1979. Electromagnetic Guns, Launchers and Reaction Engines, *Digest of Technical Papers*, Piscataway, N.J., Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.: 42–48.
- Lehmann, P.; Peter, H.; Jamet, F.; Wegner, V. 1995. Some Remarks Concerning the Optimization of a Railgun System, *IEEE Transactions on Magnetics* 31(1): 546–551.
- Lehmann, P.; Peter, H.; Wey, J. 1993. Experimental Study of Solid Armatures for EML Applications, *IEEE Transactions on Magnetics* 29(1): 848–852.
- Lehmann, P.; Peter, H.; Wey, J. 2001. First Experimental Results with the ISL 10 MJ DES Railgun PEGASUS, *IEEE Transactions on Magnetics* 37(1): 435–439.
- Lehmann, P.; Vo, M. D.; Wenning, W. 2005. Comparative Study of Railgun Housings Made of Modern Fiber Wound Materials, Ceramic, or Insulated Steel Plates, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 200–205.
- Lewis, K. B.; Nechitailo, N. V. 2007. Transient Resonance in Hypervelocity Launchers at Critical Speeds, *IEEE Transactions on Magnetics* 43(1): 157–162.
- Litterell, D. M.; Jamison K. A. 1993. An Experimental Investigation of Plasma Armature Railgun Performance in the 3.2 to 4.2 km/s Regime, *IEEE Transactions on Magnetics* 29(1): 853.
- Long, G. C.; Weldon, W. F. 1989. Limits to the Velocity of Solid Armatures in Railguns, *IEEE Transactions on Magnetics* 25(1): 347–352.

- Marshall, R. 1999. Railgun Bore Geometry, Round Or Square? *IEEE Transactions on Magnetics* 35(4): 427–431.
- Marshall, R. 2001. Railgunnery: Where Have We Been? Where Are We Going? *IEEE Transactions on Magnetics* 37(1): 440–444.
- McNab, I. R.; Stefani, F.; Crawford, M.; Erengil, M.; Persad, C.; Satapathy, S.; Vanicek, H.; Watt, T.; Dampier, C. 2005. Development of a Naval Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 206–210.
- Meger, R. A.; Cooper, K.; Jones, H.; Neri J.; Quadri, S.; SINGER, I. L.; Sprague, J. 2005. Analysis of Rail Surfaces From a Multishot Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 211–213.
- Musolino, A.; Raugi, M.; Rizzo, R.; Tellini, A. 2001. The Multi-Stage Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 37(1): 445–449.
- Noel, A.; Bauer, D. P. 2001. Laminated Barrel Axial Stiffness Assessment, *IEEE Transactions on Magnetics* 37(1): 454–456.
- Persad, Ch.; Castro Z. 2007. Railgun Tribology: Characterization and Control of Multishot Wear Derbis, *IEEE Transactions on Magnetics* 43(1): 173–177.
- Peter, H.; Jamet, F.; Wegner, V. 1995. Technical Aspects of Railguns, *IEEE Transactions on Magnetics* 31(1): 348–353.
- Peterson, D. R.; Fowler, C.; Cummings, C.; Kerrisk, J.; Parker, J.; Marsh, S.; Adams, D. 1984. Design and Testing of High-Pressure Railguns and Projectiles, *IEEE Transactions on Magnetics* 20(2): 252–255.
- Pyatt, K. D; McNab, I. R. 1993. Limiting Physics Effects in Hypervelocity Railguns, *IEEE Transactions on Magnetics* 29(1): 484–489.
- Railguns From the Late 1800s to 1980*, www.angelfire.com/fl2/quantum/history.html.
- Rapka, J. R.; Hildendrand, D. J.; Weldon J. M. 1995. The Determination of Launch Induced Static And Dynamic Rail Deflection Of A Benet 50mm Railgun Barrel. *IEEE Transactions on Magnetics* 31(1): 231–236.
- Reck, B. 2005. Mechanical Behavior of the PEGASUS Railgun Projectile During the Launch, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 420–425.
- Ross, D. P.; Ferrentino, G. L.; Young, J. F. 1982. Experimental Determination of Contact Friction for an Electromagnetically Accelerated Armature, *Wear* 78: 189–200.
- Sadedin, D. R. 1984. Efficiency Equations of the Railgun, *IEEE Transactions on Magnetics* 30(2): 268–271.
- Satapathy, S; Persad, Ch. 2001. Thermal Stress in EML Rail-Conductor Overlays, *IEEE Transactions on Magnetics* 37(1): 269–274.
- Schneider, M.; Eckenfels, D.; Hatterer F. 2003. Transition in Brush Armatures, *IEEE Transactions on Magnetics* 39(1): 76–81.
- Schneider, M.; Eckenfels, D.; Nezirevic, S. 2003. Doppler-Radar: A Possibility to Monitor Projectile Dynamics in Railguns, *IEEE Transactions on Magnetics* 39(1): 183–187.
- Schneider, M.; Schneider, R. 2005. Sliding Contact Performance of Multiple Brush Armatures, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 432–436.

- Schneider, M.; Schneider, R. 2007. Advanced Rail-Sabot Configurations for Brush Armatures, *IEEE Transactions on Magnetics* 43(1): 186–189.
- Schneider, M.; Schneider, R.; Eckenfels, D. 2005. Experiments With Brush Armatures: New Technical Solutions, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 231–234.
- Shvetsov, G. A.; Ermolenko, V. M.; Kurguzov, V. D.; Ivanov, G. V.; Anisimov, S. A. 1995. Structural Response of a Railgun Accelerator, *IEEE Transactions on Magnetics* 31(1): 657–660.
- Shvetsov, G. A.; Stankevich S. V. 1997. Ultimate Kinematic Characteristics of Armatures with Orthotropic and Anisotropic Electroconductivity, *IEEE Transactions on Magnetics* 33(1): 266–271.
- Shvetsov, G.; Stankevich, S. 2001. Search for New Possibilities of Attain High Launching Velocities, *IEEE Transactions on Magnetics* 37(1): 275–279.
- Tidman, D. A.; Witherspoon, F. D.; Parker, J. V. 1993. A Gas-Insulated Railgun, *IEEE Transactions on Plasma Science* 21(6): 784–785.
- Tompkins, M. W.; Anderson, M. A.; Kim, K.; Feng, Q.; Zhang, J.; King, T. L. 1995. Development of Advanced Compact Railguns for Injection of Hypervelocity Hydrogen Pellets into Magnetic Fusion Plasmas, *IEEE*: 1582–1585.
- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H., Topp, L. J. 1956. Stiffness and Deflection analysis of Complex Structures, *J. Aero Sci.* 13: 805–823.
- Tzeng, J. 2003. Dynamic Response of Electromagnetic Railgun Due to Projectile Movement, *IEEE Transactions on Magnetics* 39(1): 472–475.
- Tzeng, J. T. 2005. Structural Mechanisms for Electromagnetic Railguns, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 246–250.
- Upshaw, J. L.; Kajs, J. P. 1995. Micrometeoroid Impact Simulations Using a Railgun Electromagnetic Accelerator, *IEEE Transactions on Magnetics* 27(1): 607–60x.
- Weldon, W. F.; Driga, M. D.; Woodson, H. H.; Rylander, H. G. 1974. The Design, Fabrication and Testing of a 5 MJ Homopolar Motor-Generator, *Proc. Internatl. Conf. on Energy Storage, Compression and Switching*, Torino, Italy.
- Werst, M. D.; Kitzmiller, J. R.; Hearn, C. S.; Wedeking, G. A. 2005. Ultra-Stiff, Low Mass, Electromagnetic Gun Design, *IEEE Transactions on Magnetics* 41(1): 262–265.
- Wey, J.; Lehmann, P.; Peter, H. 1995. DES 3 MJ-Railgun Experimental Results at ISL, *IEEE Transactions on Magnetics* 31(1): 371–376.
- Yun, H. D. 1999. EM Gun Scaling Relationships, *IEEE Transactions on Magnetics* 35(1): 484–488.
- Zienkiewicz, O. C. 1967. *The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. 1st Edition*. London: McGraw Hill.
- Zowarka, R. C.; Kajs, J. P. 1993. Electromagnetic Force, Jerk, and Electric Gun Projectiles, *IEEE Transactions on Magnetics* 29(1): 892–900.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Tumonis, L.; Kačianauskas, A.; Kačeniauskas, A. 2007a. Evaluation of Friction due to Deformed Behaviour of Rail in the Electromagnetic Railgun: numerical investigation, *Mechanika* 63(1): 58–63. ISSN 1392-1207.

Tumonis, L.; Kačianauskas, A.; Kačeniauskas, A.; Schneider, M. 2007b. The Transient Behavior of Rails Used in Electromagnetic Railguns: Numerical Investigations at Constant Loading Velocities, *Journal of Vibroengineering* 9(3): 15–18. ISSN 1392-8716.

Tumonis, L.; Schneider, M.; Kačianauskas, A.; Kačeniauskas, A. 2009a. Structural Mechanics of Railguns in the Case of Discrete Supports, *IEEE Transactions on Magnetism* 45(1): 474–479. ISSN 0018-9464.

Tumonis, L.; Schneider, M.; Kačianauskas, R.; Kačeniauskas, A. 2009b. Comparison of Dynamic Behaviour of EMA-3 Railgun Under Differently Induced Loadings, *Mechanika* 78(4): 31–36. ISSN 1392-1207.

Straipsniai kituose leidiniuose

Tumonis, L.; Schneider, M.; Kačianauskas, R.; Kačeniauskas, A. 2008. Structural Mechanics of Railguns in the Case of Discrete Supports. In *Proceedings of the 14th Symposium on Electromagnetic Launch Technology Victoria, BC, Canada, 10–13 June, 2008*. New York: IEEE, 1–6.

Priedai

A priedas. Apkrovų skaičiavimo programa „Apkrovos“

Ši programa parašyta programiniu paketu Borland Turbo C++ 2007. Programa kurianti preprocesoriaus komandas BEM analizės programai ANSYS. Programa ir jos kodo tekstas pateikti kompaktiniame diske.

B priedas. Dvimačių poslinkių grafikų vaizdavimo programa

Ši programa parašyta programiniu paketu Borland Turbo C++ 2007. Programa, naudodama poslinkių istorijas, braižo jų dvimačius grafikus. Programa ir jos kodo tekstas pateikti kompaktiniame diske.

Liudas TUMONIS

ELEKTROMAGNETINĖS ŠAUDYKLĖS MECHANINĖS ELGSENOS MODELIAVIMAS
BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
mechanikos inžinerija (09T)

SIMULATION OF MECHANICAL BEHAVIOUR OF THE ELECTROMAGNETIC
RAILGUN BY FINITE ELEMENT METHOD

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Mechanical Engineering (09T)

2009 11 26. 8,25 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „Baltijos kopija“,
Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius
<http://www.kopija.lt>