

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Ieva MISIŪNAITĖ

**PLIENINIŲ PASPYRINIŲ TILTŲ
GNIUŽDOMŲ LENKIAMŲ ELEMENTŲ
ĮTEMPIŲ DEFORMACIJŲ BŪSENA IR
STABILUMAS**

DAKTARO DISERTACIJOS SANTRAUKA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (02T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2013

Disertacija rengta 2009–2013 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.
Mokslinis vadovas

doc. dr. Algirdas JUOZAPAITIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija ginama Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties taryboje:

Pirmininkas

prof. dr. Romualdas KLIUKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Nariai:

prof. habil. dr. Rimantas BELEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T),

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, technologijos mokslai, informatikos inžinerija – 07T),

prof. habil. dr. Hartmut PASTERNAK (Brandenburgo technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

prof. habil. dr. Edmundas Kazimieras ZAVADSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Oponentai:

doc. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T),

dr. Raimondas BLIŪDŽIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties tarybos posėdyje 2014 m. sausio 24 d. 13 val. Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4952, (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112;

el. paštas doktor@vgtu.lt

Disertacijos santrauka išsiuntinėta 2013 m. gruodžio 23 d.

Disertaciją galima peržiūrėti Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos „Technika“ 2218-M mokslo literatūros knyga.

© Ieva Misiūnaitė, 2013

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Ieva MISIŪNAITĖ

**STRUCTURAL BEHAVIOUR AND
STABILITY OF STEEL BEAM-COLUMN
ELEMENTS IN UNDER-DECK CABLE-
STAYED BRIDGE**

SUMMARY OF DOCTORAL DISSERTATION

**TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (02T)**



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2013

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2009–2013.

Scientific Supervisor

Assoc Prof Dr Algirdas JUOZAPAITIS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation is being defended at the Council of Scientific Field of Civil Engineering at Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof Dr Romualdas KLIUKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Members:

Prof Dr Habil Rimantas BELEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Mechanical Engineering – 09T),

Prof Dr Habil Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Technological Sciences, Informatics Engineering – 07T),

Prof Dr Habil Hartmut PASTERNAK (Brandenburg Technical University, Technological Science, Civil Engineering – 02T),

Prof Dr Habil Edmundas Kazimieras ZAVADSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

Opponents:

Assoc Prof Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T),

Dr Raimondas BLIŪDŽIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Civil Engineering – 02T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Council of Scientific Field of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at 1 p. m. on 24 January 2014.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4952, +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112;

e-mail: doktor@vgtu.lt

The summary of the doctoral dissertation was distributed on 23 December 2013.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

© Ieva Misiūnaitė, 2013

Įvadas

Problemos formulavimas ir darbo aktualumas. Dažniausiai išskylanti tiltų projektavimo problema yra siekis didinti jų tarpatramį, o tuo pačiu laikomąją galią, panaudojant efektyvius (veiksmingus) konstrukcinius sprendinius. Įprasti sprendimo būdai – didinti tokių elementų skerspjūvį ar įrengti standartines tarpines tilto atramas, nėra patrauklūs šių dienų projektuotojams. Šiuo atveju yra galimas veiksmingas sprendimo kelias – tarpinių atramų įrengimas. Ši koncepcija davė pradžią paspyrinių tiltų atsiradimui. Paspyrinio tilto palaikančioji sistema projektuojama standumo sijos apačioje ir inkaruojama tiesiogiai į ją. Paslepiant palaikančiuosius elementus po standumo sija ne tik išvengiama nepageidaujamo poveikio aplinkai, bet ir atsižvelgiama į estetinius reikalavimus. Nepaisant efektyvios ir estetiškai patrauklios konstrukcinės formos paspyriniai tiltai turi ir tam tikrų trūkumų. Inkaruojant paspyras į standumo siją sukeliama joje kartu su lenkiamuoju poveikiu ir gniuždomasis. Šiuo atveju tampa aktualus ir stabilumo vertinimas. Sprendžiant tokių konstrukcijų stabilumo uždavinį būtina atsižvelgti į jų deformuotos įtaką. O taikomi skaičiavimo modelis ir pagrindinės prielaidos turi reikiamu tikslumu atitikti nagrinėjamos konstrukcijos netiesinę elgseną. Skaičiavimo modelis tiksliausiai išreiškiantis paspyrinių tiltų standumo sijos elgseną yra gniuždomas lenkiamas elementas su tarpinėmis tampriai paslankiomis atramomis. Galima rasti pavyzdžių kaip spręsti panašius stabilumo uždavinius, tačiau naudojami skaičiavimo modeliai skirti atskiriems atvejams – kai elementą veikia tik pavienė gniuždymo jėga arba tarpinių atramos standumas artėja į begalybę. Apibendrintojo skaičiavimo modelis gniuždomam lenkiamam elementui su tarpine tampriai paslankia atrama ir jį atitinkantis skaičiavimo metodas iki šiol nėra pakankamai parengti.

Paspyriniai tiltai dėl netradicinio laikančiųjų elementų išdėstymo priskiriami prie inovatyviųjų konstrukcijų. Inovatyvių konstrukcijų elgsenai analizuoti tradicinių metodų taikymas gali sąlygoti nepageidaujamas paklaidas. Taikomi elgsenos analizės ir stabilumo skaičiavimo metodai turi atitikti pasirinktąjį skaičiavimo modelį, atsižvelgti į tokios konstrukcijos deformuotąją būseną bei įvertinti galimas nuokrypas. Šių dienų plieno konstrukcijų projektavimo normos pateikia reikalavimus ir nuorodas tiesioginei analizei taikyti. Šio metodo tikslumas neabejotinas, tačiau iki šiol jis nėra populiarus inžinierių tarpe dėl praktinio taikymo neapibrėžtumo ir pavyzdžių stokos. Plieno konstrukcijų projektavime tiesioginis metodas iki šiol yra, deja, tik alternatyva ir mokslinė problema, o ne tinkamas „įrankis“ praktikams.

Tyrimų objektas. Šių tyrimų objektas yra naujo plieninio paspyrinio tilto gniuždomųjų lenkiamųjų elementų įtempių deformacijų būseną ir stabilumą, nagrinėjami pagal plokščiąjį tamprųjį modelį, įvertinant geometrines ir fizines nuokrypas.

Darbo tikslas. Atlikti naujo plieninio paspyrinio tilto gniuždomųjų lenkiamųjų elementų įtempių deformacijų būsenos ir stabilumo analizę.

Darbo uždaviniai. Siekiant įgyvendinti užsibrėžtą tikslą, suformuojami šie uždaviniai:

1. Apžvelgti paspyrinių tiltų raidą, galimas formas bei tokių tiltų gniuždomųjų lenkiamųjų plieno elementų netiesinės elgsenos analizės bei stabilumo vertinimo metodus.
2. Parengti naują plieninio paspyrinio tilto konstrukcinę formą ir sugretinti siūlomos konstrukcijos elgseną su esamomis, atsižvelgiant į simetrinę bei asimetrinę apkrovimo variantus.
3. Sukurti metodiką gniuždomo lenkiamo elemento su tarpinėmis tampriai paslankiomis atramomis elgsenos analizei atlikti, įvertinant geometrinių nuokrypų bei liekamųjų įtempių įtaką.
4. Nustatyti pagrindinius parametrus ir išvesti pagrindines išraiškas paspyrinio tilto standumo sijos kaip gniuždomo lenkiamo elemento elgsenos analizei atlikti.
5. Aprašyti iteracinį procesą paspyrinio tilto standumo sijos ašinei gniuždomajai jėgai nustatyti.
6. Taikant pasiūlytą skaičiavimo metodiką ir naudojant pasirinktąjį gniuždomo lenkiamo elemento skaičiavimo modelį atlikti paspyrinio tilto konstrukcijų įtempių deformacijų ir stabilumo analizę.
7. Atlikti paspyrinio tilto modelio eksperimentinį tyrimą ir pasiūlytos skaičiavimo metodikos tikslumo analizę.
8. Pasiūlyti paspyrinio tilto standumo sijos įrašų reguliavimo metodą ir nustatyti jo efektyvumo ribas.

Tyrimų metodika apima:

- Išsamią literatūros analizę, leidžiančią apibrėžti bei suprasti tyrimų objektą, suformuluoti tyrimų tikslą ir iškelti uždavinius jam pasiekti, apibendrinant literatūroje pateiktų duomenų trūkumus.
- Paspyrinio tilto naujos formos paieškas, atsižvelgiant į elgsenos efektyvumo kriterijus.

- Visuminei analizei skirtą konstrukcijų modeliavimą ir paspyrinio tilto gniuždomųjų lenkiamųjų elementų apibendrintųjų skaičiavimo modelių formulavimą.
- Deformuotos kūno geometrijos veiksnių įtakos vertinimą.
- Supaprastintos apibendrintųjų nuokrypų koncepcijos taikymą lygiaverčių geometrinių nuokrypų amplitudėms nustatyti.
- Kreivalinijinių elementų modeliavimą ir netiesinius sprendinius baigtinių elementų metodo programiniu paketu ANSYS gautų analizinių rezultatų tikslumui įvertinti.
- Lygiaverčių momentų ekstremumų taikymą racionaliojo ekscentriciteto paieškoms, atliekant pasyvųjį įrąžų reguliavimą.
- Paspyrinio tilto modelio eksperimentinius tyrimus.
- Lyginamąją analizę vertinant gautų rezultatų adekvatumą ir tikslumą.

Mokslinis naujumas

1. Parengta nauja plieninio paspyrinio tilto forma ir atlikta jo konstrukcijų elgsenos ir stabilumo analizė. Išanalizuoti du galimi tokio tilto standumo sijos konstravimo ir skaičiavimo modeliai. Išanalizuota naujo paspyrinio tilto standumo sijos kaip gniuždomo lenkiamo elemento elgsena, atsižvelgiant į skirtingas atrėmimo sąlygas.
2. Pasiūlyta skaičiavimo metodika paspyrinio tilto elgsenos ir stabilumo analizei atlikti, taikant apibendrintą gniuždomojo lenkiamojo elemento skaičiuojamąjį modelį. Ši metodika leidžia įvertinti konstrukcijos netiesinę elgseną, jos elementų geometrines nuokrypas bei liekamuosius įtempimus. Pasiūlytos skaičiavimo metodikos tikslumas aprobuotas pripažinto baigtinių elementų metodo programų paketo ANSYS netiesiniais sprendiniais bei eksperimentinio tyrimo rezultatais.
3. Pasiūlytas efektyvus būdas paspyrinio tilto su karpytąją standumo sija įrąžoms reguliuoti.

Praktinė vertė. Gauti tyrimų rezultatai praplečia gniuždomo lenkiamo elemento skaičiuojamojo modelio taikymą konstrukcijoms, paremtoms paslankiomis atramomis. Panaudota supaprastinta apibendrintųjų nuokrypų koncepcija lygiaverčių geometrinių nuokrypų amplitudėms nustatyti leidžia tiesiogiai įvertinti konstrukcinių elementų geometrines nuokrypas ir liekamuosius įtempimus, sprendžiant gniuždomų lenkiamų elementų netiesinį stabilumo uždavinį. Darbe pasiūlytas metodas praktiniam plieno konstrukcijų elgsenos ir stabilumo vertinimui, panaudojant pasiūlytą skaičiavimo metodiką

bei baigtinių elementų kompiuterinę programą. Pasiūlyta metodika paspyrinių konstrukcijų įrašoms reguliuoti, jų elgsenos efektyvumui padidinti.

Ginamieji teiginiai

1. Pasiūlyta nauja paspyrinio tilto forma išlaiko trikampę apybrėžą ir išvengia nepageidaujamos deformuotosios formos veikiant asimetrinei apkrovai.
2. Pasiūlyta visuminės paspyrinių konstrukcijų stabilumo analizės pagal tamprųjį modelį metodika leidžia išvengti klumpamojo ilgio nustatymo ir tampriojo kritinio klupumo analizės sąlygojamų paklaidų.
3. Parengta gniuždomųjų lenkiamųjų elementų su tarpine paslankia atrama netiesinės elgsenos uždaviniams spręsti metodika įvertina geometrines nuokrypas ir liekamuosius įtempius.
4. Suformuotas gniuždomojo lenkiamojo elemento su tarpine paslankia atrama skaičiavimo modelis apibendrina gniuždomojo elemento su tarpine paslankia atrama ir gniuždomojo lenkiamojo elemento su tarpine nepaslankia atrama skaičiavimo modelius ir leidžia spręsti netiesinius stabilumo uždavinius.

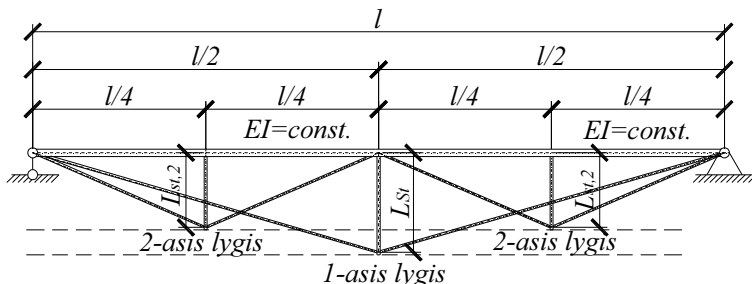
Darbo apimtis. Darbą sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas, autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas ir 3 priedai. Bendra disertacijos apimtis (be priedų) – 164 puslapiai, 63 iliustracijos ir 18 lentelių.

1. Paspyrinių tiltų elgsenos bei projektavimo nuostatų apžvalga

Pirmajame disertacijos skyriuje apžvelgta literatūra susijusi su disertacijos tematika. Dalį šio skyriaus sudaro paspyrinių tiltų raidos, konstrukcinių formų, atliktų tyrimų, susijusių su nagrinėjama konstrukcine forma, bei projektavimo metodų apžvalga. Didesnioji dalis skirta tokių tiltų gniuždomųjų lenkiamųjų elementų elgsenos ir stabilumo analizei. Apžvelgti gniuždomųjų, gniuždomųjų lenkiamųjų elementų skaičiavimo modeliai ir analizės metodai. Apibendrinti galimi tarpinių atramų variantai, atsižvelgiant į atramos standumą bei jų įtaką gniuždomųjų, lenkiamųjų bei gniuždomųjų lenkiamųjų elementų elgsenai. Aptartos plieninių konstrukcijų stabilumo vertinimo nuostatos, pateikiamos projektavimo norminiuose dokumentuose. Aptiriamos nuokrypos, į kurias reikia atsižvelgti atliekant visuminę plieninių konstrukcijų analizę bei galimi jų įvertinimo variantai. Aprašomi tradiciniai konstrukcijų analizės metodai, pagrindinės prielaidos ir supaprastinimai, priimami juos taikant, taip pat įvardijami juos keičiantys alternatyvieji tikslesni metodai, jų svarba ir nauda projektuojant šiuolaikines konstrukcijas.

2. Paspyrinių tiltų naujų formų paieška

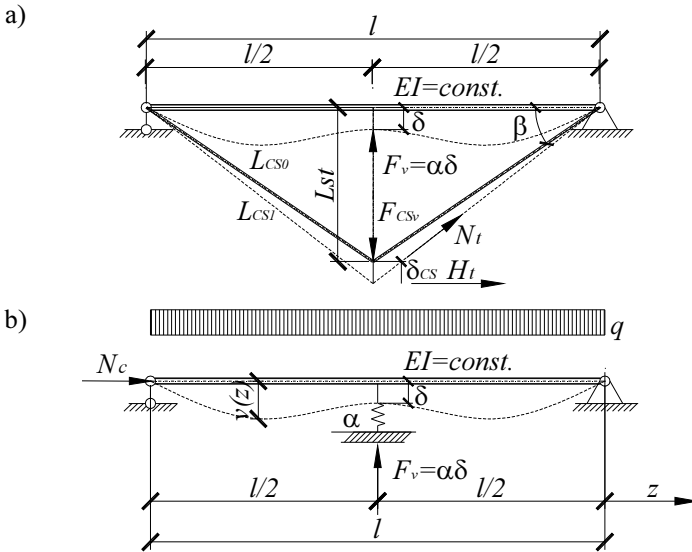
Antrajame darbo skyriuje pasiūlyta nauja paspyrinio tilto forma, kuri leidžia atsisakyti tradicinio sprendimo formuoti parabolinę paspyrinės sistemos apybrėžą ir didinant paspyrinio tilto tarpatramį didinti statramsčių skaičių. Parabolinės apybrėžos paspyriniai tiltai pasižymi efektyvia elgsena veikiant simetrinei apkrovai, nes tokia forma geriausiai atitinka tokios apkrovos sukeltą momentų diagramą. Tačiau asimetrinės apkrovos atveju konstrukcija deformuojasi nepageidaujama sinusoidės forma, kurios stabilizavimui reikalingos papildomos konstrukcinės priemonės. Pasiūlyta nauja dviejų lygių trikampės apybrėžos paspyrinė sistema (1 pav.) leidžianti išvengti nepageidaujamų poslinkių ir įrašų veikiant asimetrinei apkrovai. Tokia konstrukcijos forma dėl taikomo sistemos sąlyginio suskaidymo supaprastina netiesinės elgsenos ir stabilumo analizę.



1 pav. Pasiūlyta nauja dviejų lygių paspyrinio tilto forma

Siekiant pasiūlyti skaičiavimo metodiką naujos dviejų lygių trikampės apybrėžos paspyrinės sistemos elgsenos bei stabilumo analizei atlikti, nagrinėjamas tokios konstrukcijos skaičiuojamasis modelis, aptariamas atskiro vieno lygio sistemos skaičiavimas bei jo prielaidos. Antrojoje skyriaus dalyje suformuotas apibendrintasis gniuždomojo lenkiamojo elemento su tarpine paslankia atrama skaičiavimo modelis, kuris reikiamu tikslumu išreiškia trikampės apybrėžos paspyrinio tilto elgseną (2 pav.).

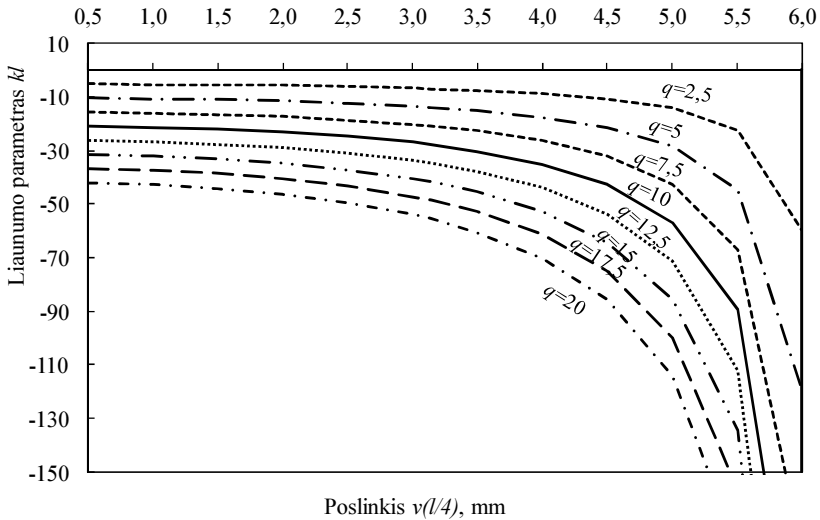
Atliktų tyrimų antrajame etape buvo išspręstas paspyrinio tilto gniuždomų lenkiamų elementų elgsenos netiesinis uždavinys. 3 paveiksle pateiktos nagrinėjamojo elemento poslinkio priklausomybės nuo liaunumo parametro, kuris nusakomas priklausomybe tarp veikiančios ašinės gniuždomosios jėgos (N_c) ir elemento lenkiamojo standžio (EI), t. y. $kl = l\sqrt{N_c / EI}$.



2 pav. a) trikampės apybrėžos paspyrinio tilto skaičiuojamoji schema b) gniuždomo lenkiamo elemento su tarpine tampriai paslankia atrama skaičiuojamoji schema

3 paveiksle pateiktos netiesinės priklausomybės parodo kaip ašinė jėga keičia konstrukcijos elgseną. Parodyta, kad būtina nustatant veikiančias vidines jėgas ir momentus atsižvelgti į netiesinę geometriškai elgseną. Išvestos išraiškos nagrinėjamos konstrukcijos poslinkiams, lenkiamiesiems momentams apskaičiuoti. Šios išraiškos apibendrina literatūros apžvalgoje aptartus žinomus kraštinius gniuždomų lenkiamų elementų skaičiavimo atvejus, t. y. kai skersinė apkrova artėja į nulį $q \rightarrow 0$ ir gaunamas gniuždomas elementas su tarpine paslankia atrama, ir kai tarpinės atramos standumas artėja į begalybę $\alpha \rightarrow \infty$, t.y. nagrinėjamas gniuždomasis lenkiamasis elementas su nepaslankia tarpine atrama. Dėl akivaizdžios netiesinės elgsenos (3 pav.), kuria pasižymi nagrinėjamas elementas, superpozicijos principo taikymas yra nekorektiškas. Tai patvirtina ir nusako apibendrintojo skaičiavimo modelio ir jį atitinkančios netiesinės analizės metodikos taikymo būtinybę. Skyriaus antrosios dalies pabaigoje pateikiama skaitinė pasiūlytos metodikos tikslumui įvertinti analizė. Lyginamoji skaitinė analizė atlikta taikant baigtinių elementų programinį paketą ANSYS. Sugretinus skaičiavimų rezultatus, gautus kompiuterine programa ANSYS ir pagal siūlomas analizes išraiškas, paklaidos neviršijo

0,16 %. Todėl galima teigti, kad parengtos skaičiavimo metodikos tikslumas yra pakankamas.

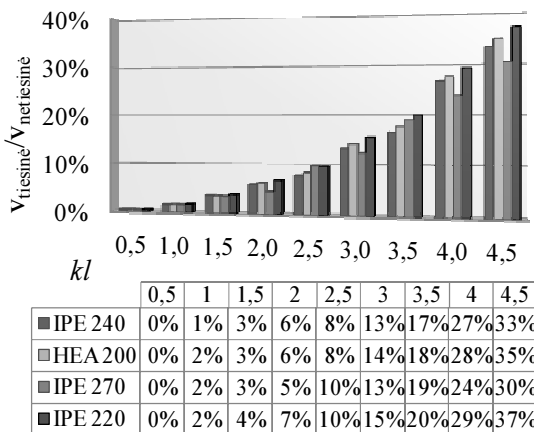


3 pav. Gniuždomojo lenkiamojo elemento su tarpine paslankia atrama poslinkių priklausomybės nuo liaunumo parametro kl

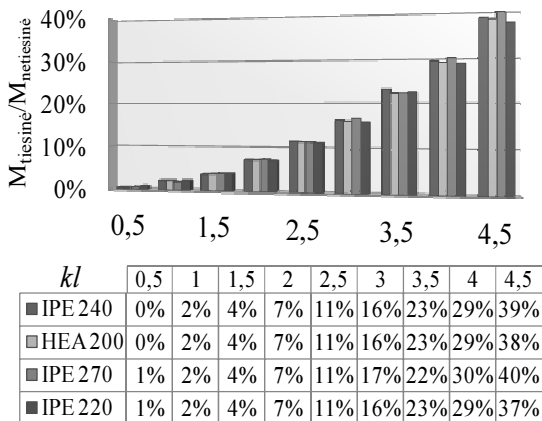
Šio skyriaus trečiojoje dalyje pateikta skaičiavimo metodika naujo dviejų lygių paspyrinio tilto elgsenos analizei atlikti. Aprašytas algoritmas ašinei gniuždymo jėgai standumo sijoje nustatyti. Skaitinės analizės metu keičiant liaunumo parametro reikšmes apskaičiuoti lenkiamieji momentai ir poslinkiai tiek taikant pirmos eilės analizę, kai atsižvelgiama tik į pradinę konstrukcijos geometriją, tiek ir netiesinę analizę, kai atsižvelgiama į konstrukcijos deformuotąją būseną. Buvo nustatytos atitinkamos analizės taikymo ribos. 4 paveiksle stulpelinės diagramos pavidalu pateikiami atliktos analizės rezultatai procentiniai skirtumai.

Remiantis 4 paveiksle pateikiamomis diagramomis, galima apibrėžti netiesinio skaičiavimo taikymo ribas. Pirmos eilės analizė gali būti taikoma, jei galima nepaisyti ašinės jėgos sukulto papildomų lenkiamųjų momentų ir poslinkių padidėjimo. Tiesinė analizė gali būti taikoma, jei liaunumo parametro reikšmė neviršija 2,5.

a)



b)



4 pav. Paspyrinių tiltų lyginamosios tiesinio ir netiesinio skaičiavimo analizės rezultatai: a) poslinkiai, b) lenkiamieji momentai

3. Paspyrinių tiltų visuminė elgsenos ir stabilumo analizė

Trečiajame skyriuje pateikiamas patobulintas anksčiau suformuluotas skaičiavimo modelis paspyrinio tiltų gniuždomųjų lenkiamųjų elementų elgsenos ir stabilumo analizei atlikti, įvertinant geometrines nuokrypas ir liekamuosius įtempimus. Nagrinėjamai konstrukcijai skaičiuoti taikomi modeliai, pateikti 5 paveiksle, kuriame matyti, kad gniuždomieji lenkiamieji

elementai nagrinėjami įvertinant jų pirminę deformuotąją ašį. Ji nusakoma sinusoidės lygtimi:

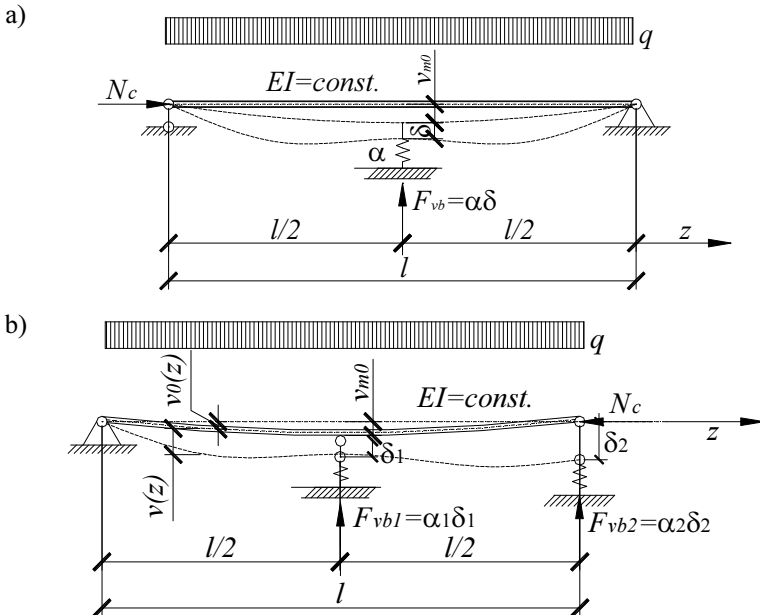
$$v_0 = v_{m0} \sin\left(\frac{\pi z}{l}\right). \quad (1)$$

Kreivalinijinių konstrukcinių elementų modeliavimui baigtinių elementų programiniu paketu naudojama kubinė „Spline“ funkcija, atitinkanti sinusoidę.

Bendrosios lygiavertės geometrinės nuokrypos (v_0) amplitudės (v_{m0}) nustatymui panaudota supaprastinta apibendrintųjų nuokrypų išraiška:

$$v_{m0} = \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) \frac{W}{A}, \quad (2)$$

kurioje α – nuokrypos koeficientas pagal atitinkamas klupumo kreives, $\bar{\lambda}$ – sąlyginis liaunis, W – skerspjūvio atsparumo momentas, A – skerspjūvio plotas.



5 pav. Paspyrinio tilto gniuždomųjų lenkiamųjų elementų skaičiavimo modeliai: a) su tarpine paslankia atrama, b) su tarpine ir kraštine paslankia atrama

Antrajame skyriuje išvestos paspyrinio tilto gniuždomųjų lenkiamųjų elementų skaičiavimo metodo išraiškos, įvertinant bendrąją nuokrypą.

Patobulinto skaičiavimo metodo rezultatų tikslumas apčiuobtas taikant skaitinę analizę naudojant baigtinių elementų programą ANSYS. Gauti skaitinės analizės rezultatai sugretinti su norminiuose plieninių konstrukcijų projektavimo dokumentuose pateikiamų standartinių skaičiavimo metodų rezultatais. Gautos santykinės procentinės paklaidos kito nuo -4,2% iki 16 %, priklausomai nuo liekamųjų įtempių įtakos skerspjūviui, apkrovimo varianto.

Skyriaus trečiojoje dalyje pateikiama naujos dviejų lygių paspyrinio tilto įrašų reguliavimo metodika, esant karpytajai ir pusiau nekarpytajai standumo sijai.

Paskutinėje skyriaus dalyje struktūriškai pateikiama naujo paspyrinio tilto gniuždomųjų lenkiamųjų elementų visuminės analizės praktinio taikymo metodika.

4. Paspyrinio tilto eksperimentinis tyrimas

Ketvirtajame skyriuje pateikiamas paspyrinio tilto erdvinio modelio eksperimentinis tyrimas ir šio tyrimo rezultatai. Formuluojamas tyrimo tikslas ir uždaviniai, taikoma metodika ir naudojami matavimo prietaisai. Apibūdinamas paspyrinio tilto konstrukcijos erdvinis modelis ir pateikiami jo geometriniai ir fiziniai parametrai. Parodomi modelio apkrovimo variantai (simetrinis ir asimetrinis) bei apkrovimo pakopos. Pateikiami atliktų tyrimų rezultatai: nagrinėjamos konstrukcijos įlinkiai, standumo sijos lenkiamieji momentai bei tilto modelio elementų įtempiai. Atlikta eksperimentinių ir teorinių tyrimų rezultatų lyginamoji analizė. Pateiktos skyriaus išvados.

Bendrosios išvados ir rezultatai

1. Ilgesnių tarpatriamių paspyriniai tiltai projektuojami su parabolės formos paspyrine sistema ir veikiant asimetrinei apkrovai deformuojasi pagal nepageidautiną sinusoidės formą. Pasiūlytas naujas plieninio paspyrinio tilto konstrukcinis sprendimas. Naujosios formos konstrukcija stabilizuoja pradinę tilto būseną veikiant asimetrinei apkrovai.
2. Nustatyta, kad paspyrinio tilto standumo sijos elgseną atitinka gniuždomojo lenkiamojo elemento su tarpine paslankia atrama skaičiuojamasis modelis. Suformuotas apibendrintasis skaičiavimo modelis ir pateikta nauja skaičiavimo metodika tokių elementų netiesinei elgsenos analizei ir stabilumo skaičiavimui atlikti. Šios

- metodikos tikslumas aprobuotas baigtinių elementų programiniu paketu ANSYS, gautos santykinės paklaidos neviršijo 0,11 %.
3. Naudojant laisvai paremtu gniuždomo lenkiamo elemento skaičiavimo modelį santykinės procentinės paklaidos, lyginant su Europos projektavimo normomis, neviršijo 1%, kai tuo tarpu apibendrintojo skaičiavimo modelio atveju gautos paklaidos kinta nuo 5% iki 15%, priklausomai nuo liekamųjų įtempių įtakos skerspjūvio laikomajai galiai bei apkrovimo varianto.
 4. Pateikta naujo paspyrinio tilto su karpytąja ir pusiau nekarpytąja standumo sija įrašų reguliavimo metodika. Atliktos lyginamosios analizės rezultatai parodė, kad reguliuojant įrašas paspyriniame tilte su karpytąja standumo sija gaunamos 1,47 kartų mažesnės lenkiamųjų momentų reikšmės nei pusiau nekarpytosios standumo sijos atveju.
 5. Pateikta paspyrinių tiltų gniuždomųjų lenkiamųjų elementų visuminės analizės praktinio taikymo metodika plieninių konstrukcijų projektavimui.
 6. Atlikto paspyrinio tilto modelio eksperimentinio tyrimo rezultatai patvirtino priimtas skaičiavimo prielaidas bei parodė pasiūlytos skaičiavimo metodikos tikslumą. Nustatyta, kad paklaidos tarp eksperimentinių ir teorinių įtempių reikšmių neviršijo 10 %.

Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Misiūnaitė, I.; Daniūnas, A.; Juozapaitis, A. 2012. Unconventional double-level structural system for under-deck cable-stayed bridges, *Journal Civil Engineering and Management* 18(3): 436–443. ISSN 1392-3730 (Thomson ISI Journal List).

Misiunaite, I.; Juozapaitis, A.; Merkevicius, T. 2003. Improvements on the structural response control of unconventional cable-stayed bridges by nonlinear analysis modelling, *Metal Constructions* 19(1), p. 59–66. ISSN 1993-3517 (Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture).

Straipsniai kituose leidiniuose

Misiunaite, I.; Juozapaitis, A. 2013. Direct stability analysis of steel beam-column with an elastic restraints, *Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics and Computation: proceedings of the fifth international conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation: SEMC 2013*, Cape Town, South Africa, 2–4 September 2013. Boca Raton: CRC Press, 2013. ISBN 9781138000612. p. 1165–1170.

Misiunaite, I.; Juozapaitis, A.; Daniunas, A. 2013. Evaluation of requirements for global analysis in EC3 for the structural analysis of the simple-span under-deck cable-stayed bridge, *Procedia Engineering. 11th international conference on modern building materials, structures and techniques (MBMST)*, May 16–17, 2013, Vilnius, Lithuania. Amsterdam: Elsevier Science Ltd, 2013. ISSN 1877-7058. 2013, Vol. 57, p. 781–788. (Thomson ISI Proceedings).

Misiunaite, I.; Juozapaitis, A. 2013. Verifying the stability of unconventional cable-stayed bridges with an innovative approach, *New Developments in Structural Engineering and Construction: Seventh International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC–7)*, held on the campus of the University of Hawaii at Manoa, Honolulu, from June 18–23, 2013. Singapore: Research Publishing Services, 2013. ISBN 9789810753542. p. 127–132.

Misiunaite, I.; Juozapaitis, A. 2012. Computational non-linear buckling analysis of an elastically restrained steel beam, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*, Dubrovnik, Croatia, 4–7 September 2012. Stirlingshire: Civil–Comp Press, 2012. ISSN 1759-3433. p. 1–14.

Trumpos žinios apie autorių

Ieva Misiūnaitė gimė 1984 m. sausio 5 d. Kaune. 2005–2007 m. dirbo sąmatininke statybos kompanijoje „Kortas“, 2007–2008 m. – projektuotoja įmonėje „Nerijaus projektas“ ir 2008–2010 m. įmonėje „Archiplanas“. 2006 m. Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Statybos fakultete įgijo statybos inžinerijos bakalauro laipsnį, o 2008 – statybos inžinerijos magistro mokslo laipsnį. 2009–2013 m. – VGTU doktorantė. 2010 m. Ieva Misiūnaitė stažavosi Sidnėjaus universitete, Australijoje, o 2011 m. buvo trumpalaikėje stažuotėje Lavalio universitete, Kanadoje. Nuo 2011 m. dirba asistente VGTU Tiltų ir specialiujų statinių katedroje, o nuo 2012 m. – tyrėja.

STRUCTURAL BEHAVIOUR AND STABILITY OF STEEL BEAM-COLUMN ELEMENTS IN UNDER-DECK CABLE-STAYED BRIDGE

Topicality of the problem. It is frequently the case, especially in the bridges design, that a structure is required to be so slender that is actually no longer suitable for the intended span. The common solution of the increasing the depth of the cross-section is not desirable, thus intermediate supports are the only possible alternative. Extra piers or other kind of abutments could be added but that is not the intention in the context of today’s design of structures, namely, to span a large distance with a structure which is “too slender”.

Therefore, indirect intermediate supports are the only way of overcoming this problem. The concept of increasing the span with indirect intermediate supports and eliminating the intermediate piers reflects structural form of bridge namely under-deck cable stayed (UDCS) bridge.

Due to direct anchorage of cable-staying system, rigid beam (RB) of UDCS bridge is simultaneously subjected to axial compression and bending. The presents of an effect of axial compression makes it essentially non-linear problem and refers to stability verification. The analysis of steel structures is based upon calculation model and basic assumptions which reflect the structural behaviour of the considering structure. The calculation model best reflecting structural behaviour of considering structures is beam-column with intermediate elastic supports (BCIR). To date, there are number of known solutions for structural elements with intermediate supports, but in all available studies either stiffness of elastic support approach infinity or transverse load vanish, thus general solution for beam-column with intermediate elastic support still remains an issue for research.

Moreover, design of innovative structures requires application of advanced analysis methods. All major international design codes contain provisions for Advanced Structural design, but actual use is still limited, primarily because of the lack of practical implementation. The sufficiency of the method cannot be doubted, but as matter of fact practitioners rarely use it. However, in the absence of a strong background of standardization, the method of Advanced Design remains a possibility (and problem of the researchers) rather than a practical tool.

The object of research. The object of present study is elastic in-plane structural behaviour of imperfect steel beam-column elements embedded in UDCS bridge.

The main objective of the thesis. The main objective is to study structural behaviour and stability verification of the steel beam-columns by considering a new structural arrangement of under-deck cable-stayed bridge.

The tasks of the work

The accomplishment of the objective involves considering a number of particular tasks that are described in the following:

1. To review structural behaviour of the existing forms and types of UDCS bridges as well as the structural response design criteria and the governing parameters for the verification of the stability of the bridges

- and their structural elements: rigid beam and cable-staying system separately.
- 2 . To find a new form of steel UDCS bridge and compare it to conventional ones considering both symmetric and asymmetric load cases.
 - 3 . To develop computational method for geometrically nonlinear analysis of additionally elastically restrained steel beam-column accounting geometrical and physical imperfections and considering the interaction of bending and axial compression effects.
 - 4 . To determine governing parameters and define governing equations for predicting flexural and deformational response of the rigid beam of steel UDCS bridge under case of symmetric and asymmetric loading.
 - 5 . To describe the algorithm of an iterative procedure for determining axial response in the rigid beam of steel UDCS bridge.
 - 6 . To perform structural behaviour analysis and stability verification using proposed computational method and appropriate calculation model of the beam-column element.
 - 7 . To carry out experimental investigation of UDCS bridge model and evaluate the accuracy of proposed computational method.
 - 8 . To propose the technique for structural response control of rigid beam of under-deck cable-stayed bridge and determine its limits of efficiency.

Methodology of research

The objective of the research was achieved using the following methodology:

- Literature review as outlined in Chapter 1 was undertaken to develop the required knowledge, define the gaps and drawbacks in this research field.
- Form-finding of the UDCS bridge aiming to increase the efficiency of its structural response.
- Structural modelling according the requirements of the Direct Analysis and generalization of the calculation model for the beam-column in UDCS bridge.
- Accounting for geometrical imperfections.
- Evaluating the effect of geometrical imperfections and residual stress by applying generalized imperfection concept.
- Applying FE code ANSYS for geometrically imperfect elements modelling and solving nonlinear problems in order to evaluate the accuracy of the proposed computational method.

- Applying the concept of the equal extreme values of the hogging and sagging moments to obtain rational eccentricity and develop efficient technique for structural response control of the UDCS bridges.
- Experimental investigation.
- Comparative analysis of in order to evaluate the accuracy of the results.

Scientific novelty

The aspects of scientific novelty of theoretical and numerical research of nonlinear structural behaviour of steel stiffening girder of UDCS bridge by means of beam-column with accounting for initial imperfections and second order effects are as follows:

1. As a very limited number of researches on structural behaviour of steel under-deck cable-stayed bridges have been reported so far, new data has been obtained on non-linear buckling and stability verification of such structures. Investigations on two different structural schemes of the stiffening girder and two innovative layouts of cable-staying system have been carried out. Prior to analysis of the bridge structures, computational and FEM analysis on structural behaviour and stability of beam-column elements with arbitrary support and restraint conditions were performed.
2. A computational method has been proposed for deriving governing equations to predict structural behaviour and verify the stability of UDCS bridge using generalized calculation models of beam-column elements. The proposed method based on the requirements of direct method (i.e. effect of deformed geometry and geometrical and material imperfections) for steel structures advanced analysis. To account for a deformed geometry effect the governing equations derived using equilibrium equations by applying moderately large displacement theory and for simulation of geometrical and material imperfections generalized imperfection concept was applied. Then, data of the computational estimates on the structural behaviour and stability of considering steel structures was compared with “exact” values, obtained from large displacements static analysis performed by means of FEM code ANSYS.
3. An efficient computational technique has been proposed for structural response control analysis of simple-span UDCS bridge. The proposed technique based on the eccentric anchoring of CS system and increases the cross-sections utilization by efficient bending moment’s distribution in the rigid beam.

Practical value of the achieved results of the research embodies:

- Generalized calculation models of beam-column elements which could be used for simulation various engineering problem of steel braced structures for both computational and computer-aided analysis.
- Outlined practical guidelines for application of Direct Analysis Method performing both computational and computer-aided analysis on steel structures and individual elements.
- Detailed the implementation of geometrical and material imperfections by applying generalized imperfections concept for computational estimates as well as FE simulations in commercial software.
- Proposed efficient technique for the achievement of efficient bending moments distribution in the simple-span additionally supported steel structures what reflects to economic aspects of steel structures and especially bridges design.

Defended statements

The following statements based on the results of present study may serve as the official hypotheses to be defended:

1. New form of UDCS bridge stays on triangle cable-system elevation and solves the problem of unacceptable deflection shape under the case of asymmetric loading.
2. The proposed computational method eliminates the effective length and limitations of eigenvalue analysis for steel structures design.
3. The developed computational method for structural behaviour analysis of beam-column elements with intermediate elastic restraint takes into account initial imperfections.
4. Developed generalized calculation model of beam-column element with intermediate restraint is relevant due to generalization of calculation models of column with intermediate elastic restraint and beam-column with rigid intermediate restraint as superposition is irrelevant solving essentially nonlinear problems.

The scope of the scientific work

Dissertation excluding annexes consists of 164 pages, within the text 111 numbered formulae, 63 figures and 18 tables used. The dissertation is structured around four main chapters:

Chapter 1 revises used literature. At the end of the chapter, conclusions are drawn and the tasks for the dissertation are reconsidered.

Chapter 2 develops a new structural form for the under-deck cable-stayed bridge, deals with the calculation models of initially perfect additionally elastically restrained beam-column and suggests computational method for the solution of the non-linear problem verifying the stability of the under-deck cable-stayed bridge.

Chapter 3 improves in Chapter 2 proposed computation method with accounting for imperfections and suggest the new technique for the structural response control to increase the economic criterion of designing additionally supported steel structures.

Chapter 4 present objective, tasks, methodology and results of the experimental investigation of the three scale UDCS bridge model.

General conclusions and recommendations for further research summarises the present study. It is followed by the list of references and scientific author's publications on the subject of the dissertation.

General conclusions

Present study aims at contributing to a better understanding of the structural response and stability analysis of the beam-column elements in the UDCS bridges and concludes as following:

1. Under the case of asymmetric loading multiple-struts UDCS bridges with the layout of polygonal cable-staying system experience objectionable deflection shape. New arrangement of the cable-staying system for the UDCS bridge have been proposed and refers to deformational response stabilization.
2. Structural behaviour of the rigid beam of the UDCS bridge reflects structural behaviour of the elastically restrained beam-column element. Developed generalized calculation model and a new computational method based on GNA for the accurate and safe structural analysis of the BCIR. Results of the finite element code ANSYS are in close agreement with the analytical ones as relative errors do not exceed 0,11 %.
5. Evaluation of current design practices of EC3 provided controversial results. For the fundamental case of simple-supported beam-column, the relative errors do not exceed 1%. Though, analysing generalized calculation model of BCIR obtained disagreement from 5% to 15% according to the cross-section sensitivity to the residual stresses.
6. Appropriate structural response control technique for the continuous UDCS structures detailed. The comparison analysis of the semi-continuous and simple-span Double-Level UDCS bridge applying appropriate structural response technique emphasized the efficiency of

the structural response control based on rational eccentricity concept with the provided 1,47 times less rational moment value than for the case of semi-continuous structure.

7. Practical guidelines for the structural design of the advanced structures such as UDCS bridges have been provided on the approach of Direct Method.
8. The results of experimental investigation approved adopted assumptions and evaluated the accuracy of the proposed method. The comparative values of the measured and estimated general stresses are in satisfactory agreement and do not exceed 10%.

About the author

Ieva Misiūnaitė was born in Kaunas, on 5 of January in 1984. First degree in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), 2006. Master of Science in Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering, Vilnius Gediminas Technical University, 2008. In 2005–2007 was working at “Kortas” as an estimator, in 2007–2008 at “Nerijaus projektas” and in 2008–2010 at “Archiplanas” as a structural engineer. In 2009–2013 – PhD student of Vilnius Gediminas Technical University. Ieva Misiūnaitė in 2010 was on an internship at Sidney University in Australia and in 2011 on short term internship at Laval University in Canada. At present – assistant and researcher in Bridge and Special Structures Department of Vilnius Gediminas Technical University.

leva MISIŪNAITĖ

STRUCTURAL BEHAVIOUR AND STABILITY OF STEEL BEAM-COLUMN
ELEMENTS IN UNDER-DECK CABLE-STAYED BRIDGE

Summary of Doctoral Dissertation
Technological Sciences, Civil Engineering (02T)

leva MISIŪNAITĖ

PLIENINIŲ PASPYRINIŲ TILTŲ GNIUŽDOMŲ LENKIAMŲ ELEMENTŲ
ĮTEMPIŲ DEFORMACIJŲ BŪSENA IR STABILUMAS

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, statybos inžinerija (02T)

2013 12 23. 1,5 sp. l. Tiražas 70 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