

ISSN 2029-9303

ISSN 2783-6215



**KAUNO TECHNIKOS KOLEGIJA**  
**KAUNAS UNIVERSITY OF APPLIED ENGINEERING SCIENCES**

**INŽINERINĖS IR EDUKACINĖS  
TECHNOLOGIJOS**

Mokslinių straipsnių žurnalas

**ENGINEERING AND EDUCATIONAL  
TECHNOLOGIES**

Scientific journal

Kaunas, 2024

Vyriausioji redaktorė <b>Doc. Dr. Lina Girdauskienė</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
Mokslinė sekretorė <b>Doc. Dr. Giedrė Adomavičienė</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
Vykdančioji redaktorė <b>Doc. Dr. Esmeralda Štyps</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Redaktorių kolegija/Editorial Board:</b>	
<b>Doc. Dr. Jurgita Barynienė</b> <i>Kauno technologijos universitetas/ Kaunas University Of Technology (Lietuva/Lithuania)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
<b>Dr. Ali Can</b> <i>Karabuk universitetas/ Karabuk University (Turkija/Turkey)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Andrius Dargužis</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Sandra Ežmale</b> <i>Malnava kolegija/ Malnava College (Latvija/Latvia)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
<b>Prof. Dr. Genutė Gedvilienė</b> <i>Vytauto Didžiojo universitetas/ Vytautas Magnus University (Lietuva/Lithuania)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
<b>Dr. Ivans Griņevičs,</b> <i>Rygos technikos universitetas/Riga Technical University (Latvija/Latvia)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Dr. Viktors Gutakovskis</b> <i>Rygos technikos universitetas/Riga Technical University (Latvija/Latvia)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Ernestas Ivanauskas</b> <i>Kauno technologijos universitetas/ Kaunas University of Technology (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Prof. Habil. Dr. Gál József</b> <i>Šegedo universitetas/ University of Szeged (Vengrija/Hungary)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Darius Kybartas</b> <i>Kauno technologijos universitetas/ Kaunas University Of Technology (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Prof. Dr. Roy Knechtel</b> <i>Šmalkaldeno taikomųjų mokslų universitetas/University of Applied Sciences Schmalkalden (Vokietija/Germany)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Daiva Lepaitė</b> <i>Vilniaus universitetas/Vilnius University (Lietuva/Lithuania)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
<b>Prof. Dr. Zbigniew Lukasik</b> <i>Radomo Kazimiero Pulaskio technikos ir humanitarinis universitetas/ Casimir Pulaski University of Radom (Lenkija/Poland)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Jonas Matijošius</b> <i>Vilniaus Gedimino technikos universitetas/ Vilnius Gediminas Technical University (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Tomas Mickevičius</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences

<b>Doc. Dr. Vytenis Naginevičius</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Rosita Norvaišienė</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Prof. Dr. Tomasz Perzyfiski</b> <i>Radomo Kazimiero Pulaskio technikos ir humanitarinis universitetas/ Casimir Pulaski University of Radom (Lenkija/Poland)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Virgaudas Puodžiukas</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Alfredas Rimkus</b> <i>Vilniaus Gedimino technikos universitetas/ Vilnius Gediminas Technical University (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Doc. Dr. Marius Saunoris</b> <i>Kauno technologijos universitetas/ Kaunas University of Technology (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Prof. Dr. Rainer Schackmar</b> <i>Šmalkaldeno taikomųjų mokslų universitetas/University of Applied Sciences Schmalkalden (Vokietija/Germany)</i>	Socialiniai mokslai/ Social Sciences
<b>Doc. Dr. Raimondas Šadzevičius</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Prof. Dr. Boris Tudjarov</b> <i>Sofijos technikos universitetas/ Technical University of Sofia (Bulgarija/Bulgaria)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Prof. Dr. Slawomir Wierzbicki</b> <i>Varmijos Moziūrų universitetas/ University of Warmia and Mazury (Lenkija/Poland)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences
<b>Dr. Rasa Žygienė</b> <i>Kauno technikos kolegija/ Kaunas University of Applied Engineering Sciences (Lietuva/Lithuania)</i>	Technologijos mokslai/ Technological Sciences

Leidiny s įrašytas į **LMT patvirtintų leidinių sąrašą**

<http://www.mab.lt/lt/istekliai-internete/mokslo-zurnalai/269>

Ir įtrauktas į **Index Copernicus Journals Master List**

<http://journals.indexcopernicus.com/inznerina+ir+educacinos+technologijos.p12156.3.html>

Redakcijos adresas:

**VšĮ Kauno technikos kolegija**

Tvirtovės al. 35, LT- 50155 Kaunas

Tel./faks. (8 37 308620)/( 8 37 333120)

El. p. ktk@ktk.lt

<http://www.ktk.lt>

Address:

**Kaunas University of Applied Engineering Sciences**

Tvirtovės av. 35, LT- 50155 Kaunas

Phone./fax. (+370 37 308620)/( +370 37 333120)

E-mail. ktk@ktk.lt

<http://www.ktk.lt>

**Visos leidinio leidybos teisės saugomos. Šis leidinys arba kuri nors jo dalis negali būti dauginami, taisomi ar kitaip platinami be leidėjo sutikimo.**

**All rights of the publication are reserved. No reproduction, copy or transmission of this publication may be made without publisher's permission.**

© Kauno technikos kolegija, 2024

**ISSN 2029-9303**

**ISSN 2783-6215**

## REDAKTORIAUS ŽODIS

Gerbiami skaitytojai ir kolegos,

Mokslinių straipsnių žurnalo “Inžinerinės ir edukacinės technologijos” redakcija pristatydamą Jums 2024 metų pirmąjį numerį, džiaugiasi, jog šį kartą į Jūsų rankas patenka gana plataus technologinių mokslų spektro mokslinių publikacijų leidinys.

Džiugu, kad mokslinius tyrimų rezultatus publikuoja tiek universitetų, tiek kolegijų tyrėjai arba tyrėjų grupės, o šių tyrimų rezultatų pasiekiamumas tampa prieinamas platesniam skaitytojų ratui.

Šis mokslinis žurnalas – tai puiki galimybė dėstytojams, studentams, tyrėjams viešinti savo atliktų mokslinių taikomųjų tyrimų rezultatus, rasti bendradarbiavimo taškų su kitomis tyrėjų grupėmis.

Tikimės, kad visi paminėti aspektai paskatins skaitytojų susidomėjimą publikacijomis, dėkojame straipsnių autoriams ir tikimės sėkmingo tolesnio bendradarbiavimo.

Su pagarba,  
Vyriausioji redaktorė

Socialinių mokslų dr Lina Girdauskienė

## TURINYS

DIRBTINIŲ KRAUJAGYSLIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS.....	6
Radvilė Jankauskytė, Andžela Šešok, Dovydas Cicėnas Vilnius Tech	
SLIEKINĖS PAVAROS GEOMETRINIŲ PARAMETRŲ OPTIMIZAVIMAS TAIKANT ATKAITINIMO MODELIAVIMO ALGORITMĄ .....	12
Ilja Guščin, Vadim Mokšin Vilnius tech	
SKIRTINGO HIBRIDIZACIJOS LYGIO AUTOMOBILIŲ EFEKTYVUMO TEORINIS TYRIMAS .....	19
Darius Juodvalkis, Andrius Dargužis Kauno technikos kolegija	
INVESTIGATION AND EVALUATION OF THE IMPACT OF ANTIVIRUS PROTECTION ON THE PERFORMANCE OF A PERSONAL COMPUTER.....	24
Priyanka Wagle, Gediminas Gražulevičius Vilnius Techn	
PROGRAMUOJAMŲ LOGINIŲ VALDIKLIŲ PROGRAMOS TAIKYMO TYRIMAS NUOTOLINIAM IR SAVARANKIŠKAM VALDYMO GRANDINIŲ MOKYMUI/SI, ELEKTROS ENERGETIKOS PROGRAMOJE.....	30
Valdas Paulauskas Kauno technikos kolegija	
ELEKTROMAGNETINĖS LEVITACIJOS TAIKYMAS APŠVIETIMO SISTEMOSE .....	35
Edgard Aleinikov Vilnius Tech	
DIDELIO EFEKTYVUMO DOHERTY GALIOS STIPRINTUVO PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS .....	41
Erik Mickevič, Vaidotas Barzdėnas, Andžej Borel Vilnius Tech	
PASKIRSTYTŲJŲ PARAMETRŲ ŽEMŲJŲ DAŽNIŲ FILTRO SU ATVIROMIS KILPOMIS PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS .....	48
Erik Mickevič, Vaidotas Barzdėnas Vilnius Tech	
VIEŠO RAKTO SAUGUMO UŽTIKRINIMAS KRIPTOGRAFIJOJE: TEORINIAI IR PRAKTINIAI ASPEKTAI.....	55
Petras Nefas, Rūta Jankūnienė Kauno technikos kolegija	
KROVOS DINAMIKA BALTIJOS ŠALIŲ JŪRŲ UOSTUOSE .....	61
Diana Šateikienė, Gabrielė Rancaitė Klaipėdos valstybinė kolegija	
ĮMONĖS SANDĖLIO VALDYMO SISTEMA .....	67
Julija Smirnova <sup>1</sup> , Jurij Tekutov <sup>1, 2, 3</sup> Klaipėdos valstybinė kolegija <sup>1</sup> , Klaipėdos universitetas <sup>2</sup> , Lietuvos verslo kolegija <sup>3</sup>	

# DIRBTINIŲ KRAUJAGYSLIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS

Radvilė Jankauskytė, Andžela Šešok, Dovydas Cicėnas

Vilnius Tech

## Anotacija

Širdies ir kraujagyslių ligos (ŠKL) yra viena iš pagrindinių mirties priežasčių visame pasaulyje. Pastaraisiais metais šios srities dėmesio centre atsidūrė regeneracinė medicina, audinių inžinerija ir naujų medžiagų kūrimas, o elektrinio verpimo technologija, skirta nanoplauštinėms medžiagoms ruošti širdies ir kraujagyslių ligoms gydyti, patraukė žmonių dėmesį. Šio darbo tikslas yra elektrinio verpimo metodu pagaminti dirbtines kraujagysles iš polikapralaktono (PCL) ir kolageno mišinio bei iširti jų mechanines, porėtumo ir hidrofiliškumo savybes. Tyrimo rezultatai parodė, kad elektrinio verpimo būdu pagamintų PCL/kolageno dirbtinių kraujagyslių mechaninės savybės yra artimos natūralių kraujagyslių mechaninėms savybėms. Gautas tinkamas porėtumo procentas (80%) užtikrina gerą pusiausvyrą tarp mechaninio stiprumo, biologinio suderinamumo ir skysčių pralaidumo. Nustatyta, kad pagaminti bandiniai pasižymi hidrofobinėmis savybėmis.

**Reikšminiai žodžiai:** Elektrinis verpimas, dirbtinė kraujagyslė, porėtumas, hidrofiliškumas

## Įvadas

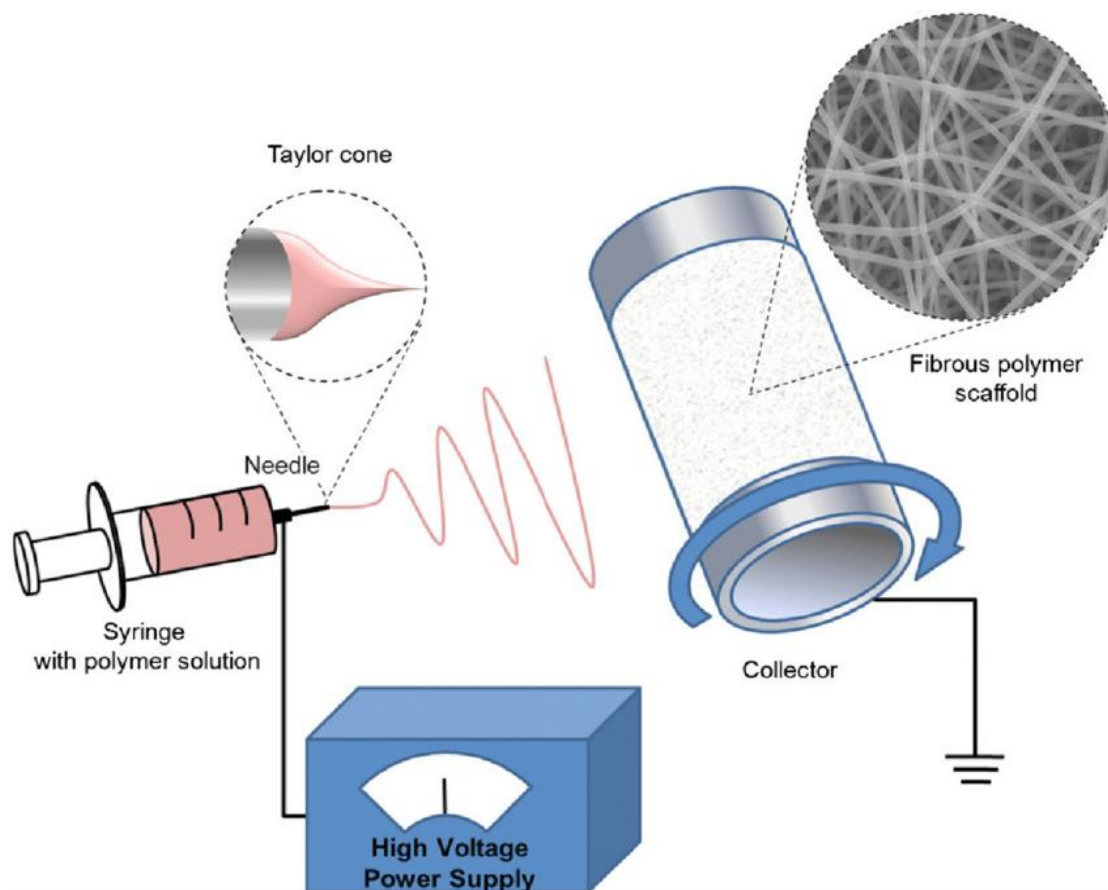
Pasaulio sveikatos organizacijos duomenimis, širdies ir kraujagyslių ligos (ŠKL) yra pagrindinė mirties priežastis pasaulyje – kasmet miršta 17,9 mln. žmonių. Beveik 85 % su ŠKL susijusių mirčių sukelia širdies priepuolis ir insultas, o trečdalis šių mirčių yra jaunesni nei 70 metų asmenys. Aterosklerozė yra pagrindinė ŠKL priežastis, o kraujagyslių pažeidimas gali išprovokuoti morfologinius pokyčius, tokius kaip stenozė, okliuzija ar išsiplėtimas, dėl ko gali sutrikti galutinių organų perfuzija arba plyšti kraujagyslių sienelės.

Dėl širdies ir kraujagyslių ligų paplitimo yra didelis poreikis mažo skersmens kraujagyslių transplantatų. Autologiniai kraujagyslių transplantatai laikomi aukso standartu atliekant šuntavimo ir revaskuliarizavimo operacijas. Tam tikslui naudojama didžioji poodinė vena kojose. Tačiau 20–40 % pacientų trūksta tinkamų venų transplantatų dėl jų ligos, per didelio skersmens ir kitų priežasčių (Rickel et al. 2021). Todėl reikia alternatyvos autologiniams kraujagyslių transplantatams. Medicinoje naudojamos iš polietilentereftalato (Dacron) pagamintos vidutinio ir didelio skersmens sintetinės kraujagyslės (Nasser et al. 2018). Tačiau mažo skersmens kraujagyslėms (<6 mm skersmens) šie sintetiniai transplantatai netinka dėl greitos okliuzijos ir ūmaus trombogeniškumo. Dėl unikalios dinaminės aplinkos, kuri egzistuoja mažuose kraujagyslėse, nebuvo sukurta tinkamų mažo skersmens kraujagyslių transplantatų. Kad būtų pasiektas ilgalaikis praeinamumas, sėkmingas kraujagyslių transplantatas turėtų labai atitikti vietinio audinio mechanines savybes, būti netrombozinis ir neimunogeninis, sukelti tinkamą gijimo atsaką. Elektrinis verpimas (*angl. Electrospinning*) yra daug žadantis požiūris į tinkamo kraujagyslių transplantato kūrimą.

Elektrinis verpimas yra metodas, leidžiantis sudaryti ištisines itin smulkias membranas, sudarytas iš polimerinių pluoštų. Procesas susideda iš aukštos įtampos panaudojimo, siekiant paskatinti polimerinio tirpalo tirpiklio išgaravimą, todėl ant metalinio paviršiaus, vadinamo kolektoriumi, susidaro mikrometriniai ir nanometriniai pluoštai (Rahmati, 2021). Taikant šią techniką didelio potencialo elektrinis laukas (apie 10–30 kV) veikia tarp metalinės švirkšto adatos, per kurią išeina polimero tirpalas su kontroliuojamu srautu ir metalinio įžeminto kolektoriaus (1 pav.). Kraujagyslių audinių inžinerijai paprastai naudojamas besisukantis kolektorius, kad būtų galima pagaminti vamzdelio formos transplantatą. Kai elektrospiningo srovė juda link kolektoriaus, nanoplauštai apjuosia besisukančio kolektoriaus perimetrą. Naudojant skirtingą ilgio ir skersmens santykį, esant skirtingam sukimosi greičiui, galima pagaminti tolygų pluošto lakštą arba išlygintus pluoštus.

Virš 40 sintetinių ir natūralių polimerų yra tinkami gamybai elektrinio verpimo būdu ir kai kurie iš jų yra sėkmingai taikomi kraujagyslių audinių inžinerijoje, vienas jų – polikaprolaktonas PCL (Rim, 2013; Reneker, 2008). PCL yra biologiškai suderinamas, biologiškai skaidus, biozorbuojamas polimeras, alifatinis poliesteris, priklausantis poli- $\alpha$ -hidroksi rūgščių grupei, toje pačioje cheminėje grupėje kaip polipieno rūgštys arba polilaktidas (PLA) ir poliglikolio rūgštys (PGA). PCL yra hidrofobinis, pusiau kristalinis polimeras, kurio stiklėjimo temperatūra yra – 60°C, o žema lydymosi temperatūra svyruoja nuo 59°C iki 64°C. Jis taip pat pasižymi geresnėmis viskoelastinėmis savybėmis nei kiti biologiškai skaidūs polimerai, todėl jį lengva gaminti ir manipuliuoti, galima sukurti daugybę struktūrų (mikrosferų, pluoštų, plėvelių, nanopluoštų ir kt.) (Azari et al. 2021).

Pastaruoju metu sintetinių (pvz. PCL, PLA, PGA) ir natūralių polimerų (pvz. kolageno) kopolimerai taikomi kaip biomedžiagos kraujagyslių transplantatams, nes jie pasižymi geromis elastinėmis ir biologinio skaidumo savybėmis. Kolagenas kaip natūralus hidrofiliškas polimeras susilaukė didelio dėmesio biomedicinoje dėl savo biologinio aktyvumo, skaidumo ir biosuderinamumo (Mei-Xian Li et. al 2023).



**1 pav.** Elektrinio verpimo schema

Šaltinis: Imren Esenturk et al. *Electrospinning method to produce drug-loaded nanofibers for topical/ transdermal drug delivery applications* (2016). Prieiga per internetą [https://www.researchgate.net/publication/313270393\\_Electrospinning\\_method\\_to\\_produce\\_drug-loaded\\_nanofibers\\_for\\_topical\\_transdermal\\_drug\\_delivery\\_applications](https://www.researchgate.net/publication/313270393_Electrospinning_method_to_produce_drug-loaded_nanofibers_for_topical_transdermal_drug_delivery_applications)

Kolagenas yra gausiausias žinduolių baltymas ir yra puiki biomedžiaga audinių inžinerijos reikmėms. Kolageno molekulės yra pagrindinė ekstraląstelinio matrikso (ELM) statybinė medžiaga. Kolageno baltymai turi keturias struktūrines hierarchijas, o stuburinių gyvūnų audiniuose egzistuoja mažiausiai 28 skirtingi kolageno tipai, kurių molekulės ilgis ir prie spirалės prisitvirtinusių angliavandenių skaičius ir charakteristikos skiriasi, tačiau jie visi turi bendrą trigubos spirалės struktūrą (Rickel et al. 2021). Kraujagyslės sienelėje randami šeši kolagenai, iš kurių I ir III tipai yra labiausiai paplitę, sudarantys didžiąją ELM dalį,

Labai nedaug elektrinio verpimo metodu gautų transplantų pagaminama naudojant vieną gryną polimerą be modifikacijų. Sintetiniai polimerai paprastai pasižymi puikiomis, reguliuojamomis mechaninėmis savybėmis, įskaitant standumą ir elastingumą, tačiau paprastai yra hidrofobiniai ir neturi tinkamos sąsajos ląstelėms prilipti, plisti ir daugintis. Kita vertus, nors natūralūs polimerai turi didelį biologinį suderinamumą ir ląstelių giminingumą, jie neturi mechaninio stiprumo, reikalingo arterijose būdingai dinaminei aplinkai. Taigi, dauguma šiandieninių tyrimų yra orientuoti į sintetinių ir natūralių polimerų derinius.

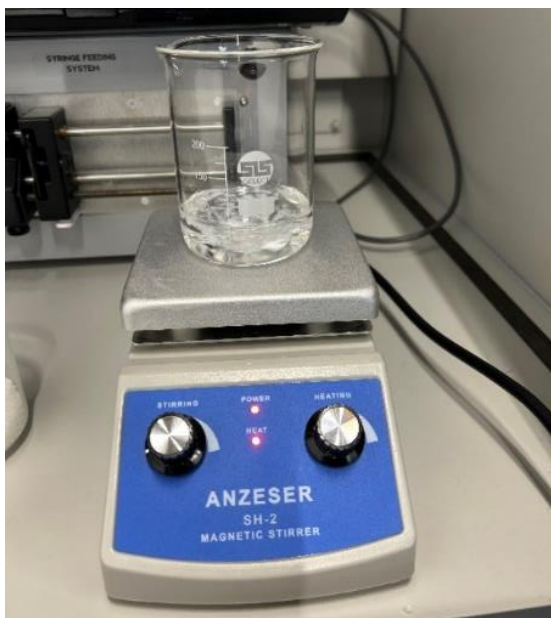
Audinių inžinerijos būdu sukurtos kraujagyslių transplantato koncepcija – sukurti alternatyvų kraujagyslių transplantatą, kuris integruotųsi į paciento audinius ir elgtųsi kaip vietinė kraujagyslė, įskaitant saviregeneracines ir augimo funkcijas (Leal B.B.J., et. al 2021). Kraujagyslių transplantatas iš biologinės pusės turėtų būti necitotoksiškas, neimunogeniškas, netrombogeniškas ir hemosuderinamas. Be to, jis turėtų sudaryti sąlygas ląstelių prisitvirtinimui. Hidrofilškumas skatina ląstelių adheziją ir proliferaciją ant medžiagos, kuri palengvina būtiną kraujagyslių regeneraciją (Sukchanta A. et al., 2021). Taip pat kraujagyslių transplantatai turi būti atsparūs fiziologinėms hemodinaminėms jėgoms. Mechaniniu požiūriu labai svarbu, kad dirbtinė kraujagyslė atlaikytų kraujo spaudimą, nebūtų pažeista ar negrįžtamai deformuota. Kitas veiksnys, į kurį reikia atsižvelgti, yra transplantato porėtumas, nes pralaidumo išlaikymas, ypač mažo diametro kraujagyslių transplantatų, vis dar yra iššūkis kraujagyslių audinių inžinerijos atveju. Porėtumas yra būtinas ląstelių mitybai, proliferacijai ir migracijai, reikalingai audinių vaskuliarizacijai ir naujų audinių formavimuisi (O'Connor R.A et al., 2021).

Šio tyrimo tikslas yra elektrinio verpimo metodu pagaminti dirbtines kraujagysles iš polikapralaktono (PCL) ir kolageno mišinio bei iširti jų mechanines, porėtumo ir hidrofiliškumo savybes.

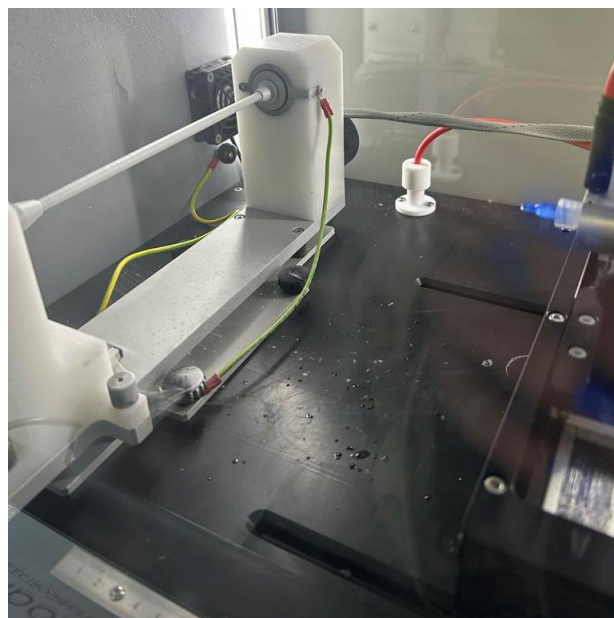


## Medžiagos ir metodai

PCL, kurio vidutinė molekulinė masė yra 80 000 (Sigma-Aldrich) iširpinamas kaip tirpiklį naudojant chloroformą (CF) (Sigma Aldrich). Koncentracija 15 wt% PCL. Maišymo indas dedamas ant maišyklės su kaitinimo plytele, kuri katalizuoja PCL granulių tirpimo procesą tirpiklyje. Maišyklė įjungama ir į tirpalą įmesta magneto kapsulė atlieka maišymo procesą. Chloroformas yra toksiškas tirpiklis, todėl maišymas atliekamas traukos spintoje. Tirpalo maišymo procesas pavaizduotas 2 pav.



**2 pav.** Tirpalo maišymo procesas  
*Šaltinis: sudaryta autorių*



**3 pav.** Elektrinio verpimo įrangos Spinbox  
cilindrinis kolektorius  
*Šaltinis: sudaryta autorių*

Prieš elektrinį verpimą, atšaldžius tirpalus iki kambario temperatūros, švirkšto pagalba į jau gautą PCL tirpalą įvedama 2 ml I tipo kolageno iš žiurkių uodegos (Sigma Aldrich).

Elektrinio verpimo įranga Spinbox (Spinbox System, Bionica S. L. Spain) paruošiama darbui: nustatomi parametrai – įtampa 18 kV, atstumas nuo adatos iki kolektoriaus 18 cm, srautas 4 ml/val, kolektoriaus apsisukimų skaičius per minutę 1650 aps./min. Tirpalo pripildytas 20 ml švirkštas įdedamas į švirkšto pompą. Elektros potencialas pritaikytas metalinei adatai aukštos įtampos maitinimo šaltiniu. Pluoštai buvo surinkti ant cilindrinio kolektoriaus (skersmuo 5 mm). Visi eksperimentai buvo atlikti kambario temperatūroje (18–25°C), o santykinė oro drėgmė buvo 40–50% uždaroje kameroje. Spinbox „WinPumpTerm“ programoje nustatomi infuzijos parametrai, tokie kaip švirkšto diametras (ml); infuzijos greitis (ml/val); tikslinis tūris (ml). Cilindrinio kolektoriaus nuotrauka parodyta 3 pav.

Pagamintų cilindro formos bandinių tempimo bandymas atliekamas naudojant „Mecmesin MultiTest 2.5-i“ įrangą. Bandinio tempimo greitis nustatomas pagal standarto BS EN ISO 7198: 2016 „Širdies ir kraujagyslių implantai ir ekstrakorporalinės sistemos“ rekomendacijas, atsižvelgiant į bandinio ilgį ir plotį. Šio tyrimo metu nanopluošto bandinių matmenys yra 5 cm ilgio ir 0,4±0,2 mm storio. Pagal standartą, tokiam bandiniui tempti rekomenduojamas 10 mm/min greitis ir mažiau nei 5 N trūkimo apkrova. Gautų pluoštų bandinių ilgis, plotis ir storis išmatuojami mikrometru, kurio tikslumas 0,01 mm.

Hidrofiliškumui įvertinti stebimas PCL/kolageno nanopluoštų kontaktinis kampas (Sukchanta A. et al., 2021). Kvadratiniai 2×2 cm PCL/kolageno bandiniai dedami ant stiklinio indo ir ant jų lašinamas vanduo. Kontaktinis kampas tarp vandens ir paviršiaus matuojamas naudojant *ImageJ* analizės programinę įrangą.

PCL/kolageno bandinių porėtumas buvo įvertintas naudojant skysčio išsiskverbimo metodą (O'Connor R.A. et al., 2021). Šiuo metodu pirmiausia buvo išmatuotas 20 mm ilgio bandinių sausasis svoris. Po to bandiniai buvo panardinami į 98.8 % etanolį 24 valandoms maišant tam, kad užtikrinti visišką drėkinimą. Vėliau jie buvo išimti iš etanolio ir nusausti, kad pašalinti skysčių perteklių. Išmatuojamas šlapių bandinių svoris ir apskaičiuojamas porėtumas ( $\epsilon$ ) pagal šias formules:

$$V_{PCL/kolagenas} = \frac{m_s}{\rho}, \quad (1)$$

čia  $m_s$  – sausų bandinių svoris, g;  $\rho$  – PCL/kolagenas bandinių tankis, 0.72 g/cm<sup>3</sup>;  $V_{PCL/kolagenas}$  – PCL/kolageno tūris.



$$V_{EtOH} = \frac{m_{sl} - m_s}{\rho_{EtOH}}, \quad (2)$$

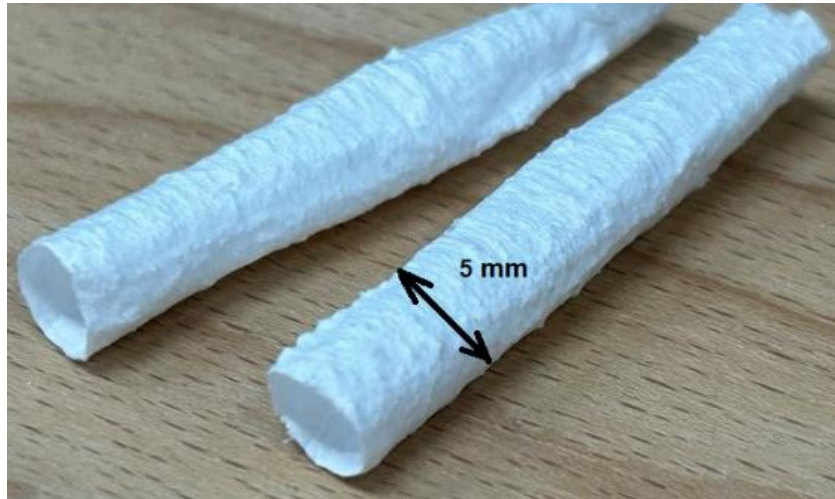
čia  $m_{sl}$  – šlapių bandinių svoris, g;  $\rho_{EtOH}$  – etanolio tankis, 0,789 g/cm<sup>3</sup>;  $V_{EtOH}$  – etanolio tūris, išstrigęs bandinio porose.

Porėtumas vertinamas pagal formulę:

$$\varepsilon = \frac{V_{EtOH}}{V_{PCL/kolagenas} - V_{EtOH}} \times 100\%. \quad (3)$$

### Rezultatai

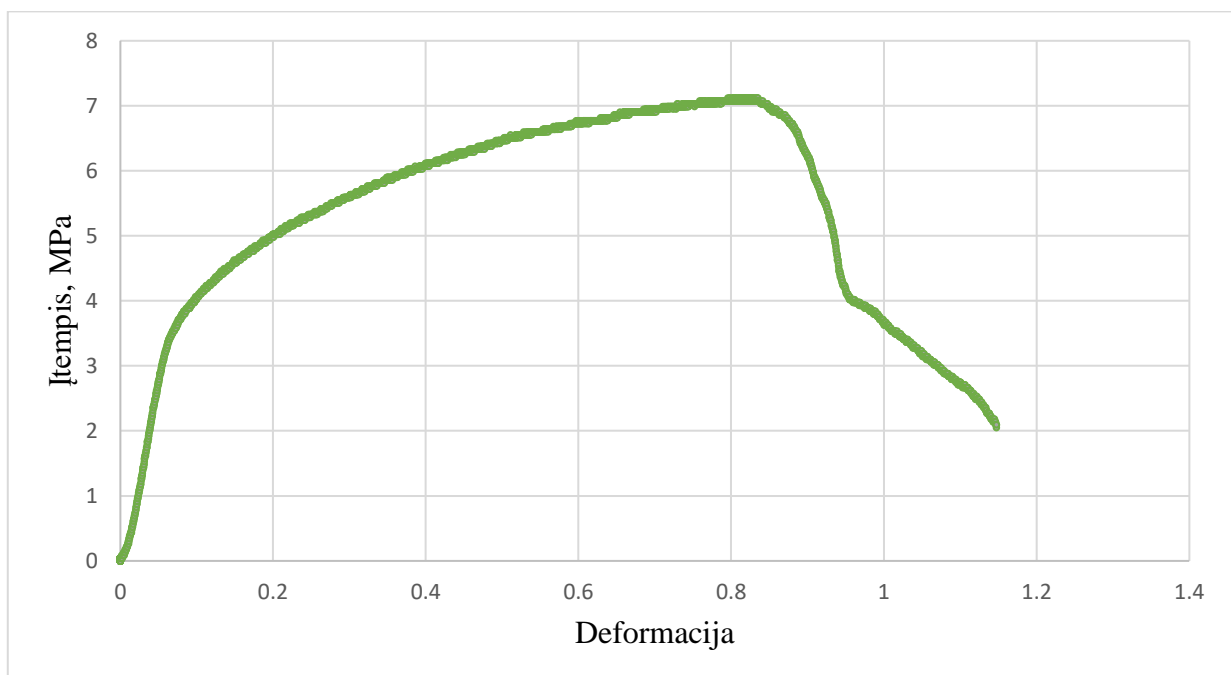
Pagamintos 15 cm ilgio, 0,4 mm storio dirbtinės kraujagyslės iš PCL/kolageno parodytos 5 pav.



**5 pav.** Pagamintos dirbtinės kraujagyslės

*Šaltinis: sudaryta autorių*

Atlikus vienašį tempimo bandymą su „Macmesin MultiTest 2.5-i“ mechaninių parametrų testavimo stendu, buvo gautos pradinės kreivės, rodančios priklausomybę tarp bandinį veikiančios apkrovos ir bandinio poslinkio. Rezultatams įvertinti, gauti poslinkio ir apkrovos duomenų masyvai perskaičiuoti į įtempių  $\sigma$  ir santykinės deformacijos  $\varepsilon$  reikšmes, iš kurių sudarytos įtempių-deformacijos kreivės (6 pav.).



**6 pav.** Įtempių-deformacijos priklausomybė

*Šaltinis: sudaryta autorių*

Mechaniniai bandymai parodė, kad PCL/kolageno bandinių tempimo stiprumo riba 15,8 MPa, tamprumo modulis 69,6 MPa. Remiantis skirtingais literatūros šaltiniais natūralių žmogaus kraujagyslių tamprumo modulis gali būti nuo 4 iki 130 MPa ir aukso standarto kraujagyslės arterijų šuntavimui, didžiosios poodinės venos tempimo stiprumo riba yra 13 MPa (Nasser et al. 2018). Elektrinių verpimu gautų bandinių vertės yra panašios į šių biologinių audinių ir tikimasi, kad jie turės tinkamą atsparumą apkrovai kai bus implantuojamos.

Pagrindinis rodiklis, naudojamas klasifikuojant, ar skysčio drėkinimasis yra hidrofilinis ar hidrofobinis, yra kontakto kampo matavimas. Paviršiaus sąlyčio kampas yra kampas, susidarantis skysčio-kietosios medžiagos riboje. Atsižvelgiant į vandens lašelių sąlyčio kampą, medžiaga klasifikuojama kaip: hidrofilinė ( $\theta_e < 90^\circ$ ), hidrofobinė ( $90^\circ < \theta_e < 150^\circ$ ) arba superhidrofobinė ( $\theta_e > 150^\circ$ ). Kuo didesnis kontaktinis kampas, tuo medžiaga tampa hidrofobiškesnė. PCL/kolageno bandinių kontakto kampo matavimas parodytas 7 pav.



**7 pav.** PCL/kolageno bandinio kontakto kampas  
*Šaltinis: sudaryta autorių*

Gautas kontakto kampas yra  $110^\circ$ . Kontakto kampas yra didesnis nei  $90^\circ$ , nes bandiniai nesudrėksta ir turi hidrofobinių savybių. Tai reiškia, kad PCL/kolageno transplantato paviršių reikia modifikuoti pvz., apdoroti plazma, kad padidėtų drėkinimo gebėjimas. Kitas būdas pagerinti hidrofiliškumo savybes, padidinti kolageno, kuris pasižymi hidrofilinėmis savybėmis, koncentraciją tirpale.

Skysčio įsiskverbimo metodu atlikti bandinių porėtumo matavimai parodė, kad PCL/kolageno dirbtinių kraujagyslių porėtumas yra apie 80 %. Tai tinkamas porėtumas ląstelių proliferacijai ir migracijai, reikalingai audinių vaskuliarizacijai ir naujų audinių formavimuisi.

### **Išvados**

1. Elektrinio verpimo metodu pagamintų PCL/kolageno dirbtinių kraujagyslių tempimo stiprumo riba 15,8 MPa, tamprumo modulis 69,6 MPa. Tyrimo rezultatai parodė, kad elektrinio verpimo būdu pagamintų PCL/kolageno dirbtinių kraujagyslių mechaninės savybės yra artimos natūralių kraujagyslių mechaninėms savybėms.

2. Gautas tinkamas dirbtinių kraujagyslių porėtumo procentas (80%) užtikrina gerą pusiausvyrą tarp mechaninio stiprumo, biologinio suderinamumo ir skysčių pralaidumo;

3. Dėl geresnio suderinamumo su ląstelėmis, geresnės maistinių medžiagų apykaitos dirbtinės kraujagyslės paviršius turėtų būti hidrofilinis, bet rezultate gavosi hidrofobinis, todėl PCL/kolageno bandinių paviršių reikia modifikuoti pvz., apdoroti plazma, kad padidėtų drėkinimo gebėjimas arba padidinti kolageno, kuris pasižymi hidrofilinėmis savybėmis.

### **Literatūra**

1. Rim N. G., Shin C.S., Shin, H. Current Approaches to Electrospun Nanofibers for Tissue Engineering, *Biomedical Materials*, 2013. 8(1): 1–14.
2. Reneker D. H., Yarin A. L. Electrospinning jets and polymer nanofibers. *Polymer*. 2008, 49:2387–2425. doi: 10.1016/j.polymer.2008.02.002
3. O'Connor R.A, Cahill P.A., McGuinness G.B. Effect of electrospinning parameters on the mechanical and morphological characteristics of small diameter PCL tissue engineered blood vessel scaffolds having distinct micro and nano fiber populations – A DOE approach. *Polymer Testing* 96 (2021) 107119, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107119>

4. Leal B.B.J., Wakabayashi N., Oyama K., Kamiya H. Daikelly I., Braghioroli D. I. and Pranke P. Vascular Tissue Engineering: Polymers and Methodologies for Small Caliber Vascular Grafts. *Front. Cardiovasc. Med.*, 11 January 2021 Sec. Cardiovascular Biologies and Regenerative Medicine. Volume 7, 2020 <https://doi.org/10.3389/fcvm.2020.592361>
5. Sukchanta A., Kummanee P., and W Nuansing W. Development and study on mechanical properties of small diameter artificial blood vessel by using electrospinning and 3D printing. 2021 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2145 012037, 1-5
6. Rickel Alex P., Xiajun Deng, Engebretson Daniel, Zhongkui Hong. Electrospun nanofiber scaffold for vascular tissue engineering. *Mater Sci Eng C Mater Biol Appl.* 2021 October; 129: 112373. doi:10.1016/j.msec.2021.112373.
7. Nasser K. Awad, Haitao Niu, Usman Ali, Yosry S. Morsi and Tong Lin. Electrospun Fibrous Scaffolds for Small-Diameter Blood Vessels: A Review. *Membranes* 2018, 8, 15; doi:10.3390/membranes8010015
8. Rahmati M., Mills D. K., Urbanska A. M, Saeb M., R, Reddy J., Ramakrishna V. S., Mozafari M. Electrospinning for tissue engineering applications. *Progress in Materials Science*, Vol 117, 2021, 100721
9. Arezo Azari, Ali Golchin, Maryam Mahmoodinia Maymand, Fatemeh Mansouri, Abdolreza Ardeshtyrajimi. Electrospun Polycaprolactone Nanofibers: Current Research and Applications in Biomedical Application. *Adv Pharm Bull*, 2022, 12(4), 658-672 doi: 10.34172/apb.2022.070 <https://apb.tbzmed.ac.ir>
10. Mei-Xian Li, Qian-Qi Wei, Hui-Lin Mo, Yu Ren, Wei Zhang, Huan-Jun Lu and Yoon Ki Joung. Challenges and advances in materials and fabrication technologies of small-diameter vascular grafts. *Biomaterials Research*, 2023 27:58 <https://doi.org/10.1186/s40824-023-00399-2>

## STUDY OF PROPERTIES OF ARTIFICIAL BLOOD VESSELS

### Summary

Cardiovascular disease (CVD) is one of the leading causes of death worldwide. In recent years, regenerative medicine, tissue engineering, and new material development have become the focus of the field, and electrospinning technology to prepare nanofibrous materials for cardiovascular treatment has attracted attention. The aim of this work is to produce artificial blood vessels from polycaprolactone (PCL) and collagen by electrospinning method and to analyze their mechanical, porosity and hydrophilic properties. The research results showed that the mechanical properties of electrospun PCL/collagen artificial blood vessels are close to the mechanical properties of natural blood vessels. The resulting appropriate percentage of porosity (80%) ensures a good balance between mechanical strength, biocompatibility and fluid permeability. The produced samples have hydrophobic properties.

**Key words:** electrospinning, artificial blood vessel, porosity, hydrophilicity

### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Radvilė Jankauskytė

**Mokslo laipsnis ir vardas:** magistras

**Darbo vieta ir pozicija:**

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** medžiagos medicinoje, inžinerinių tyrimų metodologija, bioinžinerija

**Telefonas ir el. pašto adresas:** +370 671028916, [radvile.jankauskyte@stud.vilniustech.lt](mailto:radvile.jankauskyte@stud.vilniustech.lt)

**Autoriaus vardas, pavardė:** Andžela Šešok.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** daktaras, docentas

**Darbo vieta ir pozicija:** Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Mechanikos fakulteto Biomechanikos inžinerijos katedros docentė.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** gamybos technologijos, medžiagos medicinoje, inžinerinių tyrimų metodologija.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 614 82835, [andzela.sesok@vilniustech.lt](mailto:andzela.sesok@vilniustech.lt)

**Autoriaus vardas, pavardė:** Dovydas Cicėnas

**Mokslo laipsnis ir vardas:** magistras

**Darbo vieta ir pozicija:** Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Mechanikos fakulteto Biomechanikos inžinerijos katedros doktorantas

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** gamybos technologijos, medžiagos medicinoje, inžinerinių tyrimų metodologija.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 690 38025 [dovydas.cicenas@vilniustech.lt](mailto:dovydas.cicenas@vilniustech.lt)

# SLIEKINĖS PAVAROS GEOMETRINIŲ PARAMETRŲ OPTIMIZAVIMAS TAIKANT ATKAITINIMO MODELIAVIMO ALGORITMĄ

Ilja Guščin, Vadim Mokšin  
Vilnius tech

## Anotacija

Straipsnyje atliekama sliekinės pavaros geometrinių parametrų optimizacija siekiant sumažinti bendrąjį pavaros tūrį. Nagrinėjami šie projektiniai kintamieji: modulis, perdavimo santykis, sliekračio plotis, slieko ir sliekračio dalijamasis skersmuo. Taip pat taikomi tokie apribojimai: sliekračio plotis, savistabda, krumplių atsparumas lenkimui ir dilimui, šiluminė talpa, tarpašinis atstumas, slieko pašaknų ir dalijamasis skersmuo, sliekračio standumas. Sliekinės pavaros optimizavimui naudojamas atkaitinimo modeliavimo optimizavimo algoritmas ir MATLAB programinė įranga. Atlikus optimizaciją, pavaros tūris sumažėjo 46,3% lyginant su pradiniu tūriu.

**Reikšminiai žodžiai:** atkaitinimo modeliavimo algoritmas, optimizacija, sliekas, sliekrais, sliekinė pavana.

## Įvadas

Sliekinių pavarų istorija siekia daugiau kaip 2000 metų. Senovės Egipte, Nilo pakrantėse, derlingoms žemėms drėkinti buvo naudojami drėkinimo įrenginiai, kuriuos sudarė medinė pavara ir ratas su daugybe kibirų. Šį įrenginį varė bulius. Vanduo buvo pakeliamas į aukštesnį lygį ir kanalais tiekiamas vartotojams. Tobulėjant technologijoms, sliekinės pavaros buvo pradėtos plačiai naudoti įvairiose pramonės šakose, įskaitant automobilių pramonę, staklių, elektros energijos gamybą ir kt. Jos pasižymi dideliu tikslumu, sklandžiu veikimu, mažu triukšmo lygiu ir dideliu perdavimo santykiu. Tačiau dėl didelio slieko ir sliekračio dantų kontakto ploto ir slydimo greičio dantys smarkiai dėvisi ir išsiskiria daug šilumos. Todėl svarbu yra optimizuoti sliekinės pavaras.

Optimizuojant sliekinių pavarų parametrus, tokius kaip modulis, perdavimo koeficientas, sliekračio plotis, slieko ir sliekračio dalijamasis skersmuo, galima sumažinti pavaros tūrį. Sumažinus tūrį, sumažės medžiagų ir gamybos sąnaudos, o tai padidins gamybos ekonominį efektyvumą. Taip pat sumažinus sliekinės pavaros tūrį pavyks sukurti kompaktišką ir lengvą mechanizmą. Tai ypač svarbu tais atvejais, kai ribojama erdvė arba sistemos svoris, pavyzdžiui, automobilių ar kosmoso pramonėje. Dėl mažesnio tūrio sliekinės pavaras galima lengviau integruoti į sistemą. Be to, dėl mažesnio tūrio sumažėja trintis ir energijos nuostoliai, todėl mechanizmas tampa efektyvesnis. Dėl viso to sliekinių pavarų optimizavimas yra aktualus ir svarbus uždavinys šiuolaikinėse mašinose ir pramonėje.

Godwin Raja Ebenezer et al. (2017) sumažino sliekinės pavaros tūrį naudodami gamtos įkvėptus optimizavimo algoritmus, t. y., atkaitinimo modeliavimo (angl. *Simulated Annealing* (SA)), jonvabalių algoritmą (angl. *Firefly Algorithm* (FA)), gegutės algoritmą (angl. *Cuckoo Search* (CS)), MATLAB Fmincon ir genetinį algoritmą (angl. *Genetic Algorithm* (GA)). Darbe taikyti šie apribojimai: krumplių stiprumo, atsparumo dilimui, šiluminės talpos, dinaminės apkrovos, savaiminio stabdymo ir pločio. Be to, atsižvelgiama ir į kitus apribojimus, tokius kaip didžiausios galios perdavimas, tarpašinis atstumas, sliekų deformacija ir slieko sijos stiprumas. Tyrimas buvo atliktas naudojant Matlab programinę įrangą.

Tyrimas parodė, kad taikant SA, CS ir Fmincon algoritmus optimalus slieko dalijamasis skersmuo yra vienodas (250 mm). Taikant FA ir GA algoritmus – 249,253 ir 242,397 mm. Visų algoritmų (išskyrus GA) optimalus sliekračio dalijamasis skersmuo yra 1000 mm.

Straipsnyje (Rai, Barman, 2019) nagrinėjama sliekinės pavaros galios praradimo problema. Dėl didelės trinties tarp krumplių darbo metu pavaroje prarandama galia, o tai mažina sliekinių pavarų dėžių efektyvumą. Siekiant sumažinti galios nuostolius, buvo naudojamas atkaitinimo modeliavimo (SA) algoritmas. Algoritmo efektyvumas ir našumas buvo analizuojamas lyginant optimizavimo rezultatus su rezultatais gautais naudojant kitus optimizavimo algoritmus, pavyzdžiui, genetinį algoritmą (GA), diferencialinę evoliuciją (DE), dalelių spiečiaus optimizavimą (PSO) ir kt. Optimizavimo uždavinyje nagrinėjami šie projektavimo kintamieji: dantų skaičius, vijos kilimo kampas ir trinties koeficientas, o projektavimo apribojimai – lenkimo įtempiai, kontaktiniai įtempiai ir slieko linijinė deformacija. Algoritmas atliktas 10 kartų siekiant patikrinti SA konvergavimą. Rezultatai, gauti naudojant SA algoritmą buvo palyginami su ankstesniuose darbuose paskelbtais rezultatais gautais DE, PSO, GA ir analitiniu metodu. Gauta sliekinės pavaros galios nuostolių vertė yra 0,2988 kW, kuri yra mažesnė, palyginti su galios nuostoliais gautais taikant kitus algoritmus. Optimalus sprendinys, gautas naudojant SA algoritmą, konverguoja po 16-osios iteracijos. Naudojant SA algoritmą, gautas dantų skaičius nesikeičia, tačiau, palyginti su kitais optimizavimo metodais, kilimo kampo vertė yra didesnė. Gautas optimalus sliekinės pavaros modelis yra pranašesnis palyginti su gautais taikant anksčiau naudotus optimizavimo metodus. Įrodyta, kad sliekinės pavaros SA optimizavimo algoritmas yra veiksmingas, nes leidžia išvengti ankstyvo suartėjimo su vietiniais minimumais. Tai rodo, kad algoritmas gerai

veikia sprendžiant pavarų projektavimo problemas. Trinties koeficiento vertė yra mažesnė, palyginti su kitais anksčiau taikytais optimizavimo metodais (DE, PSO ir GA). Galios nuostolių sumažėjimas naudojant SA svyruoja nuo 78,02 iki 22,98%. Optimizuota pavara yra ilgaamžiškesnė.

Norint taikyti SA metodą sliekinių pavarų tūrio optimizavimui, reikia suformuluoti tikslinę funkciją, kuri gali apimti tokius kriterijus, kaip perdavimo santykio didinimas, galios nuostolių arba triukšmo ir vibracijos mažinimas.

Wang et al. (2020) naudodami MATLAB optimizavimo įrankių rinkinį sumažino sliekinės pavaros tūrį. Projektavimo kintamieji: krumplių skaičius, modulis bei slieko ir sliekračio skersmenys. Naudoti tokie apribojimai: krumplių atsparumas lenkimui, kontaktiniai įtempiai, sliekračio standumas, slieko pradžių skaičius, modulis ir slieko skersmens koeficientas. Rezultatai parodė, kad optimizuotos pavaros tūris sumažėjo beveik 50%, palyginti su pradinės konstrukcijos sliekinės pavaros tūriu, o tai visiškai įrodo optimizacijos procedūros naudą ir vertę.

Singh ir Gupta (2022) naudodami dirbtinių bičių šeimų kolonijos algoritimą (angl. *Artificial Bee Colony* (ABC)) taip pat sumažino sliekinės pavaros tūrį. Toks algoritmas įkvėptas socialinių vabzdžių kolonijų ar kitų gyvūnų visuomenių elgesio. Naudoti šie projektavimo kintamieji: modulis, slieko dalijamasis skersmuo, sliekračio dalijamasis skersmuo, sliekinės pavaros perdavimo santykis ir krumplių plotis. Naudoti šie apribojimai: atsparumas lenkimui, dilimas, savaiminis stabdymas. Be to, buvo atsižvelgiama ir į kitus apribojimus, tokius kaip ilgaamžiškumas, slieko deformacija, tarpašinis atstumas, slieko viršūnių skersmuo ir pan. Palyginti su neoptimizuotu tūriu, po optimizacijos pavaros tūris sumažėjo maždaug 43,7%. Optimizuotos sliekinės pavaros perdavimo santykis padidėjo 8,33%, modulis padidėjo 7,667%, slieko dalijamasis skersmuo sumažėjo 21,25%, plotis sumažėjo 44,25 %, o sliekračio dalijamasis skersmuo sumažėjo 11,111%.

Straipsnio (Yokota et al., 1998) autoriai suformulavo optimalaus krumpliaračių svorio nustatymo uždavinį kaip netiesinio programavimo uždavinį kai ribojamas krumplio lenkimo stipris, velenų susisukimo stipris ir kiekvieno krumpliaračio matmuo bei išsprendė jį naudodami patobulintą genetinį algoritimą (GA). Tačiau tam tikri apribojimai nebuvo tenkinami ir gautas sprendimas nebuvo optimalus. Autoriams pavyko sumažinti svorį 48,8%, o paviršiaus plotą – 33,6%.

Straipsnio (Savani et al., 2010) autoriai taikydami dalelių spiečiaus optimizavimą (PSO) ir atkaitinimo modeliavimą (SA), sumažino cilindrinį krumpliaračių svorį. Buvo naudojami tokie optimizavimo kintamieji: krumplių plotis, abiejų krumpliaračių skersmuo, varančiojo krumpliaračio dantų skaičius ir modulis. Naudoti tokie apribojimai: atsparumas lenkimui, nuovargiui, susikabinimo trukdžiai, tolygus apkrovos pasiskirstymas, krumpliaračių velenų atsparumas sukimui, tarpašinis atstumas ir pan. Iš pateiktų rezultatų matyti, kad PSO ir SA algoritmai, palyginti su Yokota (Yokota et al., 1998) pateiktais rezultatais gautais naudojant GA algoritimą (kai modulis  $m = 2,75$  mm), svorį sumažino 11,9%. Tokiu būdu nustatyta, kad SA ir PSO algoritmų taikymo rezultatai yra geresni už gautus naudojant GA algoritimą ir konverguoja prie optimalaus sprendinio per mažesnę iteracijų skaičių.

Straipsnio (Mogal, Wakchaure, 2013) autoriai bandė optimizuoti sliekinę pavarą naudodami genetinį algoritimą siekiant sumažinti pavaros tūrį. Naudoti šie optimizavimo kintamieji: slieko dalijamasis skersmuo, sliekračio dalijamasis skersmuo, sliekinės pavaros perdavimo santykis ir sliekračio plotis. Taikyti tokie apribojimai: tarpašinis atstumas, slieko deformacija ir sliekračio danties lenkimo stipris. Rezultatai parodė, kad slieko ir sliekračio tūris sumažėjo 17,91%, o tarpašinis atstumas sumažėjo 20,34%.

Autorius Antal Tiberiu Alexandru (2010) atliko eksperimentus su įvairiais sliekinių pavarų modeliais, keisdamas jų geometrinius parametrus. Tyrimo metu autorius nustatė, kad egzistuoja tam tikras optimalių geometrinių parametru verčių rinkinys, kuriam esant pasiekiamas geriausias sliekinių pavarų efektyvumas.

Straipsnyje (Zolfaghari et al., 2017) buvo taikomi du optimizavimo algoritmai – atkaitinimo modeliavimo algoritmas (SA) ir genetinis algoritmas (GA), siekiant sumažinti tiesiakrumplių kūginių krumpliaračių poros tūrį. Buvo naudojami šie projektavimo kintamieji: dantų skaičius, modulis ir plotis. Autoriams pavyko sumažinti pavaros tūrį iki 23,15%.

SA metodas yra gerai žinomas optimizavimo metodas, tačiau jo taikymas sliekinių pavarų projektavimui ir optimizavimui nėra labai paplitęs.

### **Atkaitinimo modeliavimo (SA) algoritmo parametrai**

SA metodas – tai stochastinis optimizavimo metodas, kuriame naudojama analogija su fizikiniu metalų terminio apdorojimo procesu, vadinamu atkaitinimu. Atkaitinimo metu metalas įkaitinamas iki aukštos temperatūros, išlaikomas joje ir palaipsniui atšaldomas. Dėl šio proceso pagerėja metalo struktūra ir sumažėja jo vidiniai įtempiai. Algoritme vietoj metalo optimizuojama tam tikrą energiją turinti funkcija. Paklaidos funkcija, kurią norime minimizuoti, atlieka sistemos energijos vaidmenį. Kintamuosius, kuriuos optimizuojame, galima laikyti sistemos būsenomis. Pradinę sistemos būseną nusako pradinės kintamųjų

reikšmės, o tikslas – rasti tokias kintamųjų reikšmes, kurios minimizuotų paklaidos funkciją. SA algoritmas randa optimalias vertes tirdamas dabartinio sprendinio apylinkes ir ieškodamas geriausio sprendinio. Kiekviename žingsnyje SA keičia dabartinį sprendinį pasirinkdamas atsitiktinę kryptį ir atstumą, kuriuo judama į naują tašką. Naujajį sprendinį galima priimti net jei jis pablogina tikslinės funkcijos reikšmę, su tikimybe, kuri mažėja mažėjant temperatūrai. Tai leidžia algoritmui išvengti vietinių minimumų ir palaipsniui artėti prie optimalaus sprendinio.

Sliekinės pavaros tūrio mažinimas optimizuojant sliekinę pavarą vyksta ieškant geriausių pavaros parametrų, kurie gali sumažinti galios nuostolius ir trintį sistemoje. Kai SA algoritmas nustato optimalias parametrų vertes, tai gali padėti sumažinti tūrį, nes galima naudoti efektyvesnę pavarų konstrukciją kuriai reikia mažiau medžiagų. SA naudoja stochastinės paieškos procesą, kuris prasideda nuo tam tikro pradinio taško ir po to ieško vietinio optimumo atsitiktinai keisdamas parametrus per kelias iteracijas. Vykstant optimizavimo procesui, SA naudoja „temperatūros“ sąvoką, kuri yra sistemos energijos rodiklis. Esant aukštesnei temperatūrai, algoritmas gali priimti sprendimus, kurie nemažina kokybės funkcijos, o esant žemesnei temperatūrai jis pasirenka tik tuos sprendimus, kurie mažina kokybės funkciją. Algoritmo veikimo pradžioje temperatūra yra aukšta, todėl algoritmas gali priimti didelius sistemos parametrų pokyčius. Algoritmui toliau progresuojant, temperatūra mažėja, todėl atsitiktiniai pokyčiai tampa mažesni. Tai leidžia algoritmui sutelkti dėmesį į tam tikras parametrų erdvės sritis pasižyminčias didesniu efektyvumu. Proceso pabaigoje SA konverguoja prie optimalių parametrų reikšmių, kurios minimizuoja kokybės funkcionalumą. Tai darydamas algoritmas išsaugo geriausias parametrų vertes kiekvienoje iteracijoje, todėl galima stebėti optimizavimo procesą ir analizuoti rezultatus.

Pagrindiniai SA metodo parametrai optimizuojant sliekinę pavarą:

- Aušinimo funkcija (angl. *Annealing Schedule*) – tai funkcija, kuri nustato temperatūros pokytį optimizavimo metu. Paprastai temperatūra mažėja artėjant prie optimalaus sprendinio.

- Pradinė temperatūra (angl. *Initial Temperature,  $T_{init}$* ) – tai pradinė temperatūros reikšmė, nuo kurios priklauso tikimybė priimti „blogiausią“ sprendimą. Kuo didesnė pradinė temperatūra, tuo didesnė tikimybė, kad bus priimtas „blogiausias“ sprendimas.

- Galutinė temperatūra (angl. *Final Temperature,  $T_{min}$* ) – tai galutinė temperatūra, kurioje baigiamas optimizavimas.

- Iteracijų skaičius (angl. *MaxIterations,  $max\_accept$* ) – tai didžiausias iteracijų, kurios atliekamos optimizavimo metu, skaičius. Matematikoje iteracija – tai proceso ar algoritmo kartojimas ir rezultatų panaudojimas naujiems rezultatams gauti. Tai reiškia, kad iteracija yra procesas, kai kartojamas tas pats veiksmas arba veiksmų rinkinys tol, kol pasiekiamas norima sąlyga arba pakankamas tikslumas. Optimizavimo kontekste iteracija paprastai reiškia optimizavimo algoritmo kartojimą, kiekviename žingsnyje nustatant naujas kintamųjų vertes, kol randamas optimalus sprendimas. Iteracijų skaičius priklauso nuo optimizavimo algoritmo.

- Vertinimo funkcijų skaičius (angl. *MaxFunctionEvaluations,  $max\_run$* ) – tai didžiausias funkcijų, kurias galima apskaičiuoti optimizavimo metu, skaičius.

- Apribojimų funkcija (angl. *Constraint Function*) – tai funkcija, kuri nustato optimizavimo apribojimus.

- Pradinės reikšmės (angl. *Initial Values*) – tai pradinės optimizuojamų kintamųjų reikšmės.

- Tikslas funkcija (angl. *Objective Function,  $F_{min}$* ) yra optimizuojama funkcija.

- Sustabdymo kriterijus (angl. *Stopping Criterion*) yra sąlyga, apibrėžianti, kada optimizavimas turėtų baigtis. Pavyzdžiui, kai pasiekiamas tam tikras iteracijų skaičius arba kai tikslo funkcijos reikšmė stabilizuojasi.

- Pakartotinio atjungimo intervalas (angl. *Reanneal Interval,  $initial\_search$* ). Parametras *Reanneal Interval* apibrėžia iteracijų, kurios bus atliekamos tarp dviejų iš eilės atnaujinimų (atkaitinimo) SA optimizavimo proceso metu, skaičių. Perkaitinimas įvyksta, kai optimizavimo proceso metu sistemos temperatūra sumažėja ir pereinama į naują būseną. Tačiau kartais sistema gali įstrigti vietiniame minimume ir optimizavimas gali sustoti. Kad taip nenutiktų, SA algoritmas periodiškai padidina temperatūrą, kad algoritmas turėtų galimybę išeiti iš vietinio minimumo. *Reanneal Interval* reikšmė nustato, kaip dažnai optimizavimo proceso metu įvyksta perkaitinimas. Jei *Reanneal Interval* reikšmė yra didelė, perkaitinimas vyksta rečiau ir optimizavimas užtrunka ilgiau. Jei *Reanneal Interval* reikšmė maža, perkaitinimas įvyksta dažniau, o tai gali padėti sistemai išeiti iš vietinių ekstremumų.

Programai parašyti naudojama MATLAB programinė įranga. Naudojami tokie SA algoritmo parametrai:  $T_{init} = 1,0$ ;  $T_{min} = 1e-10$ ;  $F_{min} = -1e+100$ ;  $max\_run = 150$ ;  $max\_accept = 600$ ;  $initial\_search = 500$ .

Sliekinė pvara suprojektuota remiantis Vaičiulio (2009) metodika.



Svarbiausia pasiekti, kad sliekinės pavaros konstrukcija būtų kompaktiška, t. y., kad ji būtų kuo mažesnio tūrio. Pagrindinė šio darbo tikslo funkcija – slieko ir sliekračio tūrio priklausomybės nuo jų parametrų funkcija. Pagrindinė problema formuluojant tūrio lygtį yra ta, kad sliekratis nėra vientisas. Medžiagos savybės laikomos pastoviomis šiame uždavinyje. Sujungus sliekų ir sliekračio tūrį, tikslo funkcija formuluojama taip (Singh, Gupta, 2022):

$$V(i, b, D_1, D_2, m) = V, \quad (1)$$

$$V = \frac{\pi}{4} D_2^2 b \left[ \left( 1 + \frac{3}{i} \right)^2 - \left( \left( 1 - \frac{4,4}{i} \right)^2 \right)^2 \right] + \frac{\pi^2}{4} m (4,5 + 0,02iz_1) \left[ (D_1 + 2m)^2 - (D_1 - 4,4m)^2 \right], \quad (2)$$

čia  $V$  – pavaros tūris,  $i$  – perdavimo santykis,  $b$  – sliekračio plotis,  $m$  – modulis,  $D_1$  – slieko dalijamasis skersmuo,  $D_2$  – sliekračio dalijamasis skersmuo,  $z_1$  – slieko pradžių skaičius.

1 lentelėje pateikti kintamųjų intervalai.

1 lentelė

### Optimizavimo kintamųjų intervalai

Kintamasis	Reikšmių intervalas
Perdavimo santykis $i$	10–25
Sliekračio plotis $b$ , mm	20–40
Slieko dalijamasis skersmuo $D_1$ , mm	30–70
Sliekračio dalijamasis skersmuo $D_2$ , mm	100–180
Modulis $m$ , mm	2–15

Šaltinis: sudaryta autorių

Optimizavimo uždaviniui išspręsti buvo taikomi tokie apribojimai: sliekračio pločio apribojimas, savistaba, stiprumas ir atsparumas dilimui (Bukingemo dilimo lygtis), šiluminė talpa, tarpašinis atstumas, slieko pašaknų ir dalijamasis skersmuo, sliekračio standumas (įlinkis). Formulės pateiktos darbe (Singh, Gupta, 2022).

### Rezultatai ir jų aptarimas

Sliekinės pavaros optimizavimo SA metodu rezultatai parodo optimalias parametrų reikšmes, kurios užtikrina mažiausią pavaros tūrį. Rezultatai pateikti 2 lentelėje, kur palyginami optimizuoti parametrai su pradiniais parametrais. Taip, galima matyti kad tūris sumažėjo 46,3%, tačiau perdavimo santykis padidėjo 31,25%. Sliekračio plotis sumažėjo 13,51 %, o jo dalijamasis skersmuo – 9,6 % (2 lentelė). Modulis taip pat sumažėjo 42,86 %, o slieko skersmuo sumažėjo 21,73 % (2 lentelė).

2 lentelė

### Optimizuotos sliekinės pavaros parametrų palyginimas su pradiniais

Parametras	Pradinė reikšmė	Optimizuota reikšmė
Modulis, mm	7	4
Perdavimo santykis	16	21
Sliekračio plotis, mm	29,6	25,6
Slieko dalijamasis skersmuo, mm	52	40,7
Sliekračio dalijamasis skersmuo, mm	172,8	156,2
Tūris, mm <sup>3</sup>	393943,227	211547,513

Šaltinis: sudaryta autorių

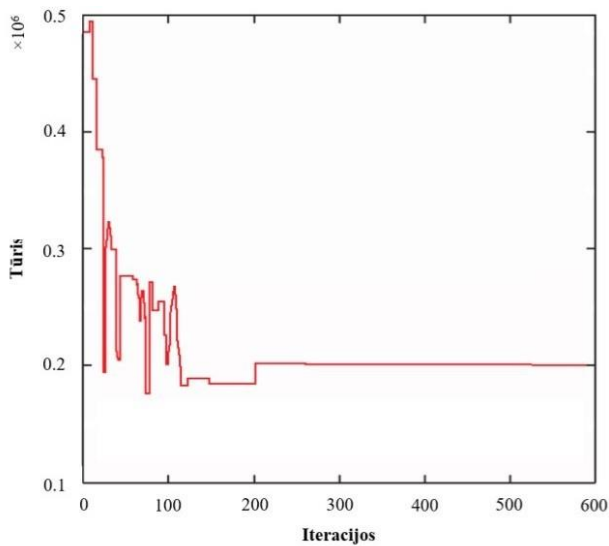
1–6 pav. pateikti grafikai, kuriuose atitinkamai pavaizduotas optimizuotas tūris, modulis, pavaros perdavimo santykis, sliekračio plotis, slieko ir sliekračio dalijamasis skersmuo.

Tūrio ir iteracijų skaičiaus grafikas (1 pav.) leidžia stebėti tūrio pokytį vykdant optimizavimo algoritmą. Šis grafikas leidžia aiškiai matyti, kaip optimizavimo algoritmas keičia tūrį, kai artėjama prie optimalaus sprendinio. Mažiausias tūris gaunamas atlikus 200 iteracijų ( $V = 211547,513 \text{ mm}^3$ ).

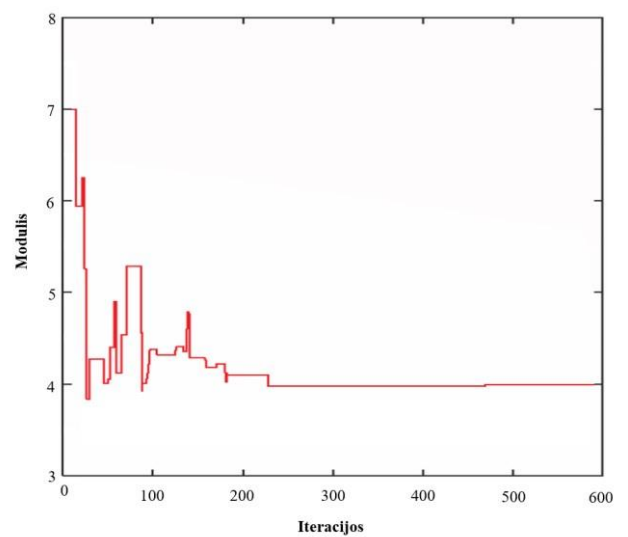
2 pav. pateiktas modulio priklausomybės nuo iteracijų grafikas. Optimizuotas modulis gaunamas atlikus 230 iteracijų. Modulį pavyko sumažinti nuo 7 iki 4.

Iš 3 pav. pateikto grafiko galima matyti perdavimo santykio priklausomybę nuo iteracijų skaičiaus. Optimizuota perdavimo santykio reikšmė gaunama atlikus 270 iteracijų ( $i = 21$ ). Perdavimo santykis padidėjo nuo 16 iki 21 (2 lentelė).

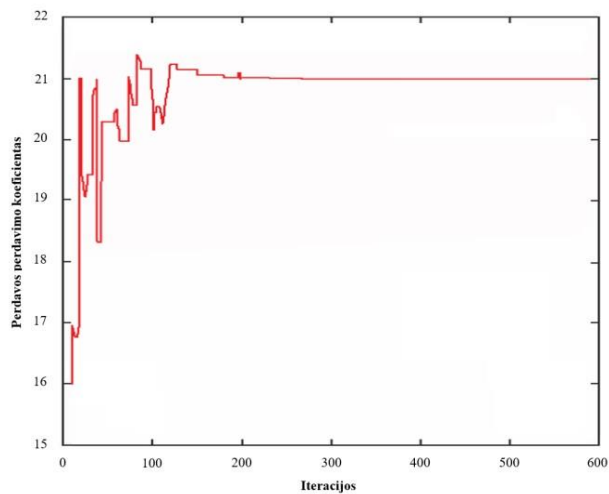
4 pav. pavaizduotas sliekračio pločio priklausomybės nuo iteracijų skaičiaus grafikas. Iš grafiko matyti, kad optimalus sliekračio plotis pasiekiamas po 260 iteracijų ( $b = 25,6 \text{ mm}$ ). Sliekračio plotis tokiu būdu sumažėjo nuo 29,6 iki 25,6 (2 lentelė).



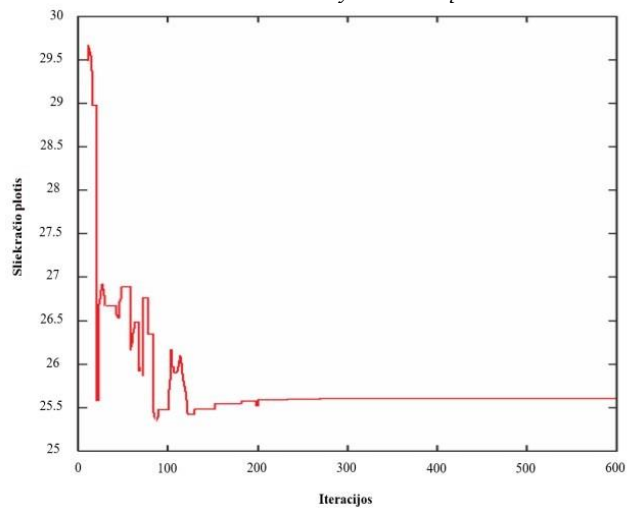
**1 pav.** Sliekinės pavaros tūrio priklausomybės nuo iteracijų grafikas  
Šaltinis: sudaryta autorių



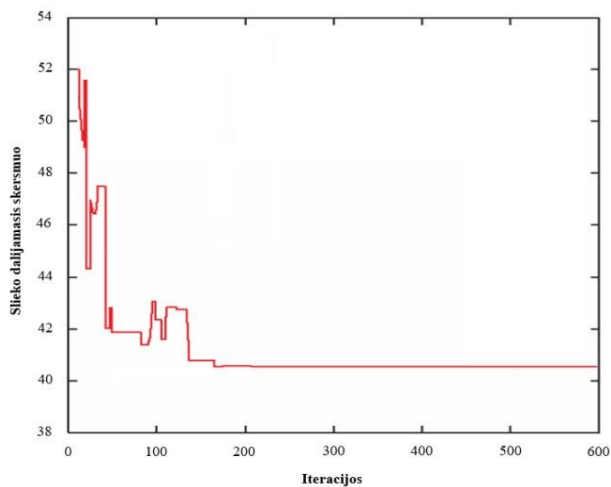
**2 pav.** Sliekinės pavaros modulio priklausomybės nuo iteracijų grafikas  
Šaltinis: sudaryta autorių



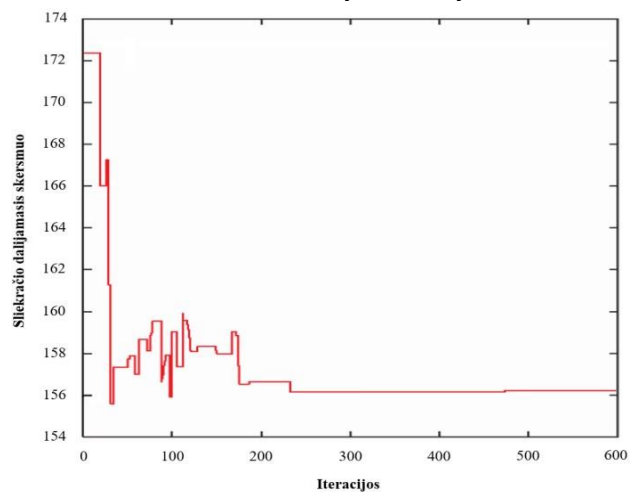
**3 pav.** Sliekinės pavaros perdavimo santykio priklausomybės nuo iteracijų grafikas  
Šaltinis: sudaryta autorių



**4 pav.** Sliekračio pločio priklausomybės nuo iteracijų grafikas  
Šaltinis: sudaryta autorių



**5 pav.** Slieko dalijamojo skersmens priklausomybės nuo iteracijų grafikas  
Šaltinis: sudaryta autorių



**6 pav.** Sliekračio dalijamojo skersmens priklausomybės nuo iteracijų grafikas  
Šaltinis: sudaryta autorių

5–6 pav. pavaizduoti slieko ir sliakračio dalijamojo skersmens priklausomybės nuo iteracijų skaičiaus grafikai. Optimalus slieko dalijamasis skersmuo gaunamas atlikus 210 iteracijų ( $d_1 = 40,7$  mm). Optimalus sliakračio dalijamasis skersmuo pasiekiamas atlikus 480 iteracijų ( $d_2 = 156,2$  mm).

### Išvados

Taikant atkaitinimo modeliavimo algoritmą pavyko optimizuoti sliakinės pavaros geometrinius parametrus ir reikšmingai sumažinti pavaros tūrį. Bendrasis pavaros tūris sumažėjo 46,3%, o perdavimo santykis padidėjo 31,25%.

Mažiausias pavaros tūris užtikrinamas atlikus 200 iteracijų. Po 210–270 iteracijų gaunamos optimizuotos modulio, perdavimo santykio, sliakračio pločio ir slieko dalijamojo skersmens reikšmės. Daugiausia iteracijų (480) reikėjo, kad rasti optimalią sliakračio dalijamojo skersmens reikšmę.

Lyginant gautus optimizacijos rezultatus su literatūroje pateiktais GA ir ABC algoritmų taikymo rezultatais, nustatyta, kad atkaitinimo modeliavimo metodas yra efektyviausias nes leidžia reikšmingiausiai sumažinti sliakinės pavaros tūrį (46,3%). Taikant GA metodą tūris sumažėjo tik 17,91%, o taikant ABC metodą – 43,7%.

### Literatūra

1. Alexandru, A.T. 2010. Worm gears with optimized main geometrical parameters and their efficiency. *Mechanika*, 81(1), 62–65.
2. Godwin Raja Ebenezer, N., Saravanan, R., Ramabalan, S., Navaneethasanthakumar, S. 2017. Worm gear drive optimization considering industry constraints based on nature inspired algorithms. *World Scientific News*, 87, 205–221.
3. Mogal, Y.K., Wakchaure, V.D. 2013. A multi-objective optimization approach for design of worm and worm wheel based on genetic algorithm. *Bonfring International Journal of Man Machine Interface*, 3(1), 8–12.
4. Rai, P., Barman, A.G. 2019. Design optimization of worm gear drive with reduced power loss. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 635, 01215.
5. Savsani, V., Rao, R.V., Vakharia, D.P. 2010. Optimal weight design of a gear train using particle swarm optimization and simulated annealing algorithms. *Mechanism and Machine Theory*, 45(3), 531–541.
6. Singh, K., Gupta, M. 2022. Worm gear drive optimization by artificial bee colony with Matlab. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 4(5), 4200–4211.
7. Wang, M., Tong, L., Pan, S., Wang, S., Qu, Y. 2020. Optimized design of worm gear and worm drive of a certain shipborne antiriot launcher based on MATLAB. *Proceedings of 2020 IEEE 3rd International Conference of Safe Production and Informatization (IICSPI)*, 28–30 November, 2020, 185–188.
8. Yokota, T., Taguchi, T., Gen, M. 1998. A solution method for optimal weight design problem of the gear using genetic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 35(3–4), 523–526.
9. Zolfaghari, A., Goharimanesh, M., Akbari, A.A. 2017. Optimum design of straight bevel gears pair using evolutionary algorithms. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 39(6), 2121–2129.
10. Vaičiulis, D. 2009. Mašinų elementų kursinis projektavimas, I dalis. Kaunas: Technologija.
11. Vaičiulis, D. 2010. Mašinų elementų kursinis projektavimas, II dalis. Kaunas: Technologija.

## OPTIMIZATION OF GEOMETRICAL PARAMETERS OF WORM GEAR DRIVE USING SIMULATED ANNEALING ALGORITHM

### Summary

In the article, the optimization of the geometrical parameters of the worm gear drive is carried out in order to reduce the total volume of the worm and worm gear. The following design variables were considered: module, gear ratio, face width, pitch circle diameters of worm and worm gear. The following constraints were also applied: face width, self-locking, bending strength and wear capacity, thermal capacity, centre distance, worm root and pitch diameter, worm gear stiffness. A simulated annealing (SA) optimization algorithm and MATLAB software were used to optimize the worm drive. After optimization, the total volume was reduced by 46.3% compared to the original volume.

**Key words:** annealing simulation algorithm, optimization, worm, worm wheel, worm gear.

### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Ilja Guščin

**Mokslo laipsnis ir vardas:** inžinerijos mokslų bakalauras

**Darbo vieta ir pozicija:** VšĮ Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Mechanikos fakulteto, Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedros magistrantas

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** mašinų ir mechanizmų teorija, optimizavimas

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 5 2744733, [ilja.guscin@stud.vilniustech.lt](mailto:ilja.guscin@stud.vilniustech.lt)

**Autoriaus vardas, pavardė:** Vadim Mokšin

**Mokslo laipsnis ir vardas:** daktaras, profesorius

**Darbo vietą ir pozicija:** VšĮ Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Mechanikos fakulteto, Mechanikos ir medžiagų inžinerijos katedros profesorius

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** tribologija, medžiagų apdirbimas pjovimu, mašinų dinamika

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 5 2744733, [vadim.moksin@vilniustech.lt](mailto:vadim.moksin@vilniustech.lt)

#### **A COVER LETTER OF AUTHORS**

**Author name, surname:** Ilja Guščin

**Science degree and name:** bachelor of engineering

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university, Faculty of mechanics, Department of mechanical and materials engineering, M. Sc. student

**Author's research interests:** theory of machines and mechanisms, optimization

**Telephone and e-mail address:** 8 5 2744733, [ilja.guscin@stud.vilniustech.lt](mailto:ilja.guscin@stud.vilniustech.lt)

**Author name, surname:** Vadim Mokšin

**Science degree and name:** Ph. D., professor

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university, Faculty of mechanics, Department of mechanical and materials engineering, professor

**Author's research interests:** tribology, metal cutting, machine dynamics

**Telephone and e-mail address:** 8 5 2744733, [vadim.moksin@vilniustech.lt](mailto:vadim.moksin@vilniustech.lt)

# SKIRTINGO HIBRIDIZACIJOS LYGIO AUTOMOBILIŲ EFEKTYVUMO TEORINIS TYRIMAS

Darius Juodvalkis, Andrius Dargužis  
Kauno technikos kolegija

## Anotacija

Klimato kaita bei aplinkos tarša šiuo metu yra viena iš aktualiausių šių laikų problemų. Siekiant sumažinti šiuos veiksnius, Europos sąjunga vykdo žaliąjį kursą, kurio tikslas yra kad iki 2050 m. grynasis šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis būtų lygus nuliui, ekonomikos augimas būtų atsietas nuo išteklių naudojimo ir nuošalyje nebūtų paliktas nė vienas žmogus ir nė viena vietovė. Europos Komisija priėmė pasiūlymų rinkinį, kuriuo siekiama ES klimato, energetikos, transporto ir mokesčių politiką pertvarkyti taip, kad būtų pasiektas tikslas iki 2030 m. grynąjį išmetamą šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekį sumažinti bent 55 proc., palyginti su 1990 m. lygiu [2]. Automobilių transportas yra vienas iš didžiausių aplinkos teršėjų. 2020 metais automobilių transporto išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų (CO<sub>2</sub>) dalis siekė 24 % nuo visų Europos sąjungos išmetamų teršalų [2]. Vienas iš būdų, sumažinti automobilių transporto išmetamų šiltnamio efektą sukeliančių dujų (CO<sub>2</sub>) kiekį, yra gaminti automobilius, kurie suvartoja mažiau degalų, kadangi nuo to priklauso ir išmetamų CO<sub>2</sub> kiekis. Tai gali būti hibridiniai automobiliai, kurie pasižymi mažesniais degalų sąnaudomis, lyginant su automobiliais, kurie turi tik vidaus degimo variklį. Hibridiniai automobiliai gali dalį nuvažiuojamo atstumo būti varomi tik elektros varikliu, kurie neišmeta teršalų, taip pat dalį energijos susigrąžinti regeneracinio stabdymo metu, kuomet dalis automobilio kinetinės energijos regeneruojama į akumuliatorių bateriją. Ši energija gali būti pakartotinai panaudota sukurti elektros varikliui.

**Reikšminiai žodžiai:** Hibridinis automobilis, NEDC ciklas, automobilio efektyvumas.

## Įvadas

Hibridinis elektrinis automobilis (sutrumpintai – hibridinis automobilis) – tai automobilis, naudojantis vidaus degimo variklį ir integruotą pakraunamą energijos sistemą, kurios dėka sumažinamos degalų sąnaudos. Hibridiniai automobiliai būna įvairių tipų. Pagal hibridinės jėgainės architektūrą būna nuoseklaus jungimo, lygiagreto jungimo ir nuoseklaus-lygiagreto (išskirstytos galios angl. *power split*) jungimo hibridai. Pagal baterijos krovimo būdą būna paprastieji hibridai (angl. *hybrid electric vehicle*), kai baterija kraunama vidaus degimo variklio sukamo generatoriaus ir regeneracinio stabdymo būdu ir kištukiniai hibridai (angl. *Plug-in hybrid electric vehicle*), kai baterija kraunama analogiškai kaip paprastuosiuose hibridiniuose automobiliuose, tačiau dar yra galimybė bateriją papildomai pakrauti iš elektros tinklo. Hibridiniuose automobiliuose būna įvairių vidaus degimo variklių ir elektros variklių konfigūracijų, kurios veikia skirtingu lygiu. Tai nusakoma hibridizacijos lygiu, kuris nustatomas pagal formulę [1]:

$$\text{Hibridizacijos lygis} = \frac{\text{Elektros variklio galia}}{\text{Elektros variklio galia} + \text{Vidaus degimo variklio galia}} * 100;$$

Įprastai mikro (angl. *micro*) hibridiniams automobiliams hibridizacijos lygis siekia iki 5 proc., minkštiesiems (angl. *mild*) hibridams iki 10 proc., pilniems (angl. *full*) 10-50 proc. lygiagreto jungimo ir 50 – 75 proc. nuoseklaus jungimo atveju [1].

Pagal hibridizacijos lygį, elektros variklio atliekamas atliekamas funkcijas ir baterijos krovimo galimybes, hibridinius automobilius galima suskirstyti į keturis pagrindinius lygius, pateiktus 1 lentelėje.

1 lentelė.

Hibridinių automobilių lygiai

Tipas	Start-stop sistema	Regeneracinis stabdymas /papildoma galia	Važiavimas vien elektros varikliu	Įkraunamas iš elektros tinklo
Mikro	TAIP	NE	NE	NE
Minkštas	TAIP	TAIP	NE	NE
Pilnas hibridas	TAIP	TAIP	TAIP	NE
Kištukinis hibridas	TAIP	TAIP	TAIP	TAIP

Šaltinis: Sudaryta autorių

Nors hibridiniai automobiliai sunaudoja mažiau degalų nei automobiliai su benziniais ar dyzeliniais varikliais [3, 7], ne visi hibridiniai automobiliai yra vienodai efektyviai regeneruoja energiją. Priklausomai nuo hibridizacijos lygio, stabdymo metu regeneruojama skirtingas kiekis energijos, kuris paverčiamas elektros energija ir kaupiamas akumuliatorių baterijoje.

## Tyrimo uždaviniai:

- Sudaryti tyrimų metodiką, kuri leistų parinkti optimalų hibridinio automobilio stabdymo režimą;

- Atlikti natūrinius stabdymo eksperimentus ir nustatyti hibridinio automobilio naudą;
- Įvertinti hibridinių automobilių naudojimo realiuose miesto maršrutuose efektyvumą ir poveikį aplinkai.

### 1. Skirtingo hibridizacijos lygio automobilių analizė

Šioje dalyje atliekama skirtingos hibridizacijos lygio automobilių analizė – išsamiau analizuojami Toyota Prius XW30 2012 m. ir GOLF VIII eTsi 2020 m. automobiliai.



a)



b)

**1 pav.** Bandymams naudoti hibridiniai automobiliai: a) Toyota Prius, b) Volkswagen Golf eTsi

Šaltinis: a) Prieiga per internetą: [https://www.ifixit.com/Device/2009-2015\\_Toyota\\_Prius](https://www.ifixit.com/Device/2009-2015_Toyota_Prius) // b) Prieiga per internetą: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Volkswagen/121266/Volkswagen-Golf-8-10-eTSI-110HP.html>.

Tyrimui reikalingi automobilių charakteristikos ir duomenys pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė

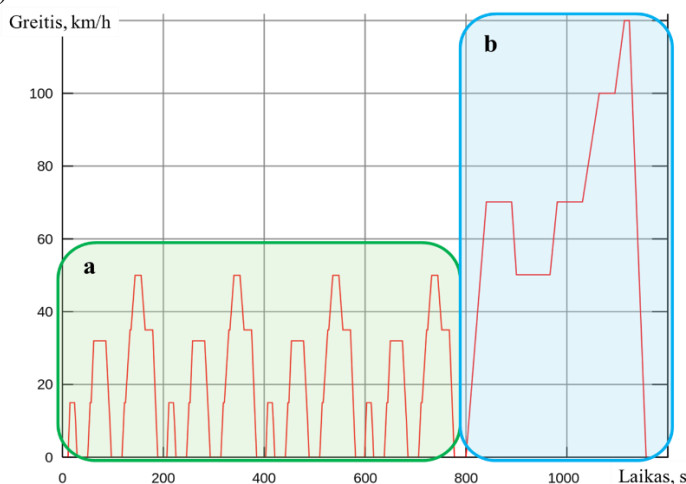
Tiriamųjų automobilių charakteristikos

	Toyota Prius 1,8i Hybrid	VW Golf VIII 1,0 eTsi
Masė, kg	1420	1380
Aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas, m <sup>2</sup>	0,556	0,615
Ratų matmenys/ statinis spindulys, m	195/65R15 / 0,31	205/55R16 / 0,308
Rato inercijos momentas, kg/m <sup>2</sup>	0,75	0,78
Rato pasipriešinimo riedėjimui koeficientas	0,008	0,007
Generatoriaus galia, kW	23,7	12
Generatoriaus efektyvumas, %	85	75
Akumuliatorių baterijos įtampa, V	201,6	48
Akumuliatorių baterijos talpa, kWh	1,31	0,596

Šaltinis: Sudaryta autorių

### 2. Tyrimų metodika

NEDC (angl. *New European Driving Cycle*) – tai automobilių degalų sąnaudų nustatymo metodas [5]. Jo metu automobilio važiavimas imituojamas miesto ir užmiesčio keliais, keletą kartų stabdant ir įsibėgėjant iki atitinkamų greičių (2 pav.).

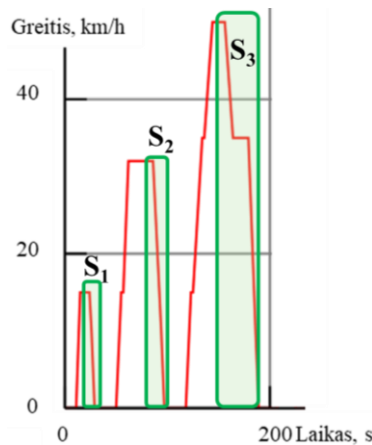


**2 pav.** NEDC ciklo analizė: a – miesto ciklas; b – užmiesčio ciklas

Šaltinis: Sudaryta autorių

Kadangi tyrimui aktualus regeneracinio stabdymo metu rekuperuota energija, naudotas tik miesto ciklo važiavimo režimas ir tik stabdymo atvejais (3 pav.).





**3 pav.** NEDC miesto ciklo analizė: S<sub>1</sub> – pirmoji lėtėjimo zona; S<sub>2</sub> – antroji lėtėjimo zona; S<sub>3</sub> – trečioji lėtėjimo zona  
Šaltinis: Sudaryta autorių

Pirmojoje lėtėjimo zonoje automobilis lėtėja nuo pradinio 15 km/h greičio iki pilno sustojimo ir tai trunka 5 s. Visų trijų lėtėjimo zonų pagrindinės charakteristikos pateiktos 3 lentelėje.

**3 lentelė**

**Automobilio judėjimo dinamika NEDC ciklo lėtėjimo zonose**

	Lėtėjimo zona		
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Pradinis greitis, km/h	15	32	50
Galutinis greitis, km/h	0	0	0
Vidutinis greitis, km/h	7,5	16	25
Trukmė, s	5	11	20
Vidutinis pagreitis, m/s <sup>2</sup>	0,8333	0,8081	0,6944
Nuvažiutas atstumas, m	10,41	48,89	138,89

Šaltinis: Sudaryta autorių

Automobilis važiuodamas tam tikru greičiu turi tam tikrą kinetinę energiją, kuri priklauso nuo automobilio masės, automobilio ratų inercijos momentų ir važiavimo greičio.

Automobilio kinetinė energija apskaičiuojama:

$$E_k = \frac{m \cdot v^2}{2} + \frac{I_r \cdot \omega^2}{2}; \quad (1)$$

čia:  $m$  – automobilio masė;  $v$  – automobilio greitis;  $I_r$  – ratų suminis inercijos momentas;  $\omega$  – ratų kampinis sukimosi greitis.

Automobiliui lėtėjant (stabdant) dalis kinetinės energijos sunaudojama pasipriešinimo jėgoms nugalėti. Energija reikalinga oro pasipriešinimo jėgai nugalėti apskaičiuojama:

$$E_{aer} = \frac{C_d A \cdot \rho \cdot v^2}{2} \cdot l; \quad (2)$$

čia:  $C_d A$  – automobilio aerodinaminio pasipriešinimo koeficientas;  $v$  – vidutinis automobilio greitis;  $\rho$  – oro tankis;  $l$  – nuriėdas atstumas.

Energija, kuri sunaudojama ratų pasipriešinimo riedėjimui jėgai nugalėti apskaičiuojama:

$$E_r = m \cdot g \cdot f_0 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{1800}\right) \cdot l; \quad (3)$$

čia:  $f_0$  – automobilio ratų pasipriešinimo riedėjimui koeficientas.

Likusi dalis kinetinės energijos absorbuojama automobilio stabdžiuose ir paverčiama į šilumą. Stabdžiuose absorbuojama kinetinė energija apskaičiuojama:

$$E_s = E_k - E_{aer} - E_r; \quad (4)$$

Hibridinis automobilis stabdymo metu gali tam tikrą dalį kinetinės energijos regeneruoti ir ją panaudoti baterijos įkrovimui. Hibridinio automobilio generatoriuje sunaudojamas energijos kiekis apskaičiuojamas:

$$E_G = N_G \cdot t; \quad (5)$$

čia:  $N_G$  – generatoriaus galia;  $t$  – proceso trukmė.

Bet kokių atveju generatoriuje sunaudotas energijos kiekis negali būti didesnis nei stabdžiuose absorbuotas energijos kiekis:

$$E_G \leq E_S; \quad (6)$$

Hibridinio automobilio regeneruotos ir akumuliatorių baterijoje sukauptas energijos kiekis apskaičiuojamas:

$$E_B = N_G * \eta_G * t; \quad (7)$$

čia:  $\eta_G$  – generatoriaus naudingumo koeficientas.

Apskaičiuojant hibridinio automobilio stabdžiuose sunaudojamą energijos kiekį naudojama ši formulė:

$$E_{SH} = E_k - E_{aer} - E_r - E_G; \quad (8)$$

Jeigu hibridinio automobilio stabdžiuose sunaudojamą energijos kiekį gauname nulį, reiškiasi, kad hibridinio automobilio generatoriaus galingumo pakanka, jog būtų regeneruotas visas perteklinės energijos kiekis stabdymo metu ir šiuo atveju automobilis stabdomas tik generatoriumi, o ne ratų stabdžiais.

### 3. Tyrimo rezultatai ir jų analizė

Pagal antrame skyriuje pateiktas formules 1-8 atliktame skaičiavimus. Duomenys skaičiavimas naudojami iš lentelių X ir Y. Skaičiavimų rezultatai pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė

#### Teorinio tyrimo rezultatai

Toyota Prius						
	Kinetinė energija, $E_k$ (kJ)	Energija riedėjimui, $E_r$ (kJ)	Energija aer., $E_{aer}$ (kJ)	Energijos likutis, $E_s$ (kJ)	Galima regeneruoti, $E_G$ (kJ)	Regeneruota, $E_B$ (kJ)
<b>S<sub>1</sub></b>	12,39	1,16	0,02	11,21	117,50	9,53
<b>S<sub>2</sub></b>	56,24	5,51	0,33	50,40	258,50	42,84
<b>S<sub>3</sub></b>	137,18	15,89	2,28	119,00	470,00	101,15
Viso	205,81	22,56	2,63	180,62	846,00	153,52
VW Golf 1.0 eTsi						
<b>S<sub>1</sub></b>	12,05	0,99	0,02	11,04	60,00	8,28
<b>S<sub>2</sub></b>	54,66	4,68	0,36	49,62	132,00	37,21
<b>S<sub>3</sub></b>	133,33	13,51	2,52	117,29	240,00	87,97
Viso	200,04	19,19	2,90	177,95	432,00	133,46

Šaltinis: Sudaryta autorių

Analizuojant 4 lentelėje pateiktus teorinio tyrimo rezultatus pastebime, kad abiejų tiriamųjų hibridinių automobilių generatorių galingumo pakanka, t.y. jiems judant NEDC metodikoje nurodytais režimais šie hibridiniai automobiliai gali pilnai regeneruoti visą perteklinę energiją, kuri atsiranda stabdymo metu. Automobilis VW Golf regeneruoja šiek tiek mažesnę kinetinės energijos dalį dėl žemesnio hibridinės sistemos efektyvumo. Automobilyje Toyota Prius naudojama mišraus jungimo hibridinė sistema ir šis automobilis lėtėjimo metu išjungia vidaus degimo variklį. Tuo tarpo VW Golf automobilyje hibridinė sistema yra nuoseklaus jungimo ir, lėtėjimo metu, vidaus degimo variklis turi sukintis, nes kitaip nebus sukamas jo 48 V generatorius. Vidaus degimo variklio sukimui bus sunaudojama dalis kinetinės energijos jo sukimui ir tai reikėtų įvertinti. Norint įvertinti energijos nuostolius vidaus degimo variklio sukimui, reikia žinoti tam tikrus variklio parametrus (degalų tipas, darbinis tūris) ir transmisijos charakteristikas.

Lyginant Z lentelėje energijos likučio ir galimą regeneruoti energiją, kuri priklauso nuo hibridinio automobilio generatoriaus galingumo, pastebime, kad Toyota Prius atsargos koeficientas yra apie 2 kartus didesnis nei VW Golf. Pagal NEDC metodiką vidutinis lėtėjimo pagreitis stabdymo zonoje yra mažiau nei 1 m/s<sup>2</sup>. Realiomis eismo sąlygomis dažnai tenka stabdyti žymiai greičiau. VW Golf automobilio regeneruojamos energijos atsargos koeficientas S<sub>3</sub> stabdymo zonoje yra 2,4, o lėtėjimo pagreitis šioje zonoje yra 0,69 m/s<sup>2</sup>. Taigi galima teigti, kad šio hibridinio automobilio generatoriaus galingumo pakanka stabdant didžiausiu 1,7 m/s<sup>2</sup> lėtėjimo pagreičiu. Stabdant didesniu nei 1,7 m/s<sup>2</sup> lėtėjimo pagreičiu, jau neišvengiamai dalis kinetinės energijos bus paverčiama šilumine energija stabdžiuose. Vėlgi reikia nepamiršti, kad dėl jungimo schemos šiame automobilyje visą laiką turi sukintis ir vidaus degimo variklis, dėl ko dalis energijos visada bus prarandama jame, bet generatoriaus galingumo pakaks stabdant ir didesniu efektyvumu.

### Išvados

Tyrimė nagrinėti du skirtingų konfigūracijų hibridiniai automobiliai ir nustatytos jų galimybės regeneruoti kinetinę stabdymo metu:

- Toyota Prius automobilyje naudojama efektyvesnė ir didesnio galingumo mišraus jungimo hibridinė sistema;
- Automobiliams važiuojant NEDC metodikoje pateiktais režimais, abiejų tiriamųjų hibridinių automobilių generatorių galingumo pakanka, kad regeneruoti visą perteklinę energiją, kuri atsiranda stabdymo metu.

metu;

- Dėl nuoseklaus hibridinės jėgainės jungimo schemos VW Golf automobilyje jo efektyvumas bus mažesnis nei mišraus jungimo schemos automobilio, nes dalis kinetinės energijos bus sunaudojama vidaus degimo variklio sukimui.

### Literatūra

1. Govardhan Ojas M. Fundamentals and Classification of Hybrid Electric Vehicles. [žiūrėta 2024-04-10]. Prieiga per: <https://oaji.net/articles/2017/1992-1515159589.pdf>
2. Europos žaliasis kursas. 2020 interaktyvus. [žiūrėta 2024-04-12]. Prieiga per: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_lt](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_lt)
3. EPA, Fuel economy. 2023 interaktyvus. [žiūrėta 2024-04-08]. Prieiga per: <https://www.epa.gov/fueleconomy/plug-hybrid-electric-vehicle-learn-more-about-new-label>
4. Toyota Prius XW30. [žiūrėta 2024-04-11]. Prieiga per: [https://www.ifixit.com/Device/2009-2015\\_Toyota\\_Prius](https://www.ifixit.com/Device/2009-2015_Toyota_Prius)
5. Understanding the new european driving cycle (NEDC): a guide to fuel consumption measurement. [žiūrėta 2024-04-10]. Prieiga per: <https://coceurope.eu/blog/nedc-emission-test/>
6. Volkswagen Golf VII eTSI. <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Volkswagen/121266/Volkswagen-Golf-8-10-eTSI-110HP.html>
7. Zabitis Evaldas. Understanding hybrid car consumption. 2023 interaktyvus. [žiūrėta 2024-04-08]. Prieiga per: <https://www.carvertical.com/en/blog/understanding-hybrid-car-consumption>

## THEORETICAL STUDY OF THE EFFICIENCY OF CARS WITH DIFFERENT LEVELS OF HYBRIDIZATION

### Summary

Car transport is one of the biggest polluters of the environment. In 2020, the share of greenhouse gas (CO<sub>2</sub>) emissions from motor transport reached 24% of all emissions in the European Union. One way to reduce greenhouse gas (CO<sub>2</sub>) emissions from motor transport is to produce cars that consume less fuel, as CO<sub>2</sub> emissions depend on it. These can be hybrid cars, which are characterized by lower fuel consumption compared to cars that only have an internal combustion engine. Hybrid cars can be driven for a part of the driving distance only by an electric engine that does not emit pollutants, as well as recover part of the energy during regenerative braking, when part of the car's kinetic energy is regenerated into the battery. This energy can be reused to run an electric motor. Although hybrid cars consume less fuel than cars with gasoline or diesel engines, not all hybrid cars are equally efficient in regenerating energy. Depending on the level of hybridization, a different amount of energy is regenerated during braking, which is converted into electrical energy and stored in the battery pack. The purpose of this study is to calculate the amount of renewable energy of cars with different levels of hybridization and to determine their efficiency in the urban cycle according to the NEDC methodology.

**Key words:** Hybrid car, NEDC cycle, car efficiency.

### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Darius Juodvalkis.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** daktaras, docentas

**Darbo vieta ir pozicija:** Kauno technikos kolegija, docentas.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** transporto technologijos, inžinerinių tyrimų metodologija.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** +370 682 14365, [darius.juodvalkis@edu.ktk.lt](mailto:darius.juodvalkis@edu.ktk.lt)

**Autoriaus vardas, pavardė:** Andrius Dargužis.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** daktaras, docentas

**Darbo vieta ir pozicija:** Kauno technikos kolegija, docentas.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** transporto technologijos, inžinerinių tyrimų metodologija.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** +370 614 77194, [andrius.darguzis@edu.ktk.lt](mailto:andrius.darguzis@edu.ktk.lt)

### A COVER LETTER OF AUTHORS

**Author name, surname:** Darius Juodvalkis.

**Science degree and name:** doctor, associated professor.

**Workplace and position:** Kaunas University Of Applied Engineering Sciences, associated professor.

**Author's research interests:** transport technologies, engineering research methodology.

**Telephone and e-mail address:** +370 682 14365, [darius.juodvalkis@edu.ktk.lt](mailto:darius.juodvalkis@edu.ktk.lt)

**Author name, surname:** Andrius Dargužis.

**Science degree and name:** doctor, associated professor.

**Workplace and position:** Kaunas University Of Applied Engineering Sciences, associated professor.

**Author's research interests:** transport technologies, engineering research methodology.

**Telephone and e-mail address:** +370 614 77194, [andrius.darguzis@edu.ktk.lt](mailto:andrius.darguzis@edu.ktk.lt)

# INVESTIGATION AND EVALUATION OF THE IMPACT OF ANTIVIRUS PROTECTION ON THE PERFORMANCE OF A PERSONAL COMPUTER

Priyanka Wagle, Gediminas Gražulevičius  
*Vilnius Techn*

## Abstract

As digital threats continue to evolve, the need for effective antivirus protection is paramount to safeguarding personal computers from malicious activities. These antivirus programs also have tremendous impact on the performance of the computer system, which in turn can become vulnerability for malware attacks. This study delves into the intricate relationship between antivirus software and the overall performance of a personal computer by focusing on the comparative performance analysis of some selected free and paid antivirus software on same computer. A survey of around 130 respondents was conducted to select antivirus software for testing. The study takes parameters such as boot time of an operating system, copying time of a set of files, working memory used by antiviruses and various application start-up times to understand the impact of the antivirus program on the personal computer performance.

**Key words:** Antivirus software, malware, survey, personal computer performance.

## Introduction

A computer virus is a software program capable of replicating itself to generate a new file, posing a threat to computer files. Replication requires a host system or assistance for spread (Gandotra, 2014). Computer viruses can disrupt or impede computer operations, leading to negative impacts. Antivirus software is designed to counteract these viruses, scanning hard drive files, and comparing signatures with a database (Barriga, 2017). The effects, conduct, and damage experienced by computer systems, network systems, or data can differ. Antivirus developers have created detection methods, encompassing behavioural, heuristic, and static approaches (Altaher, 2011; Chakraborty, 2017; Daoud, 2008). Developers of malicious software employ diverse evasion tactics to circumvent detection. Antivirus products might be effective. However, their impact on the performance of the computer system (Host) is something that should also be considered. While antivirus vendors aim to combat the growing threats and damages posed by malware through the design of antivirus software, the same software can inadvertently impact the performance of the computer system. This impact on performance can, in turn, create vulnerabilities that may be exploited by malware attacks. The very measures taken to protect a system from malware can introduce challenges in terms of system performance (Dogonyaro, 2021).

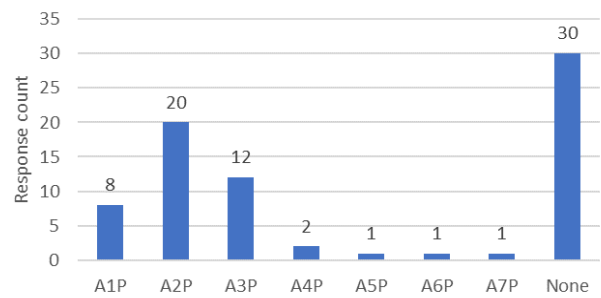
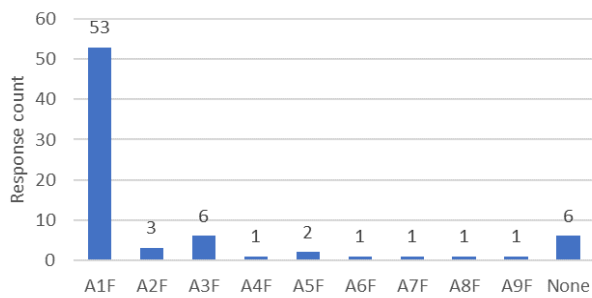
With respect to user experience, the performance aspect is crucial because users want an antivirus solution that not only effectively detects and removes threats but also does so without significantly slowing down their system. Our tests are driven by the aim of offering a more tailored perspective, exploring specific aspects not covered in existing tests. By customizing the research focus, testing configurations, and delving into user perceptions, the study seeks to provide a nuanced and valuable contribution to the current understanding of antivirus effectiveness towards computer performance.

The purpose and tasks of the work:

1. Carry out a questionnaire (about for 100 students) and highlight the most popular free and paid antivirus programs.
2. To select tests to investigate the impact of antivirus programs on personal computer performance, and the performance of basic operations and functions (personal computer boot time, random access memory usage, file set copy time, user program start-up time).
3. To experimentally study the impact of the most popular (according to the results of the survey) antivirus programs on the personal computer performance and the performance of basic operations and functions.
4. Compare the impact of paid and free antivirus programs on the personal computer performance.

## Research methodology

In our study, we have conducted a survey to around 130 students out of which it got 75 responses. The goal of the survey is to highlight the most popular free and paid antivirus programs. A total of 12 questions were included in the survey. These questions were useful in understanding the antivirus popularity based on user experience. Based on the survey results (Fig. 1.) 6 antivirus programs were selected for the study: 3 free antivirus programs and 3 paid. The actual names of the antivirus programs have been changed to conditional ones. Free antiviruses are denoted as A1F, A2F, A3F, etc., and paid antiviruses are denoted as A1P, A2P, A3P, etc.

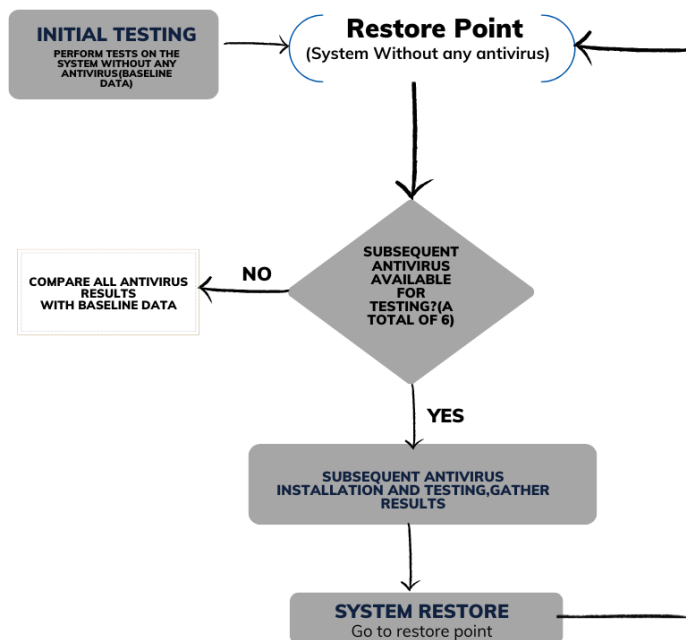


a) b)  
**Fig. 1.** A survey results: selection of antivirus programs for testing: a) free, b) paid  
*[Created by authors]*

Based on the results of the survey, antivirus A1F, A2F, A3F, A1P, A2P, A3P are selected for testing.

*Note:* There are other varieties of antivirus services provided by these companies. However, standard versions are chosen for the study.

The algorithm of the testing process is presented in Figure 2.



**Fig. 2.** The testing process *[Created by authors]*

The testing process is carried out in several steps:

Initial testing: initiate testing without the presence of any antivirus software.

Create restore point: before proceeding with antivirus installation, create a restore point using the operating system recovery tool. This will serve as a baseline for comparison and system restoration if necessary.

Antivirus installation: install the antivirus program under investigation and conduct corresponding tests. Tests performed:

1. Working memory used by antivirus programs.
2. The impact of antivirus programs on personal computer start-up.
3. The impact of antivirus programs on the process of various application start-up.
4. The impact of antivirus programs on the process of copying set of files.

System restores upon completing assessments for the first antivirus in the operating system, restore system settings to the pre-antivirus installation state using the operating system recovery tool, specifically “System Recovery- Reset this PC”

Subsequent antivirus installation: install another antivirus program, maintaining consistency in operating system settings and the array of installed programs for a standardized testing environment. This

approach ensures a systematic and fair evaluation of each antivirus, allowing for accurate comparisons based on identical operating conditions.

*Note:* the testing was done with the same personal computer: unchanged hardware specification and same programs/applications installed before and during testing.

Special applications used for testing:

**PassMark AppTimer:** AppTimer, developed by PassMark Software, is a tool designed for benchmarking an application's startup time. It accomplishes this by executing a given application multiple times, measuring the duration it takes for the application to reach a state where user input is accepted, and then automatically closing the application. The startup time measurements are logged to a file. AppTimer is a free utility (AppTimer, 2024).

**BootRacer:** BootRacer is a lightweight, user-friendly, and convenient tool designed for monitoring the boot time of Windows PCs and managing startup programs. BootRacer calculates the clear Windows boot-up time (without password timeout) (BootRacer, 2024).

**Windows PowerShell:** PowerShell is built on the .NET Framework and supports the automation of administrative tasks via cmdlets (pronounced "command-lets"), which are specialized .NET classes (PowerShell, 2024).

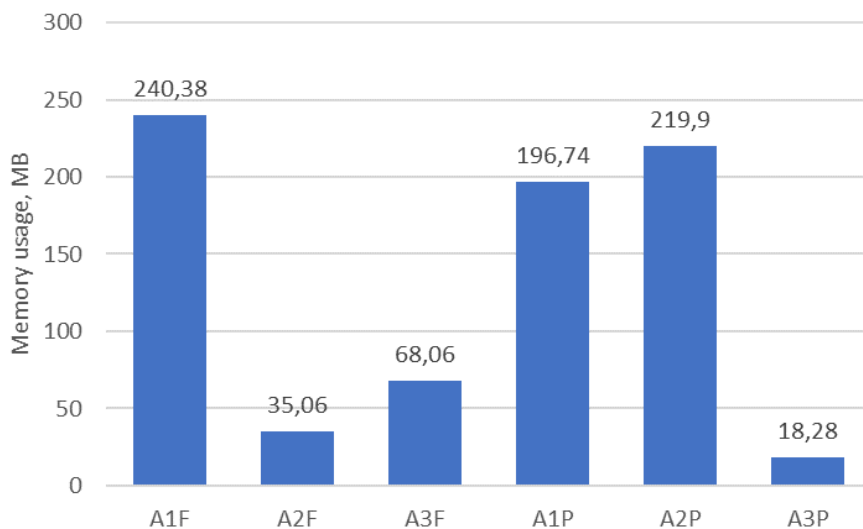
### **Experimental results: impact of various antiviruses on personal computer performance**

These are the average results of experiments with 10 iterations.

*Note:* the results are in comparison to the computer performance when no antivirus program is installed (as a baseline).

#### **Working memory used by antivirus programs.**

The working memory of a process refers to the temporary storage and manipulation of data that is actively being used or processed by the specific task or program. It is a crucial aspect of a computer's memory system and is distinct from long-term storage, as it is designed to hold information that is immediately required for ongoing computations or operations. PowerShell is used here. Computer random access memory usage by various antivirus programs working set is shown in Figure 3.



**Fig. 3.** Memory usage by various antivirus programs working set  
*[Created by authors]*

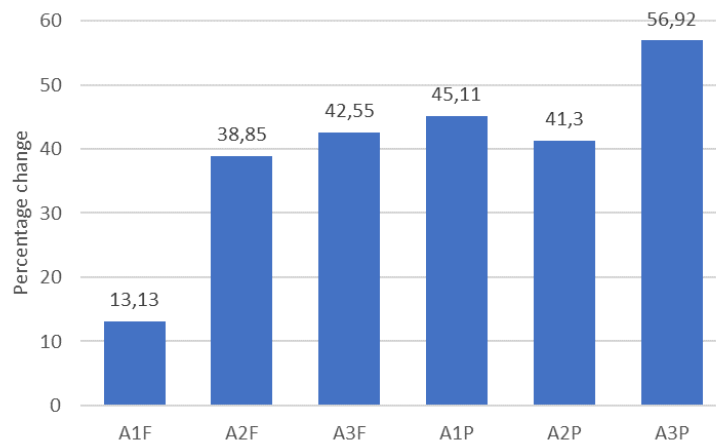
The tested antivirus programs use between 18 MB and 240 MB of PC's random access memory. A2F, A3F and A3P showed less memory consumption with A3P taking up the least space. This optimization aims to make the process more resource-efficient, potentially improving overall system performance by freeing up memory for other processes or tasks. A1F has the highest consumption.

#### **The impact of antivirus programs on personal computer start-up**

Figure 4 shows the various antivirus programs impact on personal computer boot-up duration.

Considering a program's impact on computer bootup is crucial for optimizing system performance and user experience. Slow boot times can frustrate users and hinder productivity, while inefficient programs may consume valuable system resources. Managing startup processes effectively ensures quicker boot times and improved stability for the system.



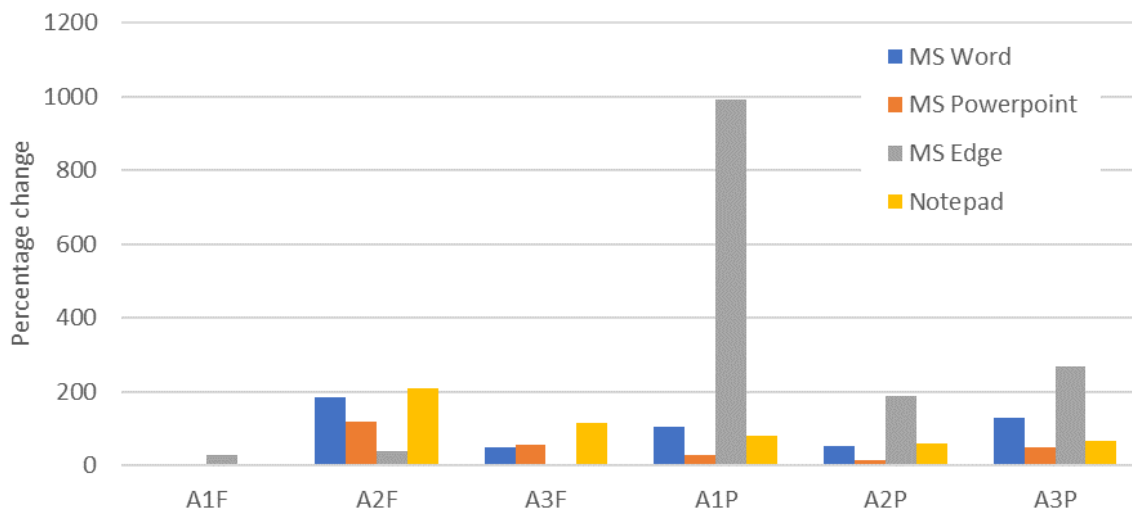


**Fig. 4.** Computer boot-up duration [Created by authors]

A1F has the least computer boot time with about 13% increase from computer without antivirus, emphasizing seamless integration. A2F and A3F show more significant impacts at about 39 % and 43 %, respectively. A1P, with robust features, results in a about 45 % increase. A2P strikes a balance at about 41 %, while A3P displays the highest impact at about 57 %. This highlights the trade-off between security and start-up performance for user consideration.

#### The impact of antivirus programs on the process of various application start-up

The impact of antivirus programs on application launch was investigated in this study (Fig. 5). Users frequently utilize various applications during computer tasks, prompting an experimental examination of how antivirus programs affect application initiation. The study focused on four widely used applications: Microsoft Office Word 2016, Microsoft PowerPoint 2016, Microsoft Edge, and Notepad. Each application was subjected to testing both with and without various antivirus programs installed on the personal computer.

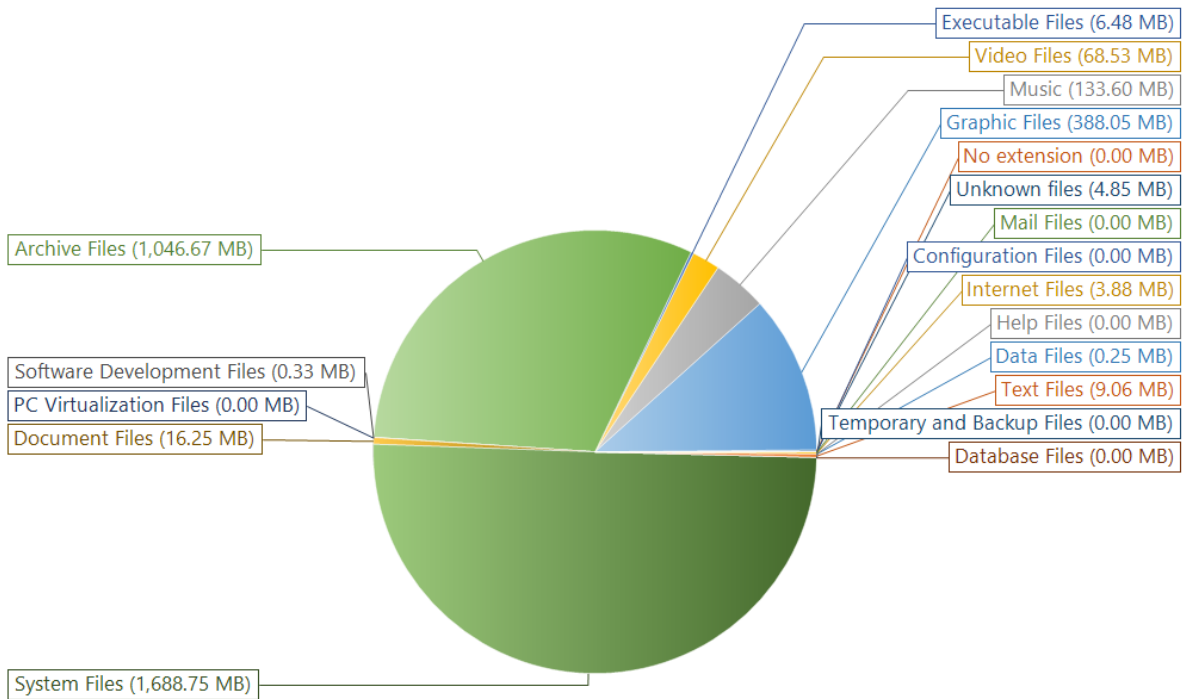


**Fig. 5.** Application start-up time [Created by authors]

A1F showed very less impact on various application start-up time, almost similar compared to a system with no antivirus. The start-up time for Microsoft Edge is around 28 % more with A1F, whereas A1P antivirus shows a very high start-up time for Microsoft Edge. A1F caches the application files, and is seamlessly integrated with the operating system. It boosts security and streamlines application management for users. A3F also starts up Microsoft Edge quite quickly with browser control cache.

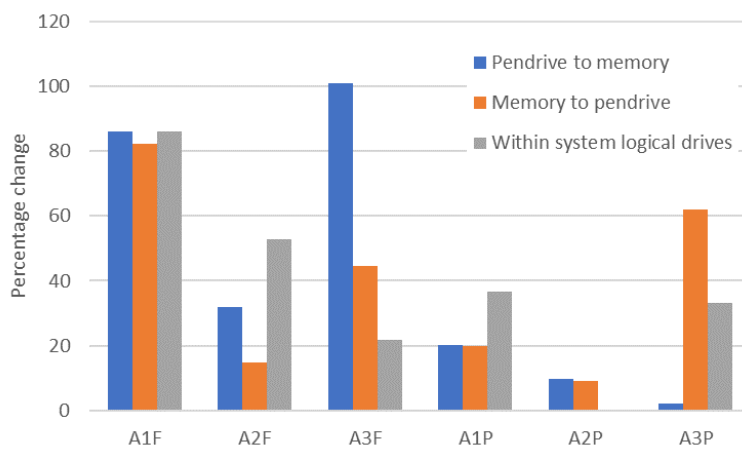
#### The impact of antivirus programs on the process of copying set of files.

A prevalent user activity on computers is the copying of files. Hence, the objective of this study is to assess the impact of antivirus software on the speed of the file copying process. The combined size of the file set is 3,28 GB, comprising a total of 15707 files and 2954 folders. This set contains various file types, and the folders that also contains archives that store multiple files, such as \*.exe, \*.zip, \*.rar and others (Fig. 6).



**Fig. 6.** Groups of file types by size in a set [Created by authors]

The study involves copying a set of files, varying in size and format, from secondary device to computer and vice versa, and within same logical drive on the computer (Fig. 7). PowerShell script is run to copy files and get the time taken by the operation.



**Fig. 7.** File set transfer time [Created by authors]

A2P showed just approximately 9 % increase in transfers to and from secondary devices and moreover reduced time for internal copying. A1F showed an increase of about 80 % for all types of transfers. A2P performance in file transfer speeds can be attributed to a combination of optimized file scanning, efficient resource management, smart caching, prioritization strategies, well-designed background processes. A3F took more than double to copy from secondary device to memory compared to the time taken to copy files without any antivirus.

### Conclusions

1. Tested antivirus programs can take up to about 240 MB of memory. This can make up a fairly significant percentage of the remaining free random access memory of the PC.
2. Antivirus programs we tested can slow down a PC's boot time by as much as 57 percent. This highlights the trade-off between security and start-up performance for user consideration.
3. Antivirus program integrated into the operating system showed very less impact on various application start-up time, almost similar compared to a system with no antivirus.

4. The tested paid antivirus programs work particularly poorly with the Microsoft Edge browser, i.e. greatly increases its start-up time.

5. The antivirus solution integrated into the operating system demonstrates an impressive slowdown of about 80 % for all types of data transfers.

6. Thus, when looking for a well-balanced antivirus solution, user should pay attention to antivirus software with efficient resource allocation, start-up time, optimized file transfer speed and relatively lower memory usage.

### Reference List

1. Altyeb Altaher, Sureswaran Ramadass and Ammar Ali. Computer Virus Detection Using Features Ranking and Machine Learning. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, 5(9): 1482–1486, ISSN: 1991-8178.
2. AppTimer - Application Startup Timer. <https://www.passmark.com/products/apptimer/>, Accessed: 2024-03-14.
3. Barriga, J. J., Yoo, S. G. Malware detection and evasion with machine learning techniques: a survey. Int. J. Appl. Eng. Res. 2017, 12 (18).
4. BootRacer. <https://greatis.com/bootracer/index.html> Accessed: 2024-03-14.
5. Soumen Chakraborty. A Comparison Study of Computer Virus and Detection Techniques. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2017 IJSRCSEIT. 2017, 2(1). ISSN: 2456-3307.
6. Essam Al Daoud, Iqbal H. Jebril and Belal Zaqabeh. Computer Virus Strategies and Detection Methods Int. J. Open Problems Compt. Math. 2008, 1(2).
7. Dogonyaro, N. M., Victor, W. O., Shafii, A. M., Obada, S. L. Comparative Performance Analysis of Anti-virus Software. Information and Communication Technology and Applications. ICTA 2020. Communications in Computer and Information Science. 2021, Vol 1350. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69143-1\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69143-1_33).
8. Gandotra, E., Bansal, D., Sofat, S. Malware analysis and classification: a survey. J. Inf. Secur. 2014.
9. What is PowerShell? <https://learn.microsoft.com/en-us/powershell/scripting/overview?view=powershell-7.4> Accessed: 2024-03-14.

## ANTIVIRUSINĖS APSAUGOS POVEIKIO ASMENINIO KOMPIUTERIO DARBUI TYRIMAS IR VERTINIMAS

### Anotacija

Kadangi skaitmeninės grėsmės ir toliau sparčiai vystosi, veiksmingos antivirusinės apsaugos poreikis yra itin svarbus siekiant apsaugoti asmeninius kompiuterius nuo kenkėjiškos veiklos. Šios antivirusinės programos taip pat turi didžiulį poveikį kompiuterinės sistemos greitaveikai, o tai savo ruožtu gali tapti pažeidžiamumu dėl kenkėjiškų programų atakų. Šiame tyrime gilinamasi į sudėtingą ryšį tarp antivirusinės programinės įrangos ir bendros asmeninio kompiuterio greitaveikos, daugiausia dėmesio skiriant lyginamajai, kai kurių nemokamų ir mokamų antivirusinių programų tame pačiame kompiuteryje, analizei. Buvo atlikta apie 130 respondentų apklausa, skirta tyrimams parinkti antivirusinę programinę įrangą. Siekiant suprasti antivirusinių programų poveikį asmeninio kompiuterio greitaveikai, tyrime atsižvelgiama į tokius parametrus kaip operacinės sistemos įkrovos laikas, laikas, reikalingas failų rinkiniui nukopijuoti, antivirusinių programų naudojamos operatyviosios atminties kiekis ir įvairių vartotojo programų paleidimo laikas.

**Raktiniai žodžiai:** antivirusinė programinė įranga, kenkėjiškos programos, apklausa, asmeninio kompiuterio veikimas.

### A COVER LETTER OF AUTHORS

**Author name, surname:** Priyanka Wagle.

**Science degree and name:** bachelor of engineering.

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, M. Sc. student.

**Author's research interests:** data structures, database advancements, computer security.

**Telephone and e-mail address:** +370 6 9648077, [priyanka.wagle@stud.vilniustech.lt](mailto:priyanka.wagle@stud.vilniustech.lt)

**Author name, surname:** Gediminas Gražulevičius.

**Science degree and name:** Ph. D., assoc. professor.

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, assoc. professor.

**Author's research interests:** electromagnetic disturbances, electromagnetic field measurement technologies, computer network security and data mining.

**Telephone and e-mail address:** +370 5 2744771, [gediminas.grazulevicius@vilniustech.lt](mailto:gediminas.grazulevicius@vilniustech.lt)

# PROGRAMUOJAMŲ LOGINIŲ VALDIKLIŲ PROGRAMOS TAIKYMO TYRIMAS NUOTOLINIAM IR SAVARANKIŠKAM VALDYMO GRANDINIŲ MOKYMUI/SI, ELEKTROS ENERGETIKOS PROGRAMOJE

**Valdas Paulauskas**  
*Kauno technikos kolegija*

## **Anotacija**

Studentams keliamas tikslas - studijuoti ir susipažinti su loginių ir relinių sistemų, taikomų mechatronikoje, teorinėmis žiniomis bei įgyti praktinių įgūdžių. Tai tampa įmanoma, pasirinkus laisvai prieinamas kompiuterines valdiklių programavimo programas, jų galimybes pritaikant skirtingoms dalyko temoms paaiškinti ir savarankiškai studijuoti, praktiškai išbandant kompiuterio simuliacijoje, nenaudojant papildomos fizinės laboratorijos įrangos.

Straipsnyje analizuojam ir aptariama idėja – kolegijoje automatikos ir mechatronikos dalyko studijose, apjungti numatytos programos temas su taikomosiomis valdiklių programomis, taip integruojant jų panaudojimą į mokymo/si procesą.

Apžvelgus PLV taikomosios programos panaudojimo mokymo tikslais kolegijoje teorines ir praktines galimybes nustatyta, kad neinvestuojant į papildomas specialių taikomųjų mokamų programų licencijas, įmanoma taikyti laisvai platinamas PLV programas, vaizdžiau paaiškinti ir pademonstruoti loginių ir relinių sistemų veikimo teorines ir praktines galimybes, motyvuoti studentus studijuoti savarankiškai ir suvokti sistemos atskirų grandžių veikimą.

Atlikus tyrimą ir analizuojant įgytą patirtį paskaitų metu, galima teigti, jog taikant pasirinktą taikomąją programą valdikliui, atskirose mechatronikos paskaitose, studentui lengviau įgyti perkeltinius gebėjimus, lengviau suprasti loginių grandinių, relinių valdymo elementų paskirtį. Atliekant virtualias simuliacijas, įtvirtinami praktiniai gebėjimai analizuoti ir tirti valdymo sistemų elementus, praktiškai išbandoma, kaip signalai susiję su komutacijos aparatais ir skirtinga veikimo logika, jų paskirtimi valdymo logikoje.

**Reikšminiai žodžiai:** valdiklis, taikomoji programa, veiklos analizė.

## **Įvadas**

Technologijos aplinkoje visada pralenkia laiką, žmonių turimos žinios, gebėjimai ir suvokimas nuolat keičiasi ir tobulėja, todėl technologijas tenka sparčiai vystyti. Technologijų pasaulyje vis plačiau taikomos generatyvinio dirbtinio intelekto galimybės. Šie nuolatiniai pokyčiai apima visą žmogų supančią aplinką. Vienas iš pagrindinių ketvirtosios pramonės revoliucijos iššūkių yra švietimo, mokymo/si klausimas: kaip tinkamai paruošti besikeičiančiam technologijų pasauliui naująją kartą. Vokietijos metalo ir elektros pramonės darbdavių asociacijos „Nordmetall“ tarptautinių ryšių skyriaus direktorius Hansas Manzke teigia, jog: „Šiandien pramonėje dirbantiems žmonėms jau reikia ne tik specialių techninių žinių, bet ir gero kompiuterinio raštingumo bei tokių kompetencijų, kaip kalbų mokėjimas, bendravimo meno išmanymas bei gebėjimas dirbti lanksčiai laiko ir vietos atžvilgiais.“(...), „Turime mokytis visą gyvenimą, ir tai yra ta nuostata, kurią privalome diegti nuo labai jauno amžiaus.“(Manzke, 2017)

Technologijų srities įmonėse inžinieriais, technikais dirbantys žmonės susiduria su žmogiškųjų išteklių problema. Trūksta kvalifikuotų, techniškai išsilavinusių žmonių, galinčių vykdyti įvairias veiklas, atlikti kvalifikuotus darbus, naudotis naujausiomis technologijomis. Lietuvoje technologines studijas renkasi mažai moksleivių, nes vis dar vyrauja klaidinga nuomonė, jog inžinieriaus kelias netinka merginoms, kad inžineriniai mokslai sudėtingi, reikalaujantys daug darbo ir pastangų.

Rengiant specialistą kolegijoje, kyla problemos taikant nuotolinį ir savarankišką mokymą/si. Kai kurie studentai nepasirengę ir nesuinteresuoti priimti informacijos nuotoliniu būdu ar studijuoti savarankiškai. Paskaitų metu nėra suinteresuoti vykdyti žodines užduotis atsakinėti žodžiu, sudėtinga paskaitų metu gauti grįžtamąjį ryšį, apklausti daugiau asmenų. Neturint ir taikomųjų programų, sudėtinga išsamiai pateikti teorines ir praktines žinias.

Teoriniai dalykai inžineriniuose moksluose be praktinio mokymo/si neįmanomi. Studentui nesucidūrusiam su realiais grandinių elementais praktiškai, sunku suvokti kaip veikia sistema studijuojant vien teoriją, tam reikalingi praktiniai įgūdžiai.

**Problema** - maža studentų motyvacija mokytis savarankiškai praktinių dalykų nuotoliniu būdu, atskirų mechatronikos ir automatikos dalyko temų. Nepakankamas specializuotų programų skaičius ir taikymas kolegijoje.

**Tyrimo tikslas** – atskleisti PLV (programuojamų loginių valdiklių) programų panaudojimo galimybes studijuojant automatikos, mechatronikos dalyke loginių ir relinių sistemų pagrindus.

**Objektas** – PLV programa automatikos, mechatronikos paskaitose.

**Tikslui pasiekti uždaviniai:** atlikti taikomųjų programų panaudojimo galimybių analizę mechatronikos, valdiklių dalykų paskaitose. Apžvelgti Millenium M3 programos pritaikomumo galimybes ir

įvertinti, kaip taikomoji Millenium M3 programa motyvuoja ir padeda įsisavinti logikos, laiko, skaitiklių funkcijų įsisavinimą savarankiškai.

### Metodika ir metodologija tyrimo analizei atlikti

Tyrimais stengimasis išspręsti veiklos kokybės gerinimą. Kaip teigia K. Kardelis: „Kokybinio tyrimo strategija paremtas praktinės pakraipos tyrimas, nukreiptas į kurios nors situacijos valdymą (siekiant ją keisti arba patobulinti) arba tam tikros problemos sprendimą.“ (Kardelis, 2005)

Šiuolaikinėse paskaitose taikomi interaktyvios paskaitos ir atvejo studijos metodai, kurie reikalauja daugiau veiklų, kurias vykdo studentai, todėl tikslinga atlikti veiklos analizę.

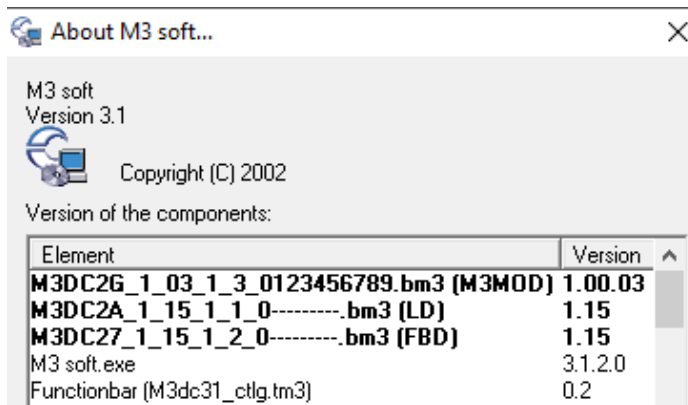
Yra teigiama, jog veiklos tyrimo analizę atliekantis tyrėjas ar praktikas turi būti ne vien tik kritiškas kitų atžvilgiu, bet ir savikritiškas. Analizuojant veiklą tiek teorija tiek praktika yra laikomos ir vertinamos kaip lygios, neturinčios viena prieš kitą prioritetų, veiklos tyrimo siekis yra pakeisti jas abi. Teorijos paskirtis parodyti idealius modelius, teikti papildomų žinių ir nurodyti siekiamybę praktikai. Praktika turi įprasminti ir praturtinti teoriją pavyzdžiais. Veiklos tyrime svarbus diskusinis ryšys tarp praktikos ir teorijos. (Kemmis ir McTaggart, 2005).

Norint išsiaiškinti paskaitoje „Automatikos pagrindai“ PLV taikomosios programos panaudojimo galimybes, atliktas kokybinis tyrimas – veiklos tyrimas, tyrimas atliktas stebint studentų veiklą auditorijoje. Panaudotas stebėjimo metodas ir refleksyvių užrašų analizė. Stebėta, kaip studentai supranta loginių elementų ir relių veikimo teorinius principus paaiškinus veikimą ir kaip supranta panaudojus programą, demonstruojant simuliaciją ir atlikus savarankišką jungimą. Tyrimui buvo sudarytos palankios sąlygos: naudojo kompiuterius su valdiklio programa, buvo supažindinti su aplinka ir technika.

**Tyrimas buvo vykdomas tokiais etapais:** *Pasirengimas tyrimo veiklai:* (tyrimo metu suplanuojama konkreti paskaita, jų ciklas 3 paskaitos, parengiamos užduotys, suplanuojamas laikas, trukmė). *Tyrimo vykdymas:* (PLV programos naudojimas paskaitoje paaiškinus teoriją, pademonstruojamas veikimas programoje, pateiktas klausimas ir užduotis studentui, stebima kaip suprato po teorinio paaiškinimo ir po simuliacijos programoje). *Tyrimo rezultatų analizė:* (analizuojama veiklos refleksija, gryninamos išvados, rengiamos rekomendacijos).

### PLV Taikomųjų programų panaudojimo galimybės mokymo/si procese.

Atlikus paiešką internete, galima rasti ne vieną taikomąją PLV programą, kuri tiktų mokymui kolegijoje ar kurios jau naudojamos. Pavyzdžiui: **Codesys** – tai viena sudėtingesnių programų, skirta kurti valdikliui taikomąją programą skirtingiems gamintojų valdikliams ir keliomis programavimo kalbomis. **Siemens Logo Micro Plc** – tai Siemens gamintojo programuojamos relės paketas, kuris nėra sudėtingas ir tinka aptariamam mokymosi procesui. Taip pat panašios: EC4P-221-MRAD1, **EATON ELECTRIC**, ZEN-10C1AR-A-V2, Omron ir.t.t. Galima integruoti PLV programų programavimo paketus į logikos, relių, kitų taikomų elementų valdyje taikomųjų funkcijų paaiškinimo, veikimo, imitacinių bandymų paskaitas. Pritaikyti automatikos pagrindų, mechatronikos, valdiklių paskaitose. Studentai gali savarankiškai, imituodami elementų veikimą, išbandyti juos, suprasti jų veikimo logiką ir paskirtį, Programa yra nemokama, todėl nereikalauja papildomų investicijų. Programa pritaikoma ir kitame dalyke, studijuojant toliau (VALDIKLIAI). Jos taikymas palengvina nuotolinio mokymosi praktinę pusę. Kaip taikomoji programa simuliacijai buvo pasirinktas Cruozet valdiklių šeimos programavimo aplinka Millenium M3 soft Version 3.1. <https://www.crouzet.com/software/download>



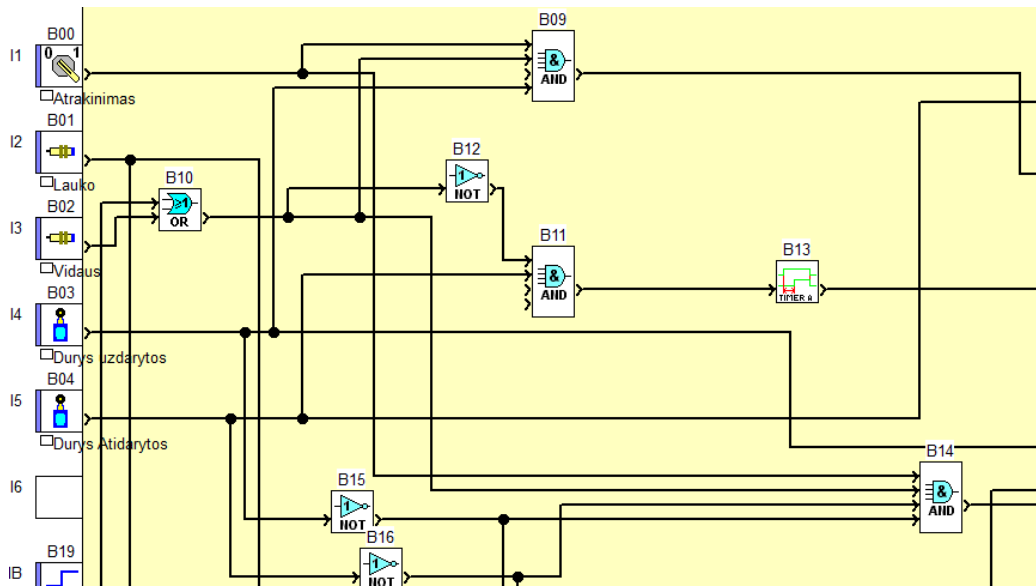
1 pav. M3 soft programavimo paketas

### Simuliacijai pasirinkta FBD programavimo kalba

Skirtingų gamintojų valdiklių programavimą standartizuoja IEC61131 standartas. Standarte IEC61131-3 dalis programavimo kalbos, aprašo plačiai pasaulyje naudojamas PLC programavimo kalbas. Pagrindiniai programinės įrangos modeliai ir programavimo kalbos yra apibrėžiamos formaliai, apibrėžiama leksika, sintaksė, semantika, pateikiami pavyzdžiai. Ši programavimo kalba geriausiai tinka vaizdžiam loginių ir relių schemų veikimui paaiškinti.

FBD (Funkcinių blokų diagrama) – tai grafinė kalba, kažkiek panaši į kontaktų plano programavimo kalbą, vietoje relių čia naudojami funkciniai blokai. Diagramos tikslas – vaizduoti valdymo algoritmą loginių

funkcijų sekomis. Loginės funkcijos diagramoje vykdomos iš kairės į dešinę, funkcinį bloką diagramą sudaro šie elementai: horizontalios linijos - jungiančios du elementus ir perduodančios kairėje pusėje esančio elemento išėjimo būseną į dešinės pusės elemento įėjimą; vertikalios linijos- jungiančios horizontalias linijas; kintamieji, kuriais yra pradamos ir baigiamos loginių signalų sekos; funkcijos ir funkciniai blokai.



2 pav. Funkcinių bloką diagramos pavyzdys pateiktas

Ši diagrama yra sudaryta iš tokių elementų: stačiakampiai blokai ir valdymo srautų komandos, sujungtos horizontaliomis ir vertikaliosiomis linijomis. Laisvi blokai gali turėti prie jų prijungtus kintamuosius arba konstantas, įėjimai, išėjimai gali būti ir neprijungti. Kodo dalis yra suskirstoma į grandines, kurias sudaro: grandinės pavadinimas; grandinės komentaras; grandinės grafikas.

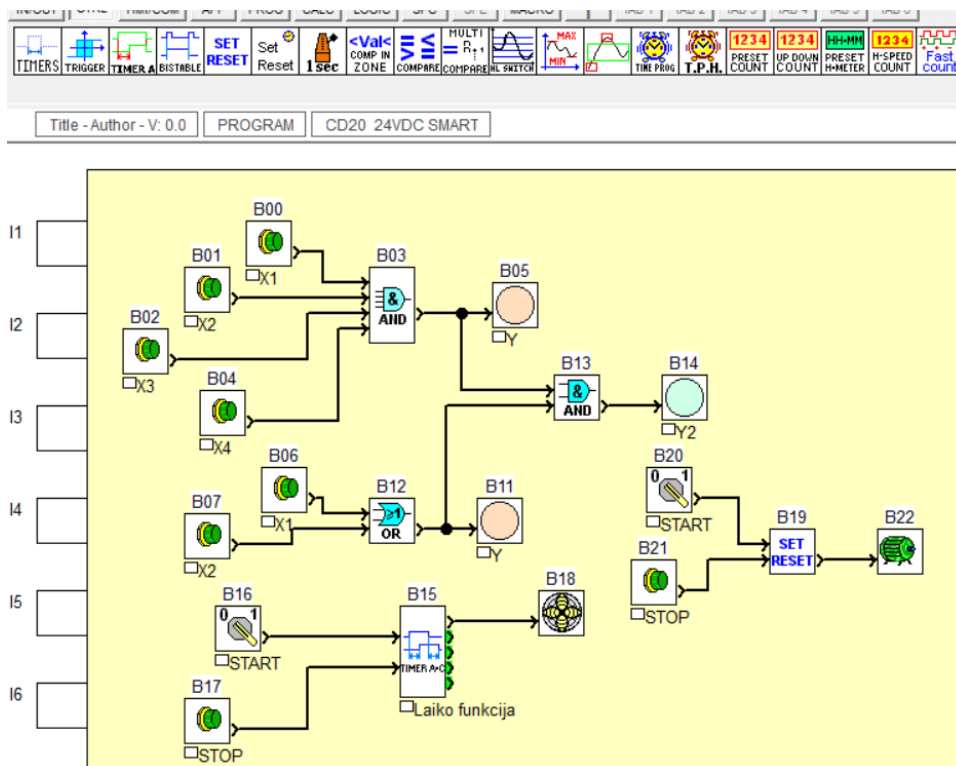
### Pasirengimas tyrimui.

Studentai dalyką išmoksta geriau tik tada, jei nėra tik pasyvūs informacijos priėmėjai, bet ir aktyviai dalyvauja mokymo/si veikloje. Aktyvūs mokymo/si metodai remiasi aktyvaus mokymosi strategijomis, kurios gali būti sukurtos pateikiant medžiagą pagal įvairių mokymosi stilių poreikius: kinestetinio bei lytėjimo mokymosi stiliaus studentams - per modelius ir praktinius darbus; vizualinio mokymosi stiliaus studentams - per modelius ir demonstracijas; girdimojo stiliaus studentams – per diskusijas, debatus, išsamius žodinius pasiaiškinius. Tyrimui atlikti sudarytas 3 paskaitų ciklo planas, pasirinkta tematika, metodai ir vertinimas.

**1 paskaita. Tematika:** Tarpiniai įtaisai, relės, jungimas. (Relių funkcijos, tipai, paskirtis, teigiamos neigiamos savybės, žymėjimas, schemotechnika). Taikomosios programos samprata. Naujos programos (PLV) demonstravimas. **Mokymo/si metodai:** Refleksija, dėstytojas užduoda klausimus, patikrina ką studentai žino. Studentai atsako į klausimus. Interaktyvi paskaita, paaiškinama ir parodoma įrangos veikimas, demonstruojat PLV programoje. Studentai kompiuteryje išbando programą, jos veikimą. Dėstytojas stebi veiklą, konsultuoja. **Vertinimas:** Apklausa žodžiu. Apklausos metu išsiaiškinama ką studentai jau žino apie dėstomos temos specifiką ir taikomųjų programų panaudojimą. Vertinama kaip studentas suprato veikimą, kaip sugeba paaiškinti įrenginių veikimo principus, kaip pagal pateiktą žodinį apibūdinimą, PLV programoje pasirenka reikiamą funkciją ir ją simuliuoja.

**2 paskaita. Tematika:** Logika automatikoje, judesio diagramos. (Apibendrinta automatizavimo schema, energetinės aplinkos, Logika mechatronikoje, kintamieji ir funkcijos, loginės grandinės, loginių elementų signalų formuotojai, nuosekli lygiagreti logika, judesio diagramos). **Mokymo/si metodai:** Refleksija, dėstytojas užduoda klausimus ir patikrina ką studentai žino. Interaktyvi paskaita, paaiškinami logikos automatikoje veikimo principai, demonstruojam PLV programoje. Studentai kompiuteryje išbando programą, jos veikimą. Dėstytojas stebi veiklą, konsultuoja. **Vertinimas:** Vertinamas pastabumas, kur loginės sistemos dalyvauja studentų aplinkoje. Kaip studentas geba rasti reikiamą funkcinį elementą PLV programoje, atlikti pasirinkimą ir atlikti pasirinkto elemento testavimą simuliacijoje. Kaip gali įvertinti gautus rezultatus pagal gautą užduotį ir teisingą sistemos veikimą.





3 pav. Atliktos užduoties pavyzdys

**3 paskaita. Tematika:** Praktinis darbas. Laiko, loginių funkcijų testavimas pagal užduotis PLV programoje. **Mokymo/si metodai:** Refleksija. Studentai atsako į klausimus apie praeitų temų turinį. Praktinė veikla. Studentai savarankiškai ar komandoje atlieka pateiktas užduotis, analizuoja kaip veikia sistema, pateikia ataskaitas vertinimui. **Vertinimas:** Klausimai žodžiu. Vertinamas aktyvumas, atsakymų tikslumas. Vertinama užduoties atlikimo tvarka. Įvertinamas studento supratimas ir suvokimas, kam tikslingai yra naudojami testuojami grandinių elementai praktikoje. Studentai įvertina savo darbą lygindami su kolegės darbu, taiso klaidas. Vertinama kaip studentas dalijasi informacija su kitais, taip spendžiama ar jis suprato ir įsisavino žinias.

### Pasiekimai ir identifikuotos problemos

Paskaitose pavyko: atlikus valdiklio taikomosios programos demonstravimą sudominti ir motyvuoti studentus; paskaitų temos ir uždaviniai dalinai įgyvendinti; studentams pavyko atlikti pateiktas užduotis, sudaryti valdymo grandinių testuojamas schemas valdiklio programoje. Puikiai pavyko paskaitų dalys, kai buvo demonstruojamos taikomosios programos galimybės, tai labai sudomino studentus, buvo įsitikinta, kad jos galimybės pritaikomos vaizdžiai pademonstruoti ir paaiškinti teorinius teiginius ir paaiškinimus.

Problema – laikas, prarasta daug paskaitų laiko diskusijoms, studentai pageidavo toliau dirbti su valdiklio programa, studentus domino kitos programos galimybės.

Tikrinant ir vertinant kaip studentai įsisavino teoriją, pateikus žodinį valdymo gandinės apibūdinamą vertintą, kaip studentas programoje pasirenka reikiamus sudaromos gandinės elementus. Pastebėta, jog yra skirtingas formalios užduoties supratimas. Kai kuriems studentams reikalingas papildomas paaiškinimas, tai sietina su skirtingomis bendromis žiniomis. Sprendimas: sudarius galimybę studentams dirbti komandomis, leidžiama patiems aiškintis ir atlikti užduotis grupėje.

Apžvelgiant įgytą patirtį paskaitų metu, galima teigti, jog naudojant pasirinktą taikomąją programą skirtą valdikliui, studentui lengviau įgyti perkeltinius gebėjimus, suprasti valdymo elementų paskirtį. Atliekant praktines užduotis ugdomi praktiniai gebėjimai tyrinėti ir analizuoti valdymo grandines, praktiškai išbandoma, kaip signalai susiję su komutacijos aparatais ir skirtinga veikimo logika, jų paskirtimi valdymo logikoje.

### Išvados

- Apžvelgiant šaltinius apie teorinių taikomųjų programų taikymą paskaitose pastebėta, kad kolegijoje yra galimybė naudoti nemokamas taikomąsias programas, ir taip geriau motyvuoti studentus mokytis. Studentams jau žinomas taikomąsias programas pritaikius kitose paskaitose galima pagerinti praktinių žinių įsisavinimą, pagreitinti numatytų praktinių darbų atlikimą, tuo padidinant jų skaičių kiekvienam studentui.

- Apžvelgus programos Millenium M3 programinio paketo galimybes nustatyta, kad siekiant kolegijoje neinvestuojant lėšų tai gali būti įrankis, savarankiškam ir nuotoliniam mokymui/si, vedant nuotolines teorijos paskaitas.

- Atlikus analizę, apibendrinant refleksijas ir įvertinant rezultatus išsiaiškinta, jog papildomai su numatytomis standartinėmis automatikos pagrindų schemotechnikos jungimo ir elementų panaudojimo užduotimis naudojant Millenium M3 programą studentai geriau suprato ir praktiškai įsisavino teorijos žinias. Studentai šias žinias pritaikė tolimesniame, gilesniame automatikos dalyko studijavime, atlikdami praktinius darbus laboratorijoje, studijuodami kitus modulius.

#### Literatūra

1. Kardelis, K., (2005). *Mokslinių tyrimų metodologija ir metodai: (edukologija ir kiti socialiniai mokslai)*: vadovėlis 3-iasis leid., Šiauliai: Lucilijus.
2. Kemmis, S. and McTaggart, R. (2005) Participatory Action Research: Communicative Action and the Public Sphere. In: Denzin, N. and Lincoln, Y., Eds., *The Sage Handbook of Qualitative Research*, 3rd Edition, Sage, Thousand Oaks, 559-603.
3. Manzke, H. (2017). Ketvirtoji pramonės revoliucija: technologijos jau yra, bet švietimas dar tik vejasi. *15 min.* [interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. balandžio 16 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.15min.lt/naujiena/aktualu/svietimas/ketvirtoji-pramones-revoliucija-technologijos-jau-yra-bet-svietimas-dar-tik-vejasi-233-794960>
4. Crouzet Mechatronic components for demanding industries [interaktyvus]. [žiūrėta 2024 m. balandžio 16 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.crouzet.com/products/automation-controllers/millenium-3/>

### STUDY OF APPLICATION OF PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER PROGRAM FOR REMOTE AND SELF-TRAINING OF CONTROL CIRCUITS IN ELECTRICAL ENERGY PROGRAM

#### Summary

The expected outcome for the students at Kaunas University of Applied Engineering Sciences is to study and learn the theoretical knowledge of logic and relay systems used in mechatronics as well as to acquire practical skills. This paper analyses and discusses the concept of joining the topics of the planned program with the applications of controllers in the study of automation and mechatronics, this way integrating their use in the teaching/learning process. A review of the theoretical and practical possibilities of using PLC applications for teaching purposes at university has shown that it is possible to use freely distributed PLC applications without investing in additional licenses for special paid-for applications. The study and review of the lectures suggest that using the chosen controller application in individual mechatronics lectures makes acquiring the transferable skills and understanding the purpose of the control elements easier. By conducting virtual simulations, practical abilities to study and analyse control circuits are developed. In addition, how signals are related to switching devices and different operating logics, their purpose in control logic is tested in practice.

**Key words:** controller, application, performance analysis.

#### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Valdas Paulauskas.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** Magistras.

**Darbo vieta ir pozicija:** Kauno technikos kolegija, lektorius.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** Technologijos mokslai, Valdymo inžinerija.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** +370 611 66204, [valdas.paulauskas@edu.ktk.lt](mailto:valdas.paulauskas@edu.ktk.lt)

#### A COVER LETTER OF AUTHORS

**Author name, surname:** Valdas Paulauskas.

**Science degree and name:** Master Degree.

**Workplace and position:** Kaunas University Of Applied Engineering Sciences, Lecturer.

**Author's research interests:** Technological Sciences, Control engineering.

**Telephone and e-mail address:** +370 611 66204, [valdas.paulauskas@edu.ktk.lt](mailto:valdas.paulauskas@edu.ktk.lt)

# ELEKTROMAGNETINĖS LEVITACIJOS TAIKYMAS APŠVIETIMO SISTEMOSE

Edgard Aleinikov

Vilnius Tech

## Anotacija

Elektromagnetinės levitacijos panaudojimas kasdieninio naudojimo įrenginiuose sparčiai vystosi. Netgi apšvietimo sistemose yra panaudojamas elektromagnetinės levitacijos principas. Levitacija yra atliekama elektromagnetinės stūmos principu. Darbe išnagrinėtos kelios panašios elektromagnetinės levitacijos principu veikiančios sistemos, pateiktos jų apžvalgos ir atliktas palyginimas su projektuojama apšvietimo sistema. Aptartas sistemą sudarančių principinių schemų sudarymas, spausdintinių plokščių ir korpusų projektavimas. Atliktas suprojektuotos ir pagamintos apšvietimo sistemos testavimas ir pateiktos apšvietimo sistemos tobulinimo kryptys.

**Reikšminiai žodžiai:** apšvietimo sistema, belaidis elektros energijos perdavimas, BLE, Bluetooth Low Energy komunikacija, levitatorius, levituojantis objektas, nuotolinis valdymas, RŽM.

## Įvadas

Levitacija – iš lotynų kalbos „levitas“ – lengvumas (Collins English Dictionary, 2012), reiškiantis procesą, kurio metu objektas yra stabiliai palaikomas be papildomos mechaninės atramos. Remiantis Irnšou teorema (Earnshaw, 1842), statinių objektų levitacija statiniame elektromagnetiniame lauke yra neįmanoma. Ši teorema yra taikoma ne tik taškiniams krūviams, bet ir ištiestiems elastingiems krūviams ir teigia, kad laisva jų suspensija elektrostatiame, magnetostatiame ir (arba) gravitaciniame lauke visada bus nestabili. Tačiau yra įmanoma padaryti levitaciją realia, pavyzdžiui naudojant elektroninę stabilizaciją – elektromagnetus, kurie yra valdomi elektronikos. Elektromagnetinė levitacija leidžia objektui levituoti panaudojant elektromagnetus kartu su nuolatiniais magnetais. 1992 m. buvo išduotas patentas US5168183A (Whitehead, 1992). „Levitation Arts“ elektromagnetinės levitacijos technologijos (virš platformos) prekės ženklas yra „Levitron®“ ir šiuo metu yra saugomos dviem pagrindiniais JAV patentais, kurių papildomi patentai yra išduoti arba laukiami daugiau nei trisdešimtyje šalių. Šis intelektinės nuosavybės objektas šiuo metu apima beveik visas žinomas komercines elektromagnetinės levitacijos technologijas. Levitronas tai yra prietaisas, kuris užtikrina objekto levitaciją tik nuolatinių magnetų dėka. Levituojantis objektas turi pritvirtintą žiedinį nuolatinį magnetą, kuris privalo sukstis virš platformoje esančio didesnio skersmens magnetinio žiedo. Levituojantis objektas privalo sukstis tam, kad išvengtų magneto apsivertimo ir nukritimo. Šio įtaiso trūkumas yra tas, kad levituojančio objekto sukimosi laikas yra apribotas dėl objekto trinties su oru, taigi ir levitacija laikui bėgant nutrūksta ir objektas nukrenta. Tuo tarpu levitatorius yra bet koks prietaisas, kuris užtikrina ilgalaikę objekto levitaciją virš platformos, stabilizuojant objekto padėtį elektronikos pagalba.

Pagrindinės rinkoje sutinkamų levitatorių panaudojimo sritys yra tokios:

- žaislai ir žaidimai;
- dovanos;
- naujovė, kolekcionuojamai daiktai;
- dekoracijos;
- lempos, naktiniai žibintai/šviestuvai;
- belaidės kolonėlės, belaidis įtaisų krovimas;
- iliuzija, triukai;
- reklama;
- meno eksponatai;
- įvairios įmonių instaliacijos.

Taigi, iš panaudojimo sričių sąrašo matyti, kad levitatoriaus pagrindinės panaudojimo sritys yra kūrybinėje industrijoje ir pramogų inžinerijoje.

Šiame straipsnyje yra atlikta analogiškų sistemų apžvalga. Taip pat yra aptariama suprojektuota ir sukurta levituojanti ir nuotoliniu būdu valdoma RŽM spalvų modelio apšvietimo sistema. Sistemą sudaro platforma, užtikrinanti elektromagnetinę magneto levitaciją, belaidžio elektros energijos perdavimo sistema bei mikrovaldiklinis įtaisas su integruotu belaidžiu *Bluetooth* ryšiu. Toliau pateikiami suprojektuotos apšvietimo sistemos parametrai:

- levitacija yra vykdoma su neodimio nuolatiniais magnetais, o levituojantis magnetas yra stabilizuojamas ir palaikomas platformos centre elektromagnetinės stūmos principu;
- visa sistema yra maitinama nuo kintamosios 220 V maitinimo įtampos elektros tinklo;
- Holo jutiklių maitinimo įtampa yra nuolatinė 5 V;
- Holo jutiklių pirminio operacinio stiprintuvo maitinimo įtampa yra dvipolė  $\pm 12$  V;

- belaidžio energijos perdavimo schemos maitinimo įtampa yra nuolatinė (5 – 12) V;
- yra panaudotas ypač mažos vartojamosios galios STM šeimos mikrovaldiklis;
- nuotolinis duomenų perdavimas yra įgyvendintas panaudojant *Bluetooth* belaidį ryšį;
- nuotolinis valdymas yra įgyvendintas išmaniuoju telefonu;
- magneto levitaciją užtikrinanti platforma yra patalpinta į korpusą ir visos įrenginio elektroninės dalys yra apsaugotos nuo tiesioginio kontakto su naudotoju.

Pagrindinė suprojektuotos sistemos dalis yra platforma, kurioje esantys nuolatiniai magnetai kartu su trimis elektromagnetų poromis užtikrina elektromagnetinę levituojančio objekto (su patalpintu nuolatinio magnetu) levitaciją. Platformos maitinimas yra užtikrinamas keičiant kintamąją 220 V tinklo įtampą į nuolatinę dvipolę 12 V įtampą. Į platformą yra papildomai integruota belaidžio elektros energijos perdavimo sistema, kuri elektromagnetinės indukcijos dėka užtikrina levituojančiame objekte esančios schemos maitinimą. Kuriant sistemą reikia labai kruopščiai pasirinkti levituojančio objekto mikrovaldiklį, nes jis turi būti maitinamas belaidžiu būdu. Toks energijos perdavimo būdas nėra labai efektyvus, ypač kai energija yra perduodama dideliu atstumu. Mūsų sistemos atveju šis atstumas yra nuo 2 cm iki 20 cm. Atsižvelgus į sistemos reikalavimus buvo pasirinktas STM32WB55 serijos mikrovaldiklinis įtaisas, kuris yra ypač mažo energijos suvartojimo bei su integruotu belaidžiu *Bluetooth* ryšiu, kuris užtikrina RŽM šviesos diodo spalvų valdymą išmaniuoju telefonu. Kuriamai apšvietimo sistemai suteiktas LeviLamp pavadinimas, kuris susideda iš žodžių aprašančių įtaiso esmę ir pagrindines konstrukcijos dalis (angl. *Levitating Lamp*).

**Darbo tikslas** – aptarti elektromagnetinės levitacijos taikymą apšvietimo sistemose ir aptarti suprojektuotą ir pagamintą LeviLamp apšvietimo sistemą.

**Darbo uždaviniai:**

- Atlikti analogiškų sistemų apžvalgą.
- Suprojektuoti levituojančią apšvietimo sistemą.
- Ištestuoti suprojektuotą ir pagamintą apšvietimo sistemą.






**Analogiškų sistemų apžvalga**

Atlikus analogiškų sistemų analizę išsiaiškinta, kad šiuo metu rinkoje šie gaminiai turi didelę naudotojų paklausą, kadangi žmonės vis labiau domisi naujovėmis ir nori atrakcijos, kažko neįprasto ir naujo. Paminėtų sistemų (žr. 1 lentelę) analizės metu buvo atkreiptas dėmesys į jų pranašumus ir trūkumus. Pagrindiniai pranašumai yra tie, kad yra panaudoti energiją taupantys šviesos diodai, kurie užtikrina energijos taupymą. Taip pat vertas dėmesio dalykas – tai belaidis energijos perdavimas iš platformos į levituojantį objektą, kuris yra įgyvendintas Apple (Puskarich, 2018) ir Flyte (Flyte, 2020) patentuose. Toks energijos perdavimo būdas didesniu atstumu šiuolaikinėje visuomenėje vis dar nėra įprastas reiškinys, kuris sugeba atkreipti daugelio naudotojų dėmesį. Pagrindinis šių sistemų trūkumas yra mažas funkcionalumas. Tiek Apple patento, tiek Story gaminio atvejais funkcionalumas yra padidintas, nes yra galimybė įrenginio parametrus nustatyti išmaniojo telefono arba atskiro kompiuterio pagalba. Išanalizavus šias analogiškas sistemas buvo galutinai nuspręsta dėl tam tikrų projektuojamos LeviLamp sistemos parametrų ir sudedamųjų dalių. Analizuojant analogiškų įrenginių konstrukcijas, buvo nutarta projektuojamoje sistemoje panaudoti 6 elektromagnetus, kurie yra jungiami poromis. Be to, šioje konstrukcijoje yra panaudoti optiniai jutikliai levituojančio objekto stabilizavimui horizontalioje plokštumoje, tačiau mūsų atveju vietoj optinių jutiklių yra panaudoti magnetinio lauko – Holo jutikliai. Taip pat nuspręsta panaudoti stačiakampius nuolatinis magnetus ir juos vienodu atstumu nuo platformos centro tam, kad užtikrinti kuo didesnę levituojančio objekto stabilumą vertikaloje plokštumoje. Nuspręsta pasinaudoti elektromagnetinės indukcijos dėsnio ir tokiu būdu užtikrinti levituojančio objekto schemos maitinimą. Sekant Story – levituojančio laikrodžio pavyzdžiu, buvo nuspręsta panaudoti *Bluetooth* ryšį ir buvo sukurta programa išmaniajam telefonui tam, kad būtų galimybė valdyti RŽM šviesos diodo spalvas. Išanalizavus RAB Flyte sukurtos programos funkcionalumą buvo sukurta programa, kurioje yra galimybė pasirinkti tam tikrus spalvų modelius ir yra galimybė įjungti atskiras pavienes spalvas.

1 lentelė

**Analogiškų sistemų palyginimas**

Gaminys	Maitinimas	Belaidis energijos perdavimas	<i>Bluetooth</i> ryšys	Platformos pozicionavimas
Levitation Arts lempa (Levitation Arts, 2020)	120 V	-	-	tik horizontaliai

Gaminys		Maitinimas	Belaidis energijos perdavimas	Bluetooth ryšys	Platformos pozicionavimas
Flyte (Flyte, 2020)		100 V – 240 V	yra	-	tik horizontaliai
Lyfe (Flyte, 2020)		100 V – 240 V	-	-	tik horizontaliai
Story (Flyte, 2020)		100 V – 240 V	-	yra	horizontaliai arba vertikaliai
LG PJ9 (LG Electronics, 2020)		100 V – 240 V	yra	yra	tik horizontaliai
LeviLamp		220 V – 240 V	yra	yra	tik horizontaliai

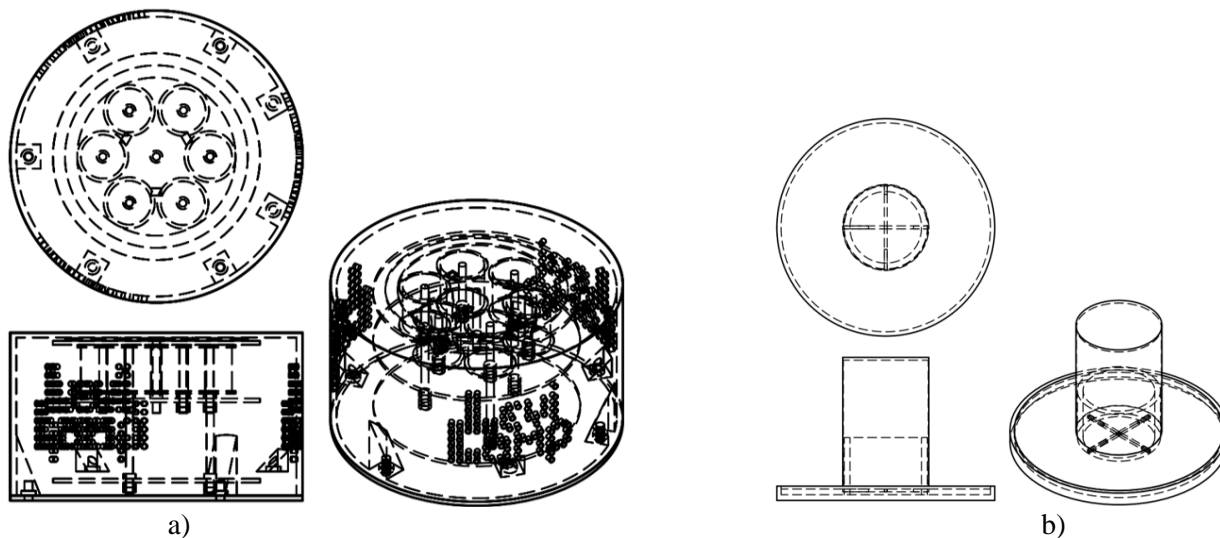
Šaltinis: sudaryta autoriaus

### Apšvietimo sistemos projektavimas ir testavimas

Suprojektuotą RŽM spalvų modelio apšvietimo sistemą sudaro dvi dalys: levitatorius – platforma ir pats levituojantis objektas. Tarpusavyje šios dvi dalys yra susietos tuo, kad tarp jų yra kryptingas elektromagnetinis laukas, skirtas belaidžiam energijos perdavimui. Taip pat šios dvi dalys tarpusavyje sąveikauja magnetiniu ir elektromagnetiniu laukais tam, kad galima būtų stabilizuoti ore levituojantį objektą. Šis levituojantis nuolatinis magnetas yra palaikomas platformos centre elektromagnetinės stūmos principu. Levituojančio nuolatinio magneto pozicijos pasikeitimai yra aptinkami Holo jutikliais, kurie į pirminius stiprintuvus yra pajungti diferenciniu būdu. Antriniai stiprintuvai valdo elektromagnetų poras atitinkamai pagal gautus iš Holo jutiklių bei sustiprintus signalus. Elektromagnetų poros yra pajungtos tokiu būdu, kad sukurtų priešingos krypties elektromagnetinius laukus, tai yra, kad vienas elektromagnetas pritrauktų levituojantį magnetą, o kitas – atstumtų. Levituojančio objekto schemas maitinimas yra užtikrinamas belaidžiu energijos perdavimu. Aukštų dažnių generatorius prisitaiko prie esančios maitinimo įtampos ir automatiškai keičia impulsų dažnį diapazone nuo 0 MHz iki 5 MHz, tokiu būdu užtikrinant didesnę energijos perdavimo efektyvumą. Belaidžio energijos perdavimo imtuvo ritės išėjimuose yra gaunama 5 V -12 V įtampa, kuri įtampos keitiklio dėka yra pakeičiama į nuolatinę 3,3 V įtampą. Šia stabilizuota įtampa yra maitinamas itin mažo energijos suvartojimo STM32WB55 šeimos mikrovaldiklis su integruotu Bluetooth (STMicroelectronics, 2019) ir RŽM šviesos diodas su integruotu skaitmeniniu gaunamo signalo dešifраторiumi. RŽM šviesos diodo švietimo spalvos yra valdomos programoje išmaniajame telefone. Pasirinkus atitinkamą spalvą STM32WB55 mikrovaldiklyje yra



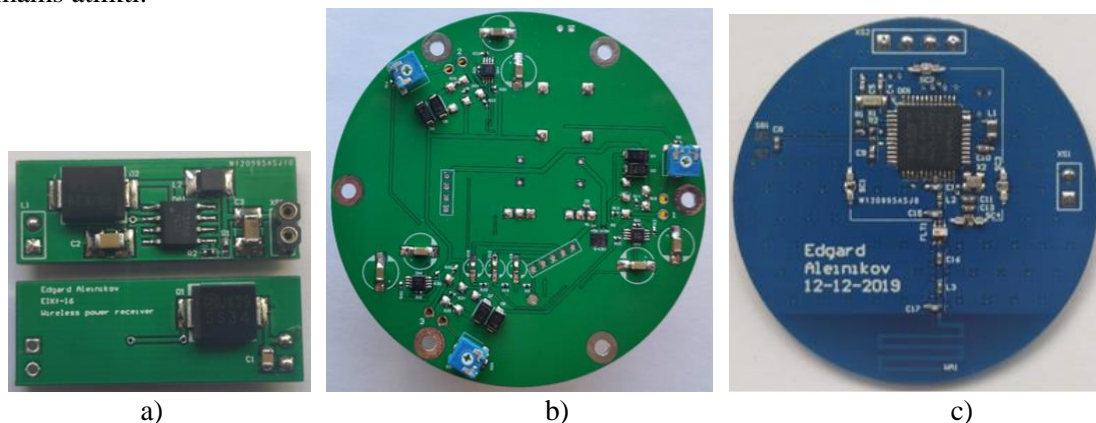
formuojamas 24 bitų signalas, kuris RŽM šviesos diodo dešifratore atitinkamai dalinamas į tris 8 bitų dalis žaliai, raudonai ir mėlynai spalvoms valdyti. Programoje išmaniajame telefone yra galimybė pasirinkti spalvų modelius (visos, šiltos arba šaltos spalvos) arba pavienes spalvas.



**1 pav.** RŽM spalvų modelio apšvietimo sistemos platformos brėžinys ir b) levituojančio objekto brėžinys  
Šaltinis: sudaryta autoriaus

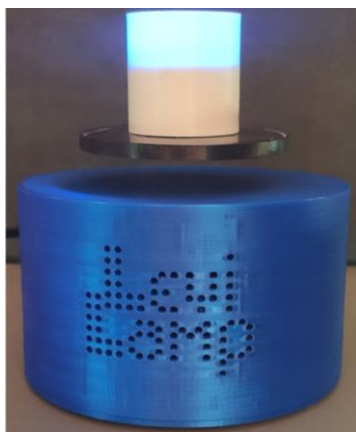
Būtina prisiminti, kad virš platformos negali būti jokių metalinių elementų arba daiktų, nes jie bus pritraukiami prie nuolatinių magnetų ir tai trukdys sistemai tinkamai funkcionuoti. Todėl levitatoriaus platformos korpusas, levituojančio objekto korpusas ir elektromagnetų formos yra pagaminti 3D spausdintuvu iš PLA (angl. *polylactic acid*) plastiko. 1 a paveiksle yra pateikiamas levitaciją užtikrinančios platformos brėžinys, o 1 b paveiksle yra pateikiamas levituojančio objekto brėžinys.

Spausdintinės plokštės yra suprojektuotos pasinaudojant „*Altium Designer*“ programų paketu. Visos suprojektuotos plokštės yra dviejų sluoksnių (žr. 2 pav.). Komponentų išdėstymo plokštės (žr. 2 (b) pav.) viršutiniame sluoksnyje yra suprojektuota maitinimo įtampos keitimo grandinė. Apatiniame sluoksnyje yra išdėstyti pirminiai operaciniai stiprintuvai. Tam, kad palengvinti levitaciją užtikrinančios platformos kalibravimą, paderinami rezistoriai irgi išdėstyti apatiniame plokštės sluoksnyje. Taip pat, kalibravimo proceso metu atliekamiems matavimams palengvinti, yra numatytos didesnio skersmens kiaurymės testuojamų dydžiu matavimams atlikti.



**2 pav.** Pagamintos ir sulituotos spausdintinės plokštės: a) belaidžio energijos perdavimo imtuvas, b) levitaciją užtikrinančios platformos komponentų išdėstymo plokštė, c) levituojančio objekto plokštė  
Šaltinis: sudaryta autoriaus

Mikrovaldiklis kartu su visa periferija (žr. 2 (c) pav.) yra papildomai uždengtas ekranu, kuris yra sujungtas su žemės (GND) signalu. Ekranas yra skirtas apsaugoti nuo elektromagnetinių trikdžių. Taip pat remiantis (STMicroelectronics, 2019) dokumentacija meandro formos antena yra projektuojama tame pačiame sluoksnyje, kuriame yra ir mikrovaldiklis. Šios antenos dėka yra užtikrinama stabilus *Bluetooth* ryšys.



**3 pav.** Suprojektuota ir pagamanta LeviLamp apšvietimo sistema  
Šaltinis: sudaryta autoriaus

Suprojektuota, pagaminta ir ištestuota apšvietimo sistema yra parodyta 3 pav. Nuotraukoje yra matyti dvi pagrindinės LeviLamp apšvietimo sistemos sudedamosios dalys, tai yra, levitaciją užtikrinanti platforma ir levituojantis objektas su integruotu RŽM spalvų modelio šviesos diodu. Buvo ištestuoti pagrindiniai parametrai, kurie buvo užsibrėžti prieš projektuojant apšvietimo sistemą. Atlikus šiuos testavimus buvo įsitikinta, kad suprojektuota sistema atitinka visus iškeltus reikalavimus. Suprojektuotos sistemos išmatuotas levituojančio objekto levitacijos aukštis yra 20 mm, tačiau šis parametras tiesiogiai priklauso nuo nuolatinių magnetų kiekio platformoje. Levitacijos aukštį galima didinti arba mažinti atitinkamai didinant arba mažinant nuolatinių magnetų kiekį. Iš nuotraukos taip pat yra matyti, kad apšvietimo sistemos naudotojas yra visiškai apsaugotas nuo tiesioginio kontakto su bet kokiomis elektroninėmis sistemos dalimis. Apsauga yra įgyvendinta atskirai patalpinant į plastikinius korpusus kiekvieną sistemos dalį: levitaciją užtikrinančią platformą ir levituojantį objektą.

**2 lentelė**

**Įtampų matavimo rezultatai ir jų leistinos kitimo ribos**

Parametras	Reikalaujama įtampa, V	Išmatuota įtampa, V	Leidžiamas įtampos diapazonas, V
Kintamoji sistemos maitinimo įtampa	220	221,20	207–253
Holo jutiklių maitinimo įtampa	5	5,0697	4,5–10,5
Pirminių operacinių stiprintuvų dvipolė maitinimo įtampa	±12	+12,143 –12,445	nuo ±1,35 iki ±18
Belaidžio elektros energijos perdavimo siųstuvo schemos maitinimo įtampa	5–12	5,0697	3–15

Šaltinis: sudaryta autoriaus

Remiantis atliktais testavimais ir įvertinus gamintojų pateiktus leidžiamus įtampų svyravimo diapazonus galime teigti, kad sistema funkcionuoja teisingai (žr. 2 lentelę). Taip pat matome, kad išmatuotos įtampų reikšmės tenkina dydžius, kurie buvo užsibrėžti prieš projektuojant apšvietimo sistemą.

**Išvados**

1. Atlikta analogiškų sistemų apžvalga. Atlikus analogiškų sistemų apžvalgą buvo apibrėžtas planuojamas projektuojamos LeviLamp sistemos funkcionalumas. Nutarta sukurti sistemą, kurią sudaro du pagrindiniai moduliai: levitaciją užtikrinanti platforma su belaidžio elektros energijos perdavimo schema ir levituojantis objektas.

2. Sudarytos LeviLamp apšvietimo sistemos struktūrinė ir principinė elektrinės schemos. Struktūrinė schema susideda iš dviejų pagrindinių dalių: levituojančio objekto ir levitaciją užtikrinančios platformos. Levituojančio objekto schemoje yra panaudotas ypač mažos vartojamosios galios STM32WB55 šeimos mikrovaldiklis su integruotu BLE.

3. „Altium Designer“ programų paketu sudarytos apšvietimo sistemos spausdintinės plokštės. Levitaciją užtikrinančios platformos spausdintinių plokščių skersmuo yra 85 mm, levituojančio objekto spausdintinės plokštės skersmuo yra 40 mm., o įtampos keitiklio spausdintinės plokštės matmenys yra 11,5 mm × 31 mm.

4. „STM32CubeMX“ ir „AtollicTrueSTUDIO“ programų paketais sudaryti levituojančio objekto programos algoritmai. „MIT App Inventor 2“ programų paketu sukurta programa LeviLamp apšvietimo



sistamai valdyti išmaniuoju telefonu. Programoje galima pasirinkti vieną iš trijų spalvų rinkinių režimų arba vieną iš dvylikos pavienių spalvų.

5. Pagamintos LeviLamp apšvietimo sistemos dalys patalpintos į „Autocad“ programų paketų suprojektuotus ir 3D spausdintuvu atspausdintus korpusus.

6. Ištestavus apšvietimo sistemą yra gauti toliau paminėti matavimų rezultatai. Sistemos maitinimo įtampa yra kintamoji 221,20 V, o belaidžio energijos perdavimo schemos maitinimo įtampa yra nuolatinė 5,0697 V. Holo jutiklių maitinimo įtampa yra nuolatinė 5,0697 V, o Holo jutiklių pirminio operacinio stiprintuvo maitinimo įtampa yra: +12,143 V, –12,445 V. Taip pat yra išmatuotas levitacijos aukštis, kuris yra 20 mm.

### Literatūra

1. *Collins English Dictionary. Complete & Unabridged 2012 Digital Edition*. 2012 m. [interaktyvus]. [Žiūrėta: 2020 01 02]. Prieiga per internetą: <https://www.dictionary.com/browse/levitate>.
2. Earnshaw, Samuel. 1842 m.. On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether. *Trans. Camb. Phil. Soc.* 7: pp. 97—112.
3. Whitehead, Lorne A. R. *United States Patent US5168183A*. 1992 m. [interaktyvus]. [Žiūrėta: 2020 01 02]. Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US5168183A/en>.
4. Levitation Arts Inc. 2020 m. [interaktyvus]. [Žiūrėta: 2020 01 10]. Prieiga per internetą: <https://levitationarts.com/product/single-levitating-lamp/>.
5. Flyte. 2020 m. [interaktyvus]. [Žiūrėta: 2020 01 15]. Prieiga per internetą: <https://flytestore.com/>.
6. Puskarich, P., Della Silva, C. D., Schwallbach, Ch. A., Kumka, D. S., Weidner, A., Mustafa, P., Gery, J. M. *United States Patent US9979259B2*. 2018 m. [interaktyvus]. [Žiūrėta: 2020 01 02]. Prieiga per internetą: <https://patents.google.com/patent/US9979259B2/en>.
7. LG Electronics. 2020 m. [interaktyvus]. [Žiūrėta: 2020 01 17]. Prieiga per internetą: <https://www.lg.com/ae/portable-speakers/lg-PJ9>.
8. STMicroelectronics. *Usage of SMPS on SMT32WB55 series microcontrollers*. 2019 m. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020 05 07]. Prieiga per internetą: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00556293-usage-of-smps-on-stm32wb-series-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00556293-usage-of-smps-on-stm32wb-series-microcontrollers-stmicroelectronics.pdf)
9. STMicroelectronics. *Low cost PCB antenna for 2,4 GHz radio: meander design for SMT32WB Series*. 2019 m. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020 05 07]. Prieiga per internetą: [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00470410-low-cost-pcb-antenna-for-24ghz-radio-meander-design-for-stm32wb-series-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00470410-low-cost-pcb-antenna-for-24ghz-radio-meander-design-for-stm32wb-series-stmicroelectronics.pdf)

## APPLICATION OF ELECTROMAGNETIC LEVITATION IN LIGHTING SYSTEMS

### Summary

The use of electromagnetic levitation in everyday devices is developing rapidly. Even lighting systems use the principle of electromagnetic levitation. Levitation is performed on the principle of electromagnetic propulsion. In the work, several similar systems operating on the principle of electromagnetic levitation are analyzed, their overviews are presented and a comparison with the designed lighting system is made. Compilation of schematic diagrams that make up the system, design of printed circuit boards and housings are discussed. Testing of the designed and manufactured lighting system was performed and directions for improvement of the lighting system were presented.

**Key words:** BLE, Bluetooth Low Energy communication, levitating object, levitator, lighting system, RGB, wireless control, wireless power.

### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Edgard Aleinikov.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** magistras.

**Darbo vieta ir pozicija:** UAB “Lilit”, mokslo darbuotojas.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** elektronikos inžinerija.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** +37067068999, edgard.a@lilit.com

### A COVER LETTER OF AUTHORS

**Author name, surname:** Edgard Aleinikov.

**Science degree and name:** Master’s degree.

**Workplace and position:** JSC “Lilit”, researcher.

**Author’s research interests:** electronics engineering.

**Telephone and e-mail address:** +37067068999, [edgard.a@lilit.com](mailto:edgard.a@lilit.com)

# DIDELIO EFEKTYVUMO DOHERTY GALIOS STIPRINTUVO PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Erik Mickevič, Vaidotas Barzdėnas, Andžej Borel  
Vilnius Tech

## Anotacija

Šiuo metu belaidžio ryšio srityje naudojamos sudėtingos moduliacijos schemos, kad būtų pasiekta didelė duomenų perdavimo sparta. Tačiau dėl amplitudės moduliacijos įprasti stiprintuvai didelę laiko dalį veikia žemiau maksimalios galios, o dėl to mažas jų efektyvumas. Šiai problemai spręsti, šiame straipsnyje tiriama Doherty galios stiprintuvo architektūra. Šiame darbe, naudojant *Keysight ADS* programinę įrangą, sumodeliuotas Doherty stiprintuvas, kurio efektyvumui padidinti naudojamas harmonikų suderinimas ir mažų nuostolių PTFE (angl. polytetrafluoroethylene) spausdintinės plokštės laminatas. Sumodeliuoto stiprintuvo išėjimo galia siekia 36 dBm ir 65 % efektyvumą. 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 52 %. Išmatavus pagamintą stiprintuvą gauti tokie parametrai: 34,7 dBm išėjimo galia ir 63,8 % efektyvumas, o 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Palyginus su įprasto AB klasės stiprintuvo efektyvumu, pagamintas Doherty stiprintuvas turi apie 6,6 % geresnį efektyvumą.

**Reikšminiai žodžiai:** aukštadažniai grandynai, matavimai signalų analizatoriumi, Doherty galios stiprintuvas, spausdintinė plokštė, stiprintuvo projektavimas.

## Ivadas

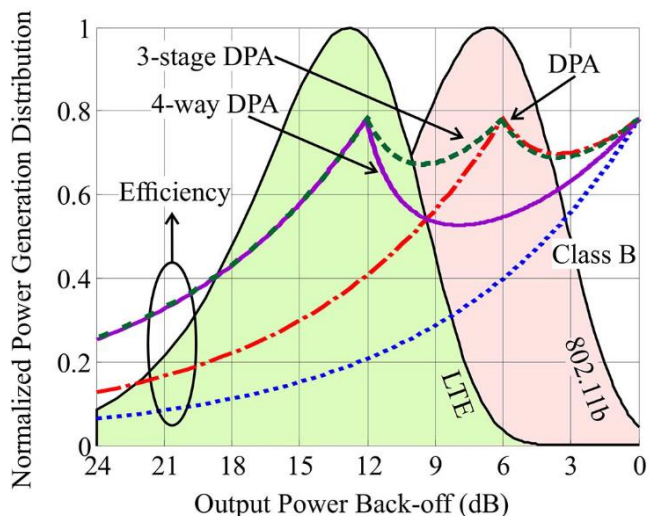
Visuotinis belaidžio ryšio sprendimų integravimas į kasdienį gyvenimą reikalauja nuolatinio belaidžio ryšio infrastruktūros tobulinimo. Pastaruoju metu vis labiau didėja perduodamų duomenų srauto poreikis dėl to, kad plečiasi daiktų internetas, populiarėja vaizdo transliacijos ir daugėja belaidžio ryšio naudotojų. Tam, kad būtų tenkinami belaidžio ryšio spartos reikalavimai, jau nuo 3G mobiliojo ryšio naudojimo pradžios ir dabar naudojamos ne tik fazės ar dažnio moduliacijos schemos, bet ir amplitudės moduliacija (Xia, 2013) (Nasri, 2021). Šiuolaikinės sudėtingos moduliacijos, pavyzdžiui OFDM (angl. orthogonal frequency division multiplexing) ir QAM (angl. quadrature amplitude modulation), išsprendžia spartos problemą, bet sukuria naujas. Signalai, kuriems taikomos minėtos moduliacijos, turi svarbų parametą, vadinamą PAPR (angl. peak to average power ratio) – signalo didžiausios ir vidutinės galios santykiu. Įprastai šiuolaikinių signalų PAPR yra tarp 6 dB ir 12 dB, bet gali būti ir didesnis, o ateityje gali dar didėti (Camarchia, 2015). Dėl šio santykio atsiranda belaidžio ryšio sistemų tiesiškumo ir efektyvumo problema. Įprastai didinant vieną iš šių parametru, kitas prastėja. Vis tik tiesinis veikimas yra labai svarbus, nes dėl signalo iškraipymų gali būti prarasta amplitudėje užkoduota informacija, didėja klaidų skaičius perduodamoje informacijoje, dalis signalo galios nuteka į gretimų dažnių juostas. Visa tai yra nepageidautina ir reguliuojama tam tikrais standartais, todėl įprastai belaidžio ryšio sistemos pasižymi geru tiesiškumu, bet prastu efektyvumu.

Belaidžio ryšio sistemose daugiausiai energijos suvartojanti dalis yra galios stiprintuvas. Galios stiprintuvo paskirtis yra sustiprinti signalą prieš jį paduodant į kitą sistemos bloką, pavyzdžiui, anteną. A, AB ir B klasių stiprintuvai iškraipo signalą mažiausiai, tačiau A klasės teorinis didžiausias efektyvumas yra 50 %, B klasės didžiausias efektyvumas siekia 78,5 %, o AB klasės efektyvumas yra tarp šių verčių. C ir kitų klasių stiprintuvai gali pasiekti teorinį efektyvumą iki 100 %, tačiau tokie stiprintuvai nėra tiesiniai. Visų stiprintuvų efektyvumas praktikoje įprastai yra mažesnis nei teorinis maksimumas. Taip yra dėl to, kad stiprintuvai dirba efektyviausiai, kai jų išėjimo galia yra artima įsisotinimo galiai, tačiau signalas ties šia galia yra iškraipomas. Todėl stiprintuvo projektavimo metu siekiama gero tiesiškumo ir efektyvumo parametru kompromiso.

Dėl prasto efektyvumo suvartojama daug daugiau elektros energijos, o tai yra ypač aktualu vykstant naujų belaidžio ryšio standartų, tokių kaip 5G, bazinių stočių plėtrai. Efektyvūs galios stiprintuvai taip pat labai svarbūs mobiliuosiuose įrenginiuose, kuriuose galios stiprintuvai yra vieni iš daugiausiai energijos vartojančių komponentų, nes kuo prastesnis efektyvumas, tuo trumpiau veikia įrenginys. Taip pat dėl prasto efektyvumo įtaisai šiluminiu būdu išsklaido daugiau galios, kuri gali neigiamai paveikti tiek pačio stiprintuvo, tiek aplinkui esančių komponentų veikimą. Todėl stiprintuvuose, kurių išėjimo galia didesnė nei keli vatai, dažnai reikalingas radiatorius. Tokie radiatoriai dažnai sudaro didelę įrenginio tūrio dalį, o tai irgi nepageidaujama.

Prasto efektyvumo problemai spręsti yra nagrinėjamos ir tiriamos specialios stiprintuvų architektūros. Vieni plačiausiai nagrinjamų yra Doherty galios stiprintuvai, dėl jų paprastesnio projektavimo ir įgyvendinimo lyginant su kitomis architektūromis, pavyzdžiui Chireix fazių skirtumo ir gaubtinės sekimo (Pengelly, 2016), (Singh, 2021). Vieni plačiausiai nagrinjamų yra Doherty galios stiprintuvai, kurių ypatinga savybė yra didelis efektyvumas plačiame išėjimo galios diapazone. Toks stiprintuvas yra sudarytas iš dviejų stiprintuvų, vadinamų pagrindiniu ir pagalbinio. Pagrindinis veikia nuolatos, o pagalbinis įsijungia tik tada, kai įėjimo signalo įtampa viršija nustatytą ribą. Pagrindinio stiprintuvo išėjimas su pagalbinio stiprintuvo

išėjimu sujungtas panaudojus papildoma ketvirčio bangos ilgio linija, vadinama impedanso inverteriu. Tam, kad išėjime būtų sudedami vienodos fazės signalai, tokio pat ilgio linija yra pridedama ir pagalbinio stiprintuvo įėjime. Tokio sujungimo dėka Doherty galios stiprintuvas turi du pikus efektyvumo charakteristikoje, o tarp šių pikų efektyvumas irgi yra didelis. Vienas iš pikų yra kaip įprasta ties maksimalia išėjimo galia, o kitas tam tikrame lygyje žemiau maksimalios galios, kaip pavaizduota 1 paveiksle raudona kreive. Įprastai stiprintuvų galių santykis yra parenkamas projektavimo metu priklausomai nuo stiprinamo signalo PAPR.



**1 pav.** Normuoto B klasės ir Doherty (įprasto, 4 eilės ir 3 pakopų) galios stiprintuvų efektyvumo palyginimas su normuotu LTE ir 802.11b standarto galios pasiskirstymu  
Šaltinis: (Camarchia, 2015)

**Darbo tikslas** – pasirinktam dažnių ruožui ir išėjimo galiai sumodeliuoti, suprojektuoti ir eksperimentiškai ištirti kuo didesnio efektyvumo Doherty galios stiprintuvą.

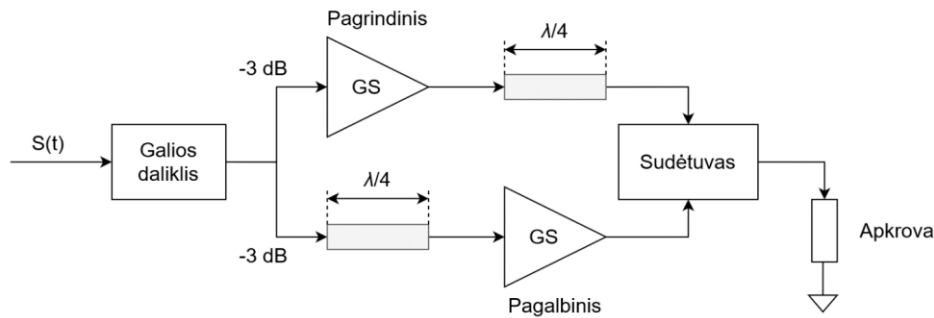
Vykdamas šio stiprintuvo projektavimą ir tyrimus, buvo sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Sumodeliuoti pagrindinius Doherty galios stiprintuvo parametrus siekiant kuo didesnio efektyvumo.
2. Suprojektuoti ir pagaminti pasirinktą architektūrą.
3. Atlikti matavimus ir eksperimentinius tyrimus plačiame Doherty galios stiprintuvo veikimo diapazone.

Šio stiprintuvo projektavime ir tyrime buvo taikyti kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Projektavimo metu naudota *Keysight ADS* programinė įranga (Keysight ADS, 2024). Spausdintinių plokščių, skirtų suprojektuoto stiprintuvo testavimui ir tyrimams, projektavimui panaudota *Altium Designer* programinė įranga (Altium, 2024). Taip pat stiprintuvo veikimas eksperimentiškai tirtas naudojant *Tektronix RSA5126A* spektro analizatorių, testavimo pozicionatorius PS600 ir aukštadažnius testavimo zondus SP-GR-201505, galinčius veikti iki 20 GHz.

### Doherty galios stiprintuvo projektavimas ir kompiuterinis modeliavimas

Įprasto Doherty galios stiprintuvo blokinė diagrama pateikta 2 pav., iš kurio matyti, kad toks stiprintuvas susideda iš kelių pagrindinių blokų – pagrindinio stiprintuvo, pagalbinio stiprintuvo, impedanso inverterio, kompensavimo linijos, įėjimo galios daliklio ir išėjimo sudėtuvo. Kartais dar reikia papildomų kompensavimo linijų. Kiekvieną šių blokų modeliavimo metu galima sumodeliuoti atskirai ir taip palengvinti uždavinį. Tam, kad būtų įmanoma tiksliai suprojektuoti šiuos stiprintuvus, reikia tikslių aukštadažnių tranzistorių modelių ir naudoti kompiuterinio modeliavimo programinę įrangą. Tyrimo tikslams siekiama suprojektuoti kuo mažesnei galiai, kad supaprastinti projektavimą ir matavimus. Todėl šiame darbe naudojami *MACOM CMPA0530002S* GaN didelio elektronų judrio tranzistorių (angl. high electron mobility transistor) modeliai modeliavimui su *Keysight ADS* programine įranga. Šio tranzistoriaus įšotinimo galia yra artima 3 W. Šiame darbe siekiama pirmojo efektyvumo piko vieta yra 6 dB žemiau maksimalios galios, taigi pagrindinis ir papildomas stiprintuvai turi išduoti vienodą galią. Projektuojama veikimui 2,3 GHz – 2,5 GHz dažnių ruože.



**2 pav.** Įprasto Doherty galios stiprintuvo blokinė diagrama  
Šaltinis: sudaryta autorių

### Pagrindinio stiprintuvo projektavimas

Projektavimas pradedamas nuo pagrindinio stiprintuvo. CMPA0530002S tranzistoriaus įėjimas jau yra suderintas, todėl pagrindinė projektavimo dalis yra sukurti išėjimo suderinimo grandinę 2,3 GHz – 2,5 GHz dažnių juostai. Pagrindinis stiprintuvas įprastai yra projektuojamas AB klasės, arti B klasės, kad galima būtų pasiekti kuo didesnę efektyvumą. Todėl stiprintuvo užtūros įtampa  $V_{GS}$  nustatoma 0,3 V virš slenksčio įtampos ir yra lygi -2,7 V, o ištakos srovė  $I_D$  neprijungus įėjimo signalo yra lygi 40 mA. Įtampa tarp santakos ir ištakos šiems tranzistoriams nustatoma 28 V. Apkrovos traukos (angl. load pull) modeliavimo metu galima nustatyti apytikslį tranzistoriaus apkrovos impedansą, su kuriuo būtų gautas reikalingas efektyvumo, maksimalios išėjimo galios ir, jeigu reikia, kitų parametru kompromisas. Vienas iš efektyvumo didinimo būdų, naudojamų šiame darbe, yra optimalių impedansų paieška ne tik fundamentinei dažnio dedamajai, bet ir antrajai ir trečiajai harmonikoms. Nustatyta, kad galima pasiekti daugiau nei 60 % ištakos efektyvumą prie 34 dBm išėjimo galios su 13 dB stiprinimu. Šie parametrai gaunami tada, kai fundamentinės dedamosios impedansas lygus  $55 + j97 \Omega$ , o antrosios ir trečiosios harmonikos impedansai labai dideli, artimi atviram jungimui.

Kitas žingsnis yra suprojektuoti suderinimo grandinę, su kuria būtų pasiekti minėti efektyvumo ir stiprinimo parametrai. Projektavimo metu naudojami paskirstytųjų parametru elementai – mikrojuostelių takeliai ir siekiama rasti tinkamiausią grandinės fizinių išdėstymą. Tyrimo metu taip pat palyginamos dvi dielektrinės medžiagos. Pirmoji yra FR4 medžiaga naudojama įprastoms spausdintinėms plokštėms, tačiau ją naudoti aukštadažniams grandynams virš 2 GHz nerekomenduojama. Svarbiausi trūkumai yra gana dideli nuostoliai (nuostolių koeficientas lygus 0,015) ir dielektrinė skvarba, kuri įprastai specifikacijose nurodoma lygi apie 4,6, tačiau priklauso nuo medžiagos pagaminimo kokybės ir signalo dažnio. Antroji yra brangesnė, aukštiems dažniams skirta PTFE tipo medžiaga, kuria siūlo Kinijos *JLCPCB* gamintojas. Tai yra ZYF300CA-C dielektrikas, kuris palyginus su FR4 turi apie 10 kartų mažesnius nuostolius (nuostolių koeficientas lygus 0,0016) ir stabilesnę dielektrinę skvarbą, lygią 2,94 prie 10 GHz dažnio. Šiuos dielektrikus palyginti galima suprojektavus panašios struktūros suderinimo grandines, kurios suderina apkrovą su apkrovos traukos modeliavimo metu nustatytais optimaliais harmonikų impedansais.

Suprojektavus grandines, atliekamos jų išdėstymo elektromagnetinių laukų modeliai, kurie įvertina grandinės išdėstymą, parazitines talpas tarp šalia esančių takų ar jų dalių. Toliau šis modelis prijungiamas tarp tranzistoriaus išėjimo ir apkrovos. Tuomet atliekami modeliavimai efektyvumo ir stiprinimo parametrams nustatyti ir palyginti. Grandinė su FR4 dielektrine medžiaga su 21 dBm įėjimo galia pasiekia 13,1 dB stiprinimą ir 57,5 % efektyvumą. Tuo tarpu grandinė su PTFE dielektrine medžiaga pasiekia 13,2 dB stiprinimą ir 63 % efektyvumą. Taigi mažiau nuostolingos PTFE dielektrinės medžiagos naudojimas stiprintuvų projektavime leidžia pasiekti geresnį efektyvumą. Dėl šios priežasties, ir dėl to, kad pagamintos spausdintinės plokštės FR4 dielektriko parametrai gali turėti didelį nuokrypį nuo modeliavimo metu naudojamų verčių, nuspręsta šio darbo projektavimo metu naudoti brangesnę, tačiau mažiau nuostolingą PTFE medžiaga.

### Pagalbinio stiprintuvo projektavimas

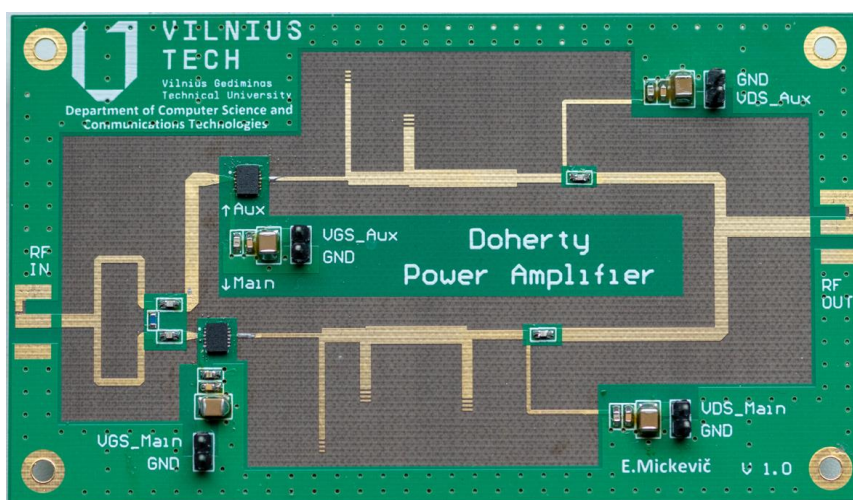
Pagalbinį stiprintuvą reikia suprojektuoti tokiai pat galiai kaip ir pagrindinis, nes siekiama gauti pirmąjį efektyvumo piką 6 dB žemiau maksimalios galios. Be to, reikia projektuoti stiprintuvą C klasės, kad jis įsijungtų tik virš tam tikros įėjimo signalo ribos. Kadangi pagalbiniam stiprintuvui naudojamas tas pats tranzistorius, bet projektuojama C klasė, stiprintuvo stiprinimas yra mažesnis ir todėl reikia paduoti didesnę įėjimo galią. Projektavimo eiga yra panaši į pagrindinio stiprintuvo – apkrovos traukos modeliavimo metu ieškomi optimalūs impedansai signalo harmonikoms. Optimalaus impedanso suderinimo sritis yra labai artima AB klasės sričiai, todėl galima naudoti panašios struktūros suderinimo grandinę, kaip ir pagrindinio stiprintuvo. Modeliavimo metu su 24 dBm įėjimo galia ir  $V_{GS}$  įtampa lygia -4,5 V gaunamas 9 dB stiprinimas ir 65,8 % efektyvumas.



### Doherty galios stiprintuvo projektavimas

Paskutinis žingsnis yra suprojektuoti likusias stiprintuvo dalis – įėjimo galios daliklį ir stiprintuvų išėjimų sujungimą. Kaip minėta, stiprintuvai yra sujungiami lygiagrečiai, o pagrindinio stiprintuvo išėjime dar pridėdama 50 omų ketvirčio bangos ilgio (20 mm) linija impedansui invertuoti. Taip pat pagrindinio stiprintuvo išėjime iki impedanso inverterio ir pagalbinio stiprintuvo išėjime pridėdamos 50  $\Omega$  kompensavimo linijos, kad būtų teisingai vykdoma apkrovos moduliacija ir kad būtų gautas Doherty stiprintuvams būdingas papildomas efektyvumo pikas. Modeliavimo metu nustatyta, kad geriausiam veikimui 2,3 GHz – 2,5 GHz dažnių ruože pagrindinio stiprintuvo išėjimo kompensavimo linijos ilgis turi būti lygūs 17,5 mm, o pagalbinio 24 mm. Taip pat pagalbinio stiprintuvo įėjime pridėdama 21 mm ilgio linija, kad kompensuoti stiprintuvų išėjimo fazių skirtumą, sukurtą dėl impedanso inverterio, išėjimo kompensavimo linijų ilgio skirtumo ir skirtingų stiprintuvų klasių. Apkrova prie stiprintuvų išėjimų sujungimų bendro taško sujungiama su 70  $\Omega$  ketvirčio bangos ilgio linija. Visa tai yra būtinosios įprastos Doherty konstrukcijos dalys (Kim, 2018).

Dažnai Doherty stiprintuvai projektuojami su dviem identiškais tranzistoriais ir tai reiškia, kad C klasės stiprintuvas, kaip ir šiame darbe, turės mažesnę stiprinimą. Todėl reikia į jį paduoti didesnę įėjimo signalo dalį panaudojus reikiamo dalinimo koeficiento galios daliklį. Šiame darbe suprojektuotas pagrindinis stiprintuvas 21 dBm įėjimo galiai, o pagalbinis stiprintuvas - 24 dBm įėjimo galiai, kai tuo tarpu jų išėjimo galios atitinkamai yra apie 34 dBm ir 33 dBm. Tai reiškia, kad į pagalbinį stiprintuvą reikėtų paduoti apie (3-4) dB daugiau galios, tuomet būtų pasiekta apytiksliai vienoda abiejų stiprintuvų išėjimo galia. Tačiau modeliavimo metu pastebėta, kad padavus 24 dBm galios signalą į abu stiprintuvus, jų išėjimo galia yra beveik vienoda, efektyvumas didelis ir išvengiama stiprinimo nuostolių dėl nevienodo dalinimo koeficiento daliklio. Dėl šių priežasčių suprojektuotas Doherty stiprintuvas turi vienodo dalinimo koeficiento Wilkinson galios daliklį, ir turi būti paduodamas 27 dBm įėjimo galios signalas. Suprojektuoto Doherty stiprintuvo galutinis vaizdas pateiktas 3 pav., o simuliacijų rezultatai pateikti 5 pav. Iš šių charakteristikų matome, kad padavus 27 dBm įėjimo signalą maksimali galia (2,3–2,5) GHz dažnių ruože yra apie 36 dBm, o efektyvumas ties ja siekia (65–67) %. Modeliavimo metu antras efektyvumo pikas gautas apie 5 dB žemiau maksimalios galios ir efektyvumas jame siekia (47-52) %.



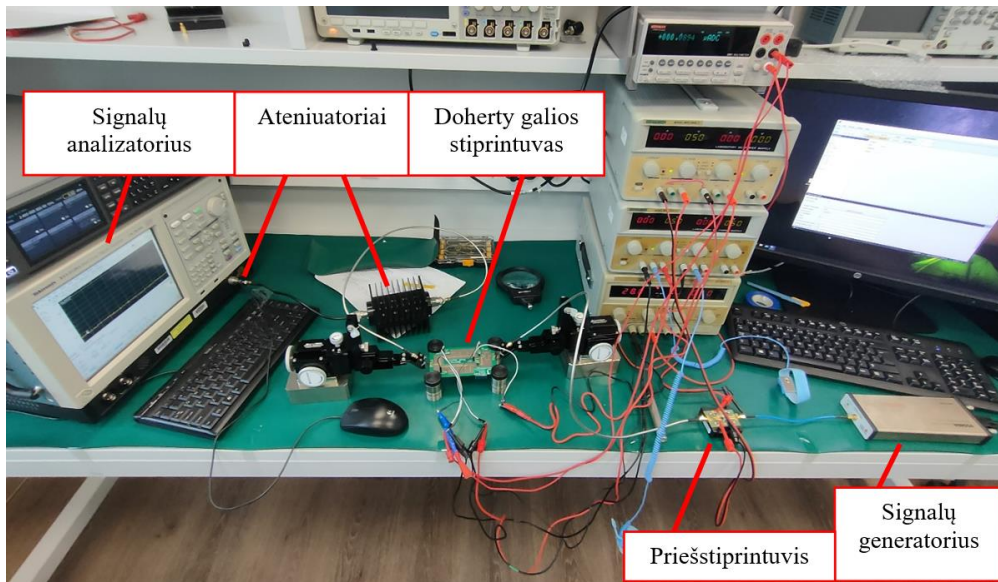
3 pav. Suprojektuoto Doherty galios stiprintuvo surinktos spausdintinės plokštės vaizdas

Šaltinis: sudaryta autorių

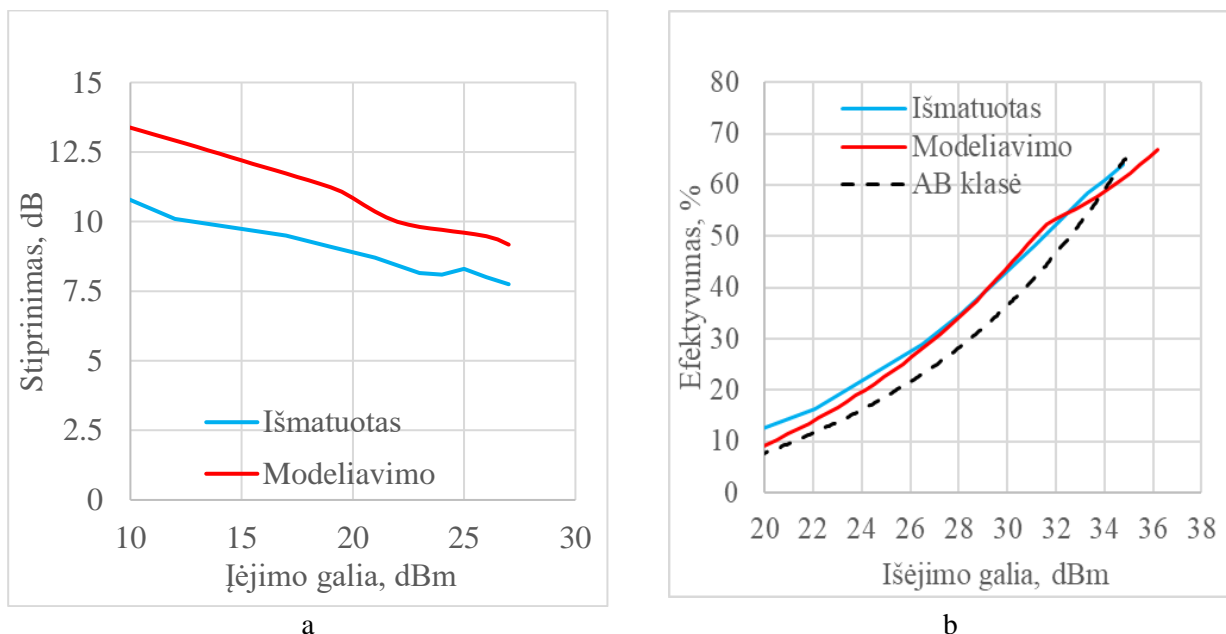
### Doherty galios stiprintuvo testavimas ir eksperimentiniai tyrimai

Modeliavimo su Keysight ADS metu pasiekus kuo geresnius parametrus, suprojektuota stiprintuvo geometrinė struktūra buvo perkelta į Altium Designer programinį paketą, siekiant suprojektuoti spausdintinę plokštę ir paruošti ją gamybai. Spausdintinė plokštė buvo pagaminta JLCPCB gamintojo, Kinijoje, naudojant 0,76 mm storio ZYF300CA-C laminatą. Gavus pagamintą spausdintinę plokštę, prie jos prilituoti visi reikiami komponentai (3 pav.), o stiprintuvo matavimo stendas pavaizduotas 4 pav. Pirmiausia nustatyta tai, kad pagrindinio stiprintuvo  $V_{GS}$  įtampa turi būti lygi -2,3 V, kad gauti  $I_D = 40$  mA srovę. Pagalbinio stiprintuvo  $V_{GS}$  įtampa nustatyta kaip ir modeliavime ir yra lygi -4,7 V. Tada atlikti matavimai, kurių metu paduodama sinusinė banga ir matuojamas išėjimo signalas signalų analizatoriumi Tektronix RSA5126A. Pirmiausia nustatyta tai, kad stiprintuvo centrinis dažnis pasislinko iš 2,4 GHz į 2,27 GHz. Paduodama įėjimo signalo galia didinama tam tikru žingsniu ir išmatuojama išėjimo galia ir vartojama elektros srovė. Iš šių duomenų apskaičiuojamas stiprinimas ir efektyvumas, jų charakteristikos kartu su palygintais modeliavimo rezultatais

pateiktos 5 pav. Iš matavimų rezultatų matyti, kad pasiekama 34,7 dBm išėjimo galia padavus 27 dBm signalą į įėjimą, o efektyvumas siekia 63,8 %, o 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Palyginus su modeliavimo rezultatais, išmatuotas stiprintuvas turi apie (2-2,5) dB prastesnį stiprinimą ir dėl to maksimali galia yra mažesnė. Mažesnis stiprinimas gali būti priežastis to, kad efektyvumo pikas pasislinko arčiau nustatytos maksimalios galios. Tam, kad nustatyti Doherty stiprintuvo pranašumą, jo efektyvumas dar palyginimas ir su suprojektuoto pagrindinio AB klasės stiprintuvo efektyvumo charakteristika, jeigu tokio stiprintuvo ir suprojektuoto Doherty stiprintuvo maksimali išėjimo galia sutaptų. Pagamintas Doherty stiprintuvas turi iki 6,6 % efektyvumo pranašumą palyginus su AB klase plačiame išėjimo galios diapazone iki maksimalios galios, kur jų efektyvumas sutampa.



4 pav. Suprojektuoto Doherty galios stiprintuvo matavimo stendo vaizdas  
*Šaltinis: sudaryta autorių*



5 pav. Sumodeliuoto ir išmatuoto Doherty a) stiprinimo charakteristika; b) efektyvumo charakteristika ir palyginimas su AB klasės stiprintuvu  
*Šaltinis: sudaryta autorių*

### Išvados

1. Šiuolaikiniams signalams efektyviai stiprinti reikalingos naujos stiprintuvų architektūros, kurios pasiekia didelį efektyvumą ne tik ties išotinio galia, bet ir žemesnėje išėjimo galioje. Doherty galios stiprintuvai yra vieni tinkamiausių šiai problemai spręsti dėl jų didelio efektyvumo plačiame išėjimo galios diapazone ir paprastesnio projektavimo, nei kitų architektūrų.

2. Aukštų dažnių galios stiprintuvų projektavime dideliam efektyvumui pasiekti svarbu suderinti tranzistorių su apkrova ne tik fundamentiniui dažniui, bet ir antrajai bei trečiajai harmonikoms. Taip pat svarbu naudoti mažesnių nuostolių dielektrines medžiagas. Šiame darbe nustatyta, kad naudojant PTFE buvo pasiektas 5,5 % didesnis AB klasės stiprintuvo efektyvumas nei naudojant FR4 medžiagą.

3. Doherty galios stiprintuvo projektavimo metu suprojektuotos visos būtinios stiprintuvo dalys, tarp kurių yra AB klasės pagrindinis ir C klasės pagalbinis stiprintuvai (2,3-2,5) GHz dažnių ruožui, kurių stiprinimas yra atitinkamai 13,2 dB ir 9 dB, o efektyvumas yra atitinkamai 63 % ir 65,8 %. Sumodeliuoto Doherty stiprintuvo išėjimo galia siekia 36 dBm, stiprinimas 9 dB, efektyvumas ties maksimalia šia galia siekia 67%, o 5 dB žemiau šios galios gautas iki 52 % efektyvumo pikas.

4. Pagamintas Doherty galios stiprintuvas buvo eksperimentiškai ištirtas, siekiant nustatyti stiprinimą ir efektyvumą plačiame išėjimo galios diapazone. Nustatyta, kad stiprintuvo išėjimo galia siekia 34,7 dBm su stiprinimo lygiu 7,7 dB, o efektyvumas ties šia galia siekia 63,8 %. 5 dB žemiau šios galios efektyvumas siekia 41,8 %. Tokie rezultatai rodo, kad suprojektuotas stiprintuvas turi iki 6,6 % efektyvumo pranašumą, palyginus su įprastu AB klasės stiprintuvu.

## Literatūra

1. Altium. Altium Designer 24 From Requested to Required. 2024. [Žiūrėta 2024-03-25]. Prieiga Internetu: <https://www.altium.com/altium-designer/latest-release>
2. Camarchia, V., Pirola, M., Quaglia, R., Jee, S., Cho, Y., & Kim, B. (2015). The Doherty Power Amplifier: Review of Recent solutions and Trends. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(2), 559–571. <https://doi.org/10.1109/tmmt.2014.2387061>
3. Keysight. PathWave Advanced Design System. 2024 [Žiūrėta 2024-03-25]. Prieiga Internetu: [www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html](http://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html)
- Kim, B. (2018). *Doherty Power Amplifiers: From Fundamentals to Advanced Design Methods*. Academic Press.
4. Nasri, A., Estebansari, M., Toofan, S., Piacibello, A., Pirola, M., Camarchia, V., & Ramella, C. (2021). Design of a Wideband Doherty Power Amplifier with High Efficiency for 5G Application. *Electronics*, 10(8), 873. <https://doi.org/10.3390/electronics10080873>
5. Pengelly, R., Fager, C., & Ozen, M. (2016). Doherty's Legacy: A History of the Doherty Power Amplifier from 1936 to the Present Day. *IEEE Microwave Magazine*, 17(2), 41–58. <https://doi.org/10.1109/mmm.2015.2498081>
6. Singh, S., & Malik, J. (2021). Review of efficiency enhancement techniques and linearization techniques for power amplifier. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 49(3), 762–777. <https://doi.org/10.1002/cta.2956>
7. Xia, J., Zhu, X., Zhang, L., Zhai, J., & Sun, Y. (2013). High-Efficiency GAN Doherty Power Amplifier for 100-MHz LTE-Advanced application based on Modified Load Modulation network. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 61(8), 2911–2921. <https://doi.org/10.1109/tmmt.2013.2269052>

## DESIGN AND INVESTIGATION OF A HIGH EFFICIENCY DOHERTY POWER AMPLIFIER

### Summary

Currently in wireless communications complex modulation schemes are used to achieve high data rates. However, due to amplitude modulation, conventional amplifiers operate below their maximum power point most of the time and therefore have lower efficiency. To solve this problem, Doherty power amplifier architecture is investigated. In this work a Doherty amplifier is computer-modeled, which uses harmonic impedance matching and a low-loss PTFE dielectric material to improve efficiency. The simulated amplifier achieves 36 dBm output power with 65 % efficiency and 5 dB below this power the efficiency reaches 52 %. The measurements of the fabricated amplifier give an output power of 34.7 dBm with efficiency of 63.8 %, while efficiency 5 dB below this power is 41.8 %. Compared to efficiency of a conventional class AB amplifier, the Doherty amplifier has an efficiency improvement of about 6.6 %.

**Key words:** high-frequency circuits, measurements with a signal analyzer, Doherty power amplifier, printed circuit board, amplifier design.

### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Erik Mickevič.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** inžinerijos mokslų bakalauras

**Darbo vieta ir pozicija:** Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros magistrantas.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** aukštadažnė elektronika.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 60957188, [erik.mickevic@stud.vilniustech.lt](mailto:erik.mickevic@stud.vilniustech.lt)

**Autoriaus vardas, pavardė:** Vaidotas Barzdėnas.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** daktaras, profesorius



**Darbo vietą ir pozicija:** Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros profesorius.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** aukštadažnė elektronika, integrinių grandynų projektavimas, šiuolaikinė mikro- ir nanoelektronika.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 68451453 [vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt](mailto:vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt)

**Autoriaus vardas, pavardė:** Andžej Borel.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** inžinerijos mokslų magistras

**Darbo vietą ir pozicija:** Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros doktorantas.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** aukštadažnė elektronika.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 60588897, [andzej.borel@vilniustech.lt](mailto:andzej.borel@vilniustech.lt)

## A COVER LETTER OF AUTHORS

**Author name, surname:** Erik Mickevič.

**Science degree and name:** bachelor of engineering

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, M. Sc. student.

**Author's research interests:** high-frequency electronics.

**Telephone and e-mail address:** 8 60957188, [erik.mickevic@stud.vilniustech.lt](mailto:erik.mickevic@stud.vilniustech.lt)

**Author name, surname:** Vaidotas Barzdėnas.

**Science degree and name:** Ph. D., professor.

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, professor.

**Author's research interests:** high-frequency electronics, integrated circuit design, modern micro- and nanoelectronics.

**Telephone and e-mail address:** 8 68451453 [vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt](mailto:vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt)

**Author name, surname:** Andžej Borel.

**Science degree and name:** master of engineering

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, PhD student.

**Author's research interests:** high-frequency electronics.

**Telephone and e-mail address:** 8 60588897, [andzej.borel@vilniustech.lt](mailto:andzej.borel@vilniustech.lt)

# PASKIRSTYTŲJŲ PARAMETRŲ ŽEMŲJŲ DAŽNIŲ FILTRO SU ATVIROMIS KILPOMIS PROJEKTAVIMAS IR TYRIMAS

Erik Mickevič, Vaidotas Barzdėnas  
Vilnius Tech

## Anotacija

Šiuo metu aukštadažnių filtrų projektavimui dažniausiai naudojami diskretūs, sutelktųjų parametrų komponentai. Tačiau dėl didelių pašalinių parametrų įtakos filtro dažninėms charakteristikoms, jų projektavimas aukštadažniuose grandynuose tampa sudėtingu, brangiu, o kartais ir neįmanomu procesu. Šiems iššūkiams spręsti siūlomi paskirstytųjų parametrų komponentai, sudaryti iš mikrojuostelinių linijų, leidžiančių efektyviai projektuoti aukštadažnius įrenginius su reikiamomis dažninėmis savybėmis. Todėl šiame darbe, naudojant programinę *Keysight ADS* įrangą ir matematinius modelius, skaičiuojama ir kompiuteriniu būdu modeliuojama žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis geometrinė struktūra ir pagrindiniai matmenys, projektuojama testavimui skirta spausdintinė plokštė. Filtras yra išbandomas ir ištiriamas eksperimentiškai, naudojant *LA19-1304B* vektorinį grandynų analizatorių. Tyrimo metu gaunami tokie pagrindiniai žemųjų dažnių filtro parametrai: ribinis dažnis nedidesnis nei 2,6 GHz, slopinimas ties 4 GHz daugiau nei 24 dB, dažninės charakteristikos netolygumas turi neviršyti 0,1 dB. Šie filurai plačiai naudojami ir yra aktualūs šiuolaikinėse belaidžio ryšio sistemose.

**Reikšminiai žodžiai:** aukštadažniai grandynai, matavimai vektoriniu grandynų analizatoriumi, paskirstytųjų parametrų filurai, spausdintinė plokštė, žemųjų dažnių filtro projektavimas.

## Įvadas

Elektronikos technologijos vis įgauna didesnę vystymosi pagreitį, vis daugiau įrenginių tobulėja ir tampa išmaniaisiais. Tokie įrenginiai renka, apdoroja informaciją ir dalinasi ja su kitais įrenginiais naudojant įvairias belaidžio ryšio technologijas, tokias kaip Wi-Fi, Bluetooth, NFC, tarp jų ir mobiliojo ryšio technologijas tokias kaip GSM, 4G, 5G. Šie įrenginiai priskiriami daiktų internetui, kuris šiuo metu vis labiau tobulėja (Top 10 IoT, 2020). Tai reiškia, kad dabartiniai elektronikos ir telekomunikacijų inžinieriai susiduria su įvairiais aukštadažnių grandynų projektavimo iššūkiais: kaip tinkamai įvertinti pilnutinę varžą, projektuoti suderinimo grandines, filtrus, užtikrinti signalo vientisumą ir daug kitų (Altium, 2021), (Chen, 2015), (Jiang, 2018).

Įprastuose diskretiniuose sutelktųjų parametrų komponentuose, aukštuosiuose dažniuose pasireiškia pašaliniai parametrai, kurie gali ženkliai pakeisti komponento pilnutinę varžą, įnešti galios nuostolius, bloginti komponentų kokybinius parametrus (Bowick, 2008), (Dong, 2020). Galima naudoti ir aukštadažnėms grandinėms skirtus komponentus, turinčius ypač mažus pašalinius parametrus, tačiau jų kaina kelis kartus didesnė. Todėl tokių komponentų naudojimas didina ir pačio gaminamo įrenginio savikainą. Šioms problemoms spręsti naudojami paskirstytųjų parametrų komponentai. Šie komponentai yra tam tikrų parametrų ir struktūros mikrojuostelinės linijos sudarytos ant spausdintinės plokštės. Priklausomai nuo jų geometrinių parametrų, formų, galima sudaryti tokius komponentus kaip filurai, galios dalikliai, šakotuvai, cirkulatoriai, antenos, rezonatoriai ir daugelį kitų.

Filtras yra keturpolis, kurio paskirtis – praleisti tam tikrus, pageidaujamus elektrinių signalų dažnius, o kitus nuslopinti. Tokie aukštadažniai filurai dažnai projektuojami tik iš pasyvių, sutelktųjų parametrų komponentų (kondensatorių ir induktyvumo ričių) panaudojant jų dažnines savybes. Išskiriami keturių tipų filurai: žemųjų dažnių, aukštųjų dažnių, juostiniai bei užtvariniai filurai. Projektuojant aukštadažnius filtrus, dažniausiai naudojamas įneštinių nuostolių metodas, kuriame galima išskirti kelis skirtingus filtrų tipus: *Butterworth*, *Chebyshev*, *Bessel* ir kitus. *Butterworth* filtro pralaidumo juosta yra lygiausia ir turi mažiausius nuostolius. *Chebyshev* filtro pralaidumo juosta turi tam tikros vienodos amplitudės netolygumą, tačiau ir statesnę slopinimą. *Bessel* filurai dažniausiai naudojami fazės keitikliuose, nes jų fazės pokytis visoje dažnių juostoje yra tiesiausias, lyginant su prieš tai minėtais. Dar yra eliptinės funkcijos filurai, kurie apibūdina ir pralaidumo ir slopinimo juostos netolygumą. Visi šie filurai gali būti lengvai ir greitai projektuojami naudojant specialias prototipų lenteles, kuriose yra kondensatorių ir induktyvumo ričių normuoti parametrai (Bowick, 2008). Naudojant specialias formules galima paskaičiuoti filtro komponentų vertes tam tikram dažniui, pilnutinės varžos sistemai, slopinimo koeficientui ir netolygumo lygiui. Nors aukštadažnių filtrų projektavimas naudojant diskrečiuosius, sutelktųjų parametrų, paviršinio montažo kondensatorius ir induktyvumo rites yra labai populiarus, tačiau projektuojant šiuos filtrus tenka rinktis ženkliai brangesnius, mažesnių pašalinių parametrų, komponentus. Be to, ne visada galima įsigyti reikiamų nominalių komponentus, galbūt tokie nėra net gaminami. Todėl siekiant spręsti minėtas problemas, projektuojami paskirstytųjų parametrų filurai, sudaryti iš mikrojuostelinių linijų, leidžiantys atpiginti projektuojamą aukštadažnį įtaisą ir gauti geresnes dažnines savybes.

**Darbo tikslas** – suprojektuoti, pagaminti, ištestuoti ir ištirti paskirstytųjų parametru, žemųjų dažnių filtrą su atviromis kilpomis, kurio ribinis dažnis 2,6 GHz, slopinimas ties 4 GHz bent 24 dB, o dažninės charakteristikos netolygumas siektų bent 0,1 dB arba būtų mažesnis. Tokių parametru filtrai naudojami šiuolaikinėse belaidžio ryšio sistemose.

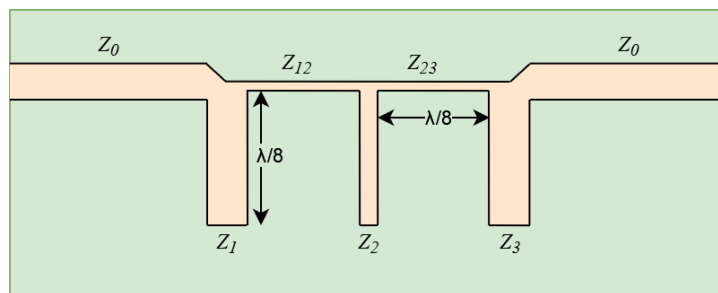
Vykdamas šio filtro projektavimą ir tyrimus, buvo sprendžiami šie **uždaviniai**:

1. Taikant programinius paketus ir matematinius modelius, suskaičiuoti šio filtro geometrinę struktūrą ir pagrindinius matmenis;
2. Suprojektuoti šio filtro spausdintinę plokštę ir ją pagaminti;
3. Pagamintas filtras turėtų būti ištestuotas ir ištirtas naudojant LA19-1304B vektorinį grandynų analizatorių.

Šio filtro projektavime ir tyrime buvo taikyti matematiniai, kompiuterinio modeliavimo ir eksperimentiniai tyrimo metodai. Skaičiuojant šio filtro geometrinius matmenis buvo naudoti matematiniai metodai, bei rezultatams patikrinti *Keysight ADS* programinė įranga (Keysight ADS, 2024). Spausdintinių plokščių, skirtų suprojektuoto filtro testavimui ir tyrimams, projektavimui panaudota *Altium Designer* programinė įranga (Altium, 2024). Taip pat filtro veikimas eksperimentiškai tirtas naudojant *LA19-1304B* vektorinį grandynų analizatorių.

### Paskirstytųjų parametru žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis geometrinių matmenų skaičiavimas

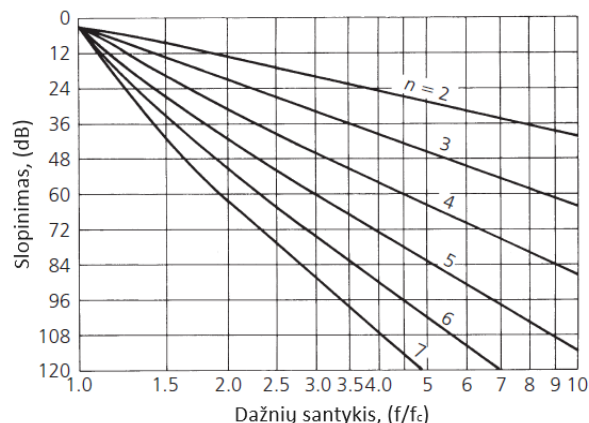
Projektuojamo žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis struktūros pavyzdys pateikiamas 1 paveiksle. Šią filtro struktūrą sudaro mikrojuostelinė linija su šešiomis atkarpomis, turinčiomis vienodą arba skirtingą pilnutinę varžą:  $Z_0$  ( $50 \Omega$ ),  $Z_1$ ,  $Z_{12}$ ,  $Z_2$ ,  $Z_{23}$ ,  $Z_3$ . Prieš skaičiuojant šių atkarpų geometriją, pirmiausia turime užsiduoti reikalavimus šiam projektuojamam filteriui: ribinis dažnis nemažesnis nei  $f_c=2,6$  GHz, slopinimas ties 4 GHz bent 24 dB, o dažninės charakteristikos netolygumas neturi viršyti 0,1 dB.



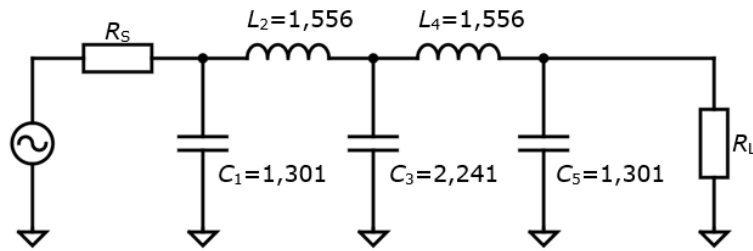
**1 pav.** Paskirstytųjų parametru žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis struktūra

Šaltinis: sudaryta autorių

Užsiduotas 0,1 dB dažninės charakteristikos netolygumas nusako, kad projektuojamas žemųjų dažnių filtras turėtų būti *Chebyshev* tipo. Nagrinėdami žemųjų dažnių *Chebyshev* filtrų dažninių charakteristikų šeimą (2 pav.) matome, kad norint turėti mažiausiai 24 dB slopinimą ties 4 GHz dažniu, reikia mažiausiai 5 eilės filtro. Žinodami *Chebyshev* filtro eilę, iš aukštadažnių grandynų projektavimo žinytų arba matematinių modelių galime nesudėtingai surasti ir pačią filtro grandinę ir normuotas elementų vertes (Bowick, 2008). Šio žemųjų dažnių filtro grandynas su normuotomis elementų vertėmis pavaizduotas 3 paveiksle.

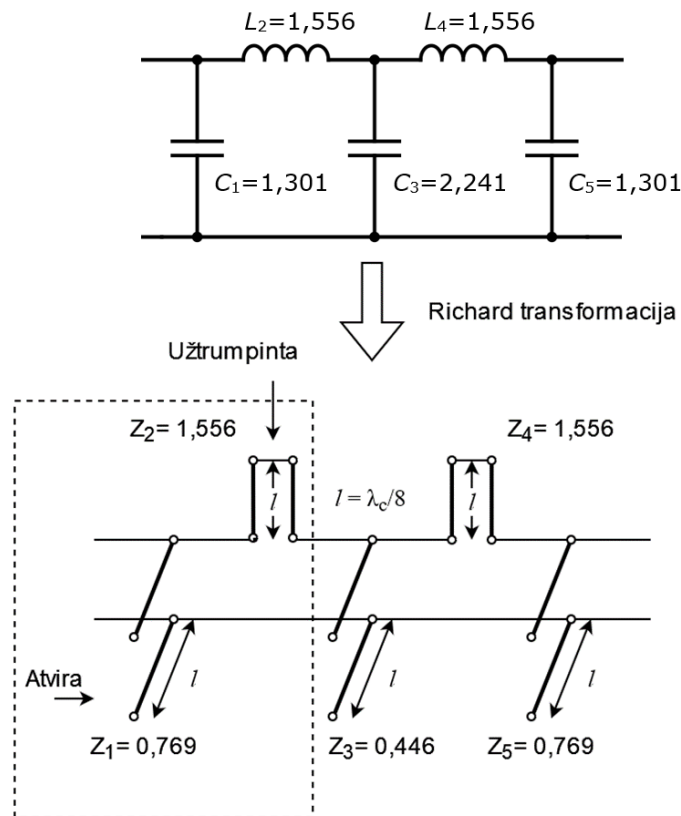


**2 pav.** Dažninių charakteristikų šeima 0,1 dB netolygumo *Chebyshev* filteriui



**3 pav.** 5-osios eilės *Chebyshev* žemųjų dažnių filtro su 0,1 dB netolygumu grandynas ir normuotos elementų vertės. Šiame grandyne  $R_S$  atitinka šaltinio varžą ir  $R_L$  - apkrovos varžą, kurios yra lygios  $50 \Omega$   
Šaltinis: sudaryta autorių

Sekančiuose žingsniuose atliekami veiksmai naudojant *Richard* transformaciją ir *Kuroda* tapatybes. *Richard* transformacija leidžia gauti reikiamą induktyvumą ar talpą naudojant atviras arba užtrumpintas mikrojuostelines kilpas. *Kuroda* tapatybės leidžia fiziškai atskirti kilpas naudojant perdavimo linijų dalis, nekeičiant filtro savybių, bei pakeisti nuoseklias kilpas (induktyvumus) į lygiagrečias kilpas (talpas) bei taip palengvinti projektavimą bei gamybą. Naudojant *Richard* transformaciją elementai pakeičiami vienetinio ilgio ( $\lambda/8$ ) kilpomis, kurios pavaizduotos 4 paveiksle. Reiktų atkreipti dėmesį, kad kondensatoriai transformuojami atvirkščiu dydžiu, nei normuota kondensatoriaus vertė bei esant  $\omega = 1 \text{ rad/s}$ .

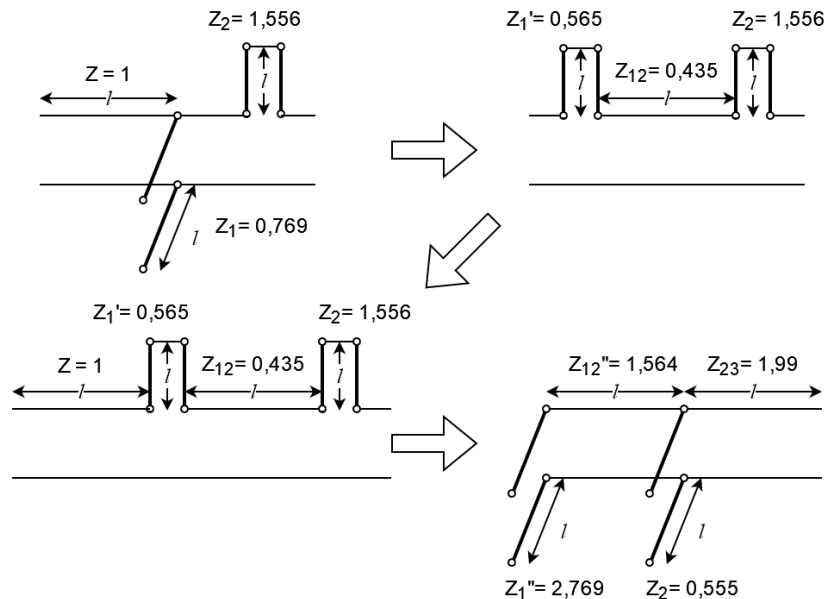


**4 pav.** Projektuojamo filtro elementų *Richard* transformacija  
Šaltinis: sudaryta autorių

Sekantys veiksmai atliekami su 4 paveiksle punktyru pažymėta dalimi. Naudojant *Kuroda* tapatybę,  $Z_1$  elementas pakeičiamas į nuoseklų induktyvumą  $Z_1'$ , atskirtą nuo  $Z_2$  panaudojus vienetinio ilgio perdavimo linija. Toliau  $Z_2$  ir nauja gauta perdavimo linija yra pakeičiami į lygiagrečią talpą  $Z_2'$ .  $Z_1'$  induktyvumas su nauja vienetinio perdavimo linija irgi yra pakeičiami į lygiagrečią talpą  $Z_1''$  (5 pav.). Šių veiksmų metu taip pat gauname perdavimų linijų, kurios jungia elementus, pilnutines varžas. Filtras yra simetrinis  $Z_3$  atžvilgiu, todėl  $Z_4$ ,  $Z_5$ ,  $Z_{34}$  ir  $Z_{45}$  vertės yra atitinkamai tokios pat kaip jau apskaičiuotos.

Dabar turime filtrą sudarytą vien iš lygiagrečių atvirų kilpų (talpų), atskirtų viena nuo kitos  $\lambda/8$  ilgio mikrojuostelinėmis perdavimo linijomis. Kiekvienos atviros kilpos bei perdavimo linijų jungiančių jas pilnutinės varžos, ilgiai bei pločiai yra randami naudojant *Keysight ADS* programinio paketo *LineCalc* įrankį

ir surašytos į 1 lentelę. Matmenys yra suapvalinami 0,1 mm tikslumu. Šie parametrai yra teoriniai ir skaičiavimai neįvertina visų sąveikų tarp komponentų ir nuostolių, todėl projektavimo metu jas tenka pakoreguoti taip, kad ribinis dažnis būtų arčiau reikiamo. Nustatyta, kad reikia patrumpinti apskaičiuotus ilgius apie 5 %.



5 pav. Kuroda tapatybių taikymas 4 paveiksle punktyru pažymėtai daliai  
Šaltinis: sudaryta autorių

1 lentelė

**Apskaičiuoti žemų dažnių filtro su atviromis kilpomis struktūros elementų parametrai**

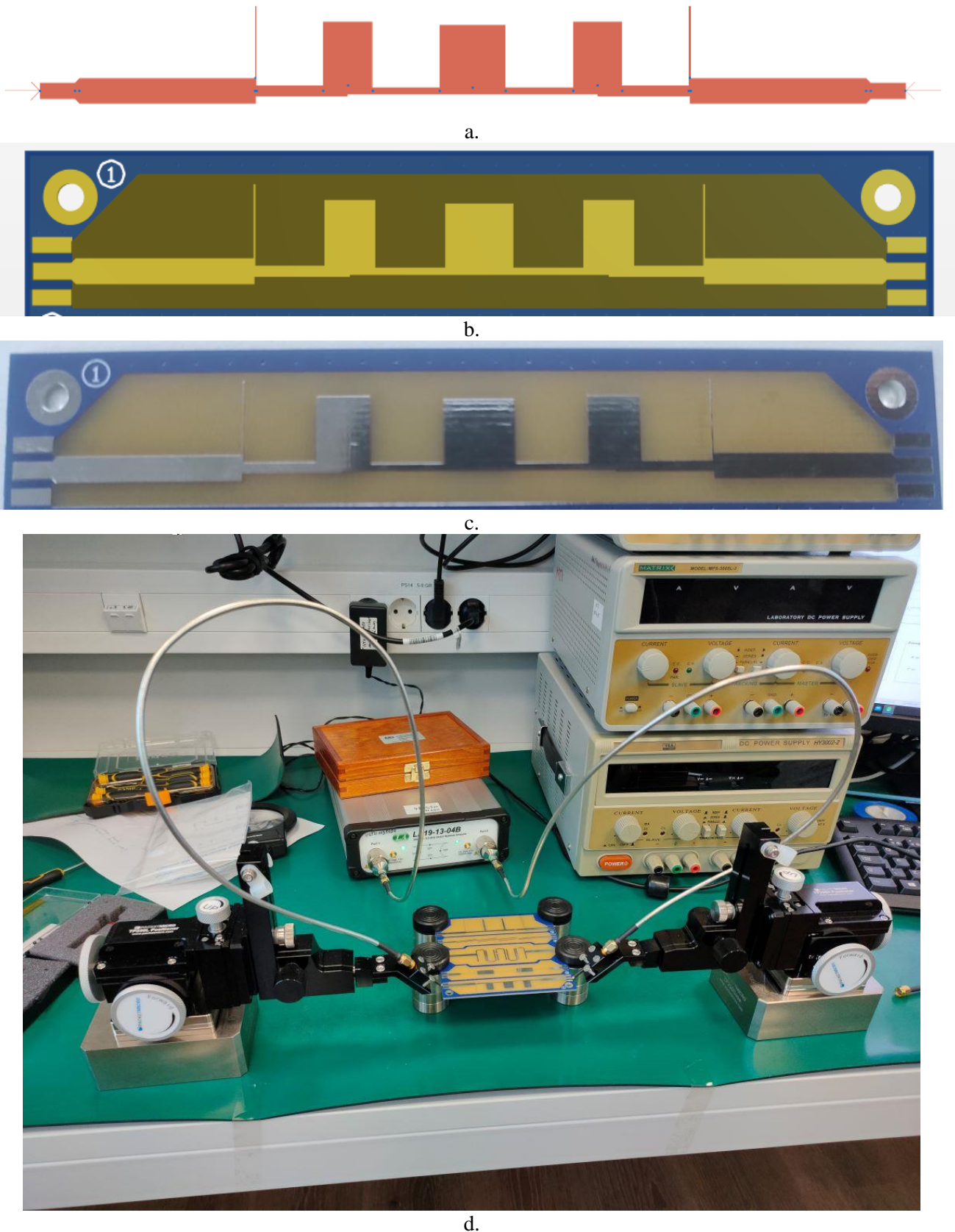
Elementas	Normuota pilnutinė varža	Pilnutinė varža, $\Omega$	Apskaičiuotas mikrojuostelės plotis, mm	Apskaičiuotas mikrojuostelės ilgis ( $\lambda/8$ ), mm	Galutinis mikrojuostelės ilgis ( $\lambda/8$ ), mm
$Z_1 = Z_5$	2,769	138	0,2	8,5	8
$Z_2 = Z_4$	0,555	28	6,6	7,4	7,1
$Z_3$	0,446	22	9	7,3	6,9
$Z_{12} = Z_{45}$	1,564	78	1,1	8	7,6
$Z_{23} = Z_{34}$	1,990	100	0,6	8,2	7,7

Šaltinis: sudaryta autorių

**Paskirstytųjų parametrų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis matavimo rezultatai**

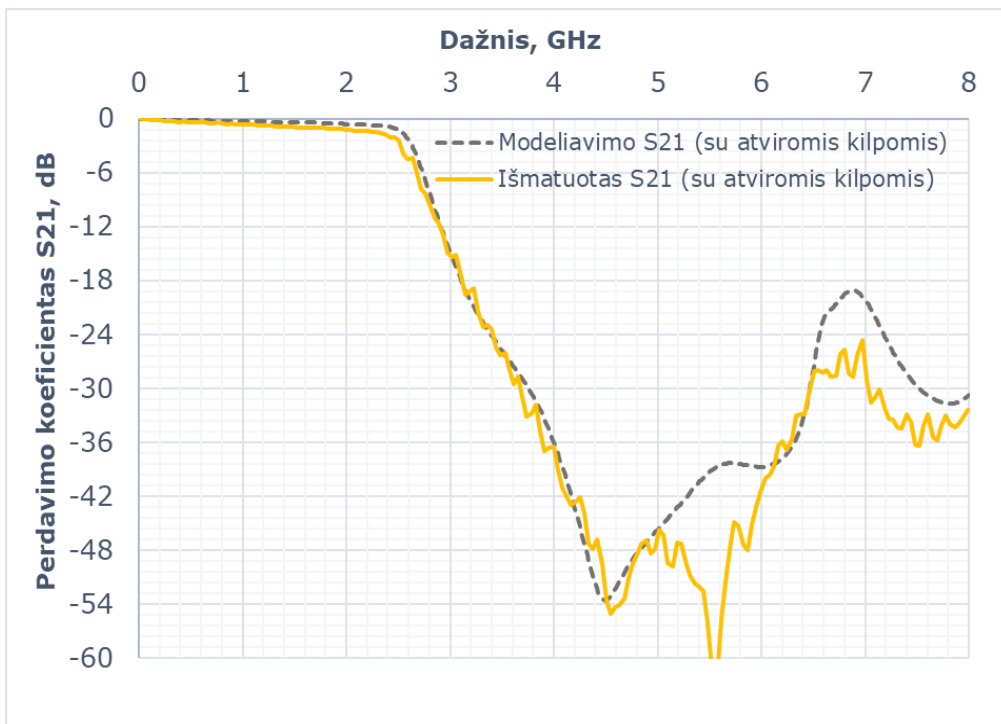
Suskaiciavus paskirstytųjų parametrų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis geometrinius parametrus, ši filtro struktūra buvo nubraižyta ir kompiuteriniu būdu sumodeliuota *Keysight ADS* programiniame pakete. Filtro vaizdas šiame programiniame pakete pavaizduotas 6 pav., a. Įsitikinus, kad šio filtro pagrindiniai parametrai atitinka išsikeltus reikalavimus, jo geometrinė konfigūracija buvo perkelta į *Altium Designer* programinį paketą, siekiant suprojektuoti spausdintinę plokštę ir paruošti ją gamybai. Projektuojamo filtro vaizdas *Altium Designer* programiniame pakete pavaizduotas 6 pav., b. Žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis spausdintinė plokštė buvo pagaminta *PCBWay* gamintojo, Kinijoje, naudojant 1,6 mm storio KB-6165F 7628 laminatą, kurio dielektrinė skvarba prie 1 GHz yra 4,6, o nuostolių koeficientas 0,016. Pagaminto žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis vaizdas pavaizduotas 6 pav., c. Gavus pagamintą spausdintinę plokštę ir atlikus vizualinę patikrą, pažeidimų neaptikta. Plokštės storis atitiko naudojamą modeliavimo metu ir buvo su gamintojo deklaruojama  $\pm 10\%$  paklaida. Prilietus *PacketMicro* zondus, buvo atliekami matavimai su vektoriniu grandynų analizatoriumi *LA19-1304B*. Įranga buvo sukalibruota matavimo režiams nuo 3 MHz iki 8,5 GHz su 2001 matavimo taškų (žingsnis apie 4,2 MHz). Šio filtro matavimo stendas pavaizduotas 6 pav., d. Atlikus matavimus ir išsamius tyrimus gauta, kad šio filtro ribinis dažnis ties -3 dB yra apie 2,55 GHz ir tik -0,08 GHz mažesnis nuo modeliuotos kompiuteriniu būdu, ir tik -0,05 GHz nuo išsikeltos 2,6 GHz tikslo. Slopinimas ties 4 GHz gautas apie 36,5 dB (kai kompiuterinio modeliavimo metu 36 dB) yra gerokai didesnis nei užsibrėžtas tikslas  $>24$  dB. Tuo tarpu dažninės charakteristikos netolygumai neviršijo

užsiduoto  $<0,1$  dB lygio. Matavimo ir kompiuterinio modeliavimo rezultatų palyginimo grafikas pateiktas 7 paveiksle.



**6 pav.** Paskirstytųjų parametų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis: a) vaizdas *Keysight ADS* programiniame pakete; b) vaizdas *Altium Designer* programiniame pakete; c) vaizdas pagamintoje spausdintinėje plokštėje; d) matavimo stendo vaizdas  
*Šaltinis: sudaryta autorių*





7 pav. Paskirstytųjų parametų žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis S21 perdavimo koeficiento kompiuterinio modeliavimo ir matavimo rezultatų palyginimas

Šaltinis: sudaryta autorių

### Išvados

1. Įprastuose diskretiniuose sutelktųjų parametų komponentuose, aukštuosiuose dažniuose pasireiškia pašaliniai parametrai, kurie gali ženkliai pakoreguoti komponento pilnutinę varžą, sukelti galios nuostolius ir pabloginti komponentų kokybę. Galima specialiai naudoti aukštųjų dažnių grandinėms skirtus komponentus, kuriuose pašaliniai parametrai yra ypatingai maži, tačiau jų kaina kelis kartus didesnė nei įprastų. Todėl šių komponentų naudojimas didina gaminamo įrenginio savikainą. Šioms problemoms spręsti dažnai naudojami paskirstytųjų parametų komponentai. Šiame darbe išsamiai pateikėme ir paaiškinome paskirstytųjų parametų, žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis projektavimo metodiką.

2. Pateikta žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis skaičiavimo metodika apima šiuos pagrindinius teorinio skaičiavimo žingsnius: filtro eilės ir konfigūracijos pasirinkimą atsižvelgiant į išsikeltus pagrindinius parametrus; projektuojamo filtro elementų *Richard* transformaciją; *Kuroda* tapatybių taikymą.

3. Siekiant patikrinti atliktus skaičiavimus ir atlikti žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis patikrą, buvo atliktas kompiuterinis modeliavimas, naudojant *Keysight ADS* programinį paketą. Kompiuterinio modeliavimo metu gauta, kad šio filtro ribinis dažnis ties -3 dB yra apie 2,65 GHz, slopinimas ties 4 GHz siekia net 36 dB, dažninės charakteristikos netolygumai mažesni nei 0,1 dB ir atitinka išsikeltus tikslus.

4. Siekiant pagaminti ir išmatuoti pagrindinius žemųjų dažnių filtro su atviromis kilpomis parametrus, su *Altium Designer* programiniu paketu buvo suprojektuota ir pagaminta šio filtro spausdintinė plokštė. Atlikus su vektoriniu grandynų analizatoriumi *LA19-1304B* perdavimo koeficiento S21 parametro matavimus gauta, kad šio filtro ribinis dažnis ties -3 dB yra apie 2,55 GHz ir tik -0,05 GHz mažesnis nei išsikeltas 2,6 GHz tikslo. Slopinimas ties 4 GHz, gautas apie 36,5 dB ir yra gerokai daugiau nei užsibrėžtas pradinis tikslas >24 dB, o dažninės charakteristikos netolygumai <0,1 dB.

### Literatūra

1. Altium. The Digital Engineer's Guide to RF PCB Design Guidelines: Layout and Routing. 2021. [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetė: <https://resources.altium.com/p/digital-engineers-guide-rf-pcb-layout-and-routing>
2. Altium. Altium Designer 24 From Requested to Required. 2024. [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetė: <https://www.altium.com/altium-designer/latest-release>
3. Bowick C., Bayler J., Aljuni C. RF Circuit Design 2nd edition. Elsevier. 2008.
4. Chen A. RF Design Considerations. VP of Technology, Laird, 2015. [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetė: <https://www.rfglobalnet.com/doc/rf-design-considerations-0001>
5. Jiang E. Understand RF PCB Design – view and solutions. 2018. [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetė: Prieiga per internetą: <https://www.ncabgroup.com/blog/understand-rf-pcb-design-view-and-solutions/>



6. Keysight. PathWave Advanced Design System. 2024 [Žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga Internetė: [www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html](http://www.keysight.com/us/en/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html)
7. Dong, M. RF Circuits and Applications for Practicing Engineers. Artech House. 2020.
8. Top 10 IoT applications in 2020. [Žiūrėta 2024-02-20] Prieiga Internetė: <https://iot-analytics.com/top-10-iot-applications-in-2020/>
9. White, J. F. High Frequency Techniques: An Introduction to RF and Microwave Engineering. John Wiley & Sons, 2016.

## DESIGN AND INVESTIGATION OF A DISTRIBUTED PARAMETER, LOW-FREQUENCY FILTER WITH OPEN-CIRCUITED STUBS

### Summary

Currently, in the design of high-frequency filters, discrete components with lumped parameters are most commonly used. However, due to the significant influence of parasitic parameters on the frequency characteristics of the filter, their design in high-frequency circuits becomes a complex, expensive, and sometimes impossible process. To address these challenges, distributed parameter components made of microstrip lines are proposed, allowing for the efficient design of high-frequency devices with the required frequency characteristics. Therefore, in this work, using Keysight ADS software and mathematical models, the geometric structure and main dimensions of a low-pass filter with open-circuited stubs are calculated and computer-modeled, and a printed circuit board designed for testing is designed. The filter is tested and examined experimentally using an LA19-1304B vector network analyzer. During the study, the following key parameters of the low-frequency filter are obtained: a cutoff frequency not exceeding 2.6 GHz, attenuation at 4 GHz of more than 24 dB, and frequency-response ripple not exceeding 0.1 dB. These filters are widely used and are relevant in modern wireless communication systems.

**Key words:** high-frequency circuits, measurements with a vector circuit analyzer, distributed parameter filters, printed circuit board, low-frequency filter design.

### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Erik Mickevič.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** inžinerijos mokslų bakalauras

**Darbo vietą ir pozicija:** Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros magistrantas.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** aukštadažnė elektronika.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 60957188, [erik.mickevic@stud.vilniustech.lt](mailto:erik.mickevic@stud.vilniustech.lt)

**Autoriaus vardas, pavardė:** Vaidotas Barzdėnas.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** daktaras, profesorius

**Darbo vietą ir pozicija:** Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VILNIUS TECH), Kompiuterijos ir ryšių technologijų katedros profesorius.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** aukštadažnė elektronika, integrinių grandynų projektavimas, šiuolaikinė mirko- ir nanoelektronika.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 68451453 [vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt](mailto:vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt)

### A COVER LETTER OF AUTHORS

**Author name, surname:** Erik Mickevič.

**Science degree and name:** bachelor of engineering

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, M. Sc. student.

**Author's research interests:** high-frequency electronics.

**Telephone and e-mail address:** 8 60957188, [erik.mickevic@stud.vilniustech.lt](mailto:erik.mickevic@stud.vilniustech.lt)

**Author name, surname:** Vaidotas Barzdėnas.

**Science degree and name:** Ph. D., professor.

**Workplace and position:** Vilnius Gediminas technical university (VILNIUS TECH), Department of Computer Science and Communications Technologies, professor.

**Author's research interests:** high-frequency electronics, integrated circuit design, modern micro- and nanoelectronics.

**Telephone and e-mail address:** 8 68451453 [vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt](mailto:vaidotas.barzdenas@vilniustech.lt)

# VIEŠO RAKTO SAUGUMO UŽTIKRINIMAS KRIPTOGRAFIJOJE: TEORINIAI IR PRAKTINIAI ASPEKTAI

Petras Nefas, Rūta Jankūnienė  
Kauno technikos kolegija

## Anotacija

Kriptografijoje plačiai naudojamas RSA (Rivest-Shamir-Adleman) algoritmas išlieka vienu iš labiausiai paplitusių viešo raktų šifravimo metodų. RSA raktai sugeneruojami vieną kartą atsitiktiniu būdu, o privatus užšifruoti raktai saugomi atskiroje laikmenoje. Vis dėlto, ši praktika neapsaugo nuo šifruoto privataus raktų galimo ištrynimo, jo pakeitimo, praradimo ar tikslingo pakeitimo. Autoriai pasiūlė naują pseudoatsitiktinio RSA raktų generatoriaus algoritmą (PARG), leidžiantį generuoti RSA raktus tiesiai iš slaptažodžio ir papildomų duomenų, taip vadinamos „druskos“ (angl. Salt). Atlikus praktinius testus, siekiant įvertinti statistines pasiūlyto algoritmo charakteristikas, nustatyta, jog jis yra deterministiškas, nes tai pačiai slaptažodžio ir „druskos“ porai generuojamas tas pats RSA raktas, taip pat šiuo būdu generuojami raktai savo statistinėmis savybėmis artimi atsitiktiniu būdu sugeneruotiems raktams. Tai leidžia aplikacijose atsisakyti raktų saugojimo, o generuoti raktus tada, kai to reikia. RSA raktų iš slaptažodžio generavimo algoritmas PBE metodo pagrindu algoritmas yra jautrus atakoms prieš slaptažodį, todėl naudojant jį aplikacijose svarbu numatyti priemones prieš šio tipo atakas.

**Reikšminiai žodžiai:** pseudoatsitiktinis RSA raktų generatorius (PARG), algoritmas, kriptografinis atsparumas, PBE metodas.

## Įvadas

RSA algoritmas, kurį sukūrė Rivest, Shamir ir Adleman 1977 m., iki šiol lieka vienu iš labiausiai paplitusių viešo raktų šifravimo metodų, dėl jo kriptografinio atsparumo ir nesudėtingo naudojimo [5]. RSA algoritmo saugumas remiasi viešo ir privataus raktų poros generavimu: viešasis raktas yra skelbiamas, o privatus raktas saugomas konfidencialiai. Tradiciškai RSA raktai aplikacijoje sugeneruojami vieną kartą atsitiktiniu būdu, o privatus užšifruoti raktai saugomi failų sistemoje arba išorinėje laikmenoje. Nors ši praktika laikoma saugia, tačiau ji neapsaugo nuo visų potencialių grėsmių: šifruotą privatųjį raktą galima ištrinti, jį galima pakeisti, išorinę laikmeną galima pamesti ar sugadinti.

Naujausi tyrimai, tokie kaip [2, 4] nagrinėja išplėstinius saugumo iššūkius ir sprendimus RSA šifravimo sistemoje. Juose pabrėžiama, kad raktų saugojimas ir valdymas vis dar yra sudėtingas uždavinys, ir pažymima, kad technologinė pažanga bei naujos atakų rūšys reikalauja nuolatinio saugumo metodų atnaujinimo. Nors šie tyrimai [2, 4] siūlo keletą techninių ir programinių sprendimų, dažnai trūksta realių sprendimų saugojimo problematikai – saugiai išsaugoti raktus potencialių atakų atveju. Šis trūkumas skatina naujų metodų, tokių kaip pseudoatsitiktinis RSA raktų generatorius, kūrimą, kurie generuotų raktus iš slaptažodžio realiu laiku, kai to prireikia, o ne visada.

Siekiant išspręsti RSA raktų saugojimo problemą, siūlomas naujas metodas – pseudoatsitiktinis RSA raktų generatorius (PARG). PARG – tai sistema, kurios išėjimas yra apibrėžtas ir priklauso nuo įėjimo parametro, bet išorėje atrodo atsitiktinis. PARG leidžia generuoti RSA raktus iš slaptažodžio ir „druskos“ kiekvieną kartą, kai to reikia, taip ne tik sumažinant riziką dėl raktų atskleidimo, bet ir užtikrina kriptografinį atsparumą. Terminas „druska“ kriptografijoje reiškia atsitiktinę reikšmę, pridėdamą prie slaptažodžio, siekiant padidinti saugumą ir apsaugoti nuo iš anksto apskaičiuotų žodynų atakų.

Kriptografinėje praktikoje yra žinomas grindžiamas slaptažodžiu šifravimo metodas PBE (angl. Password-Based Encryption), kurio dėka galima generuoti simetrinius kriptografinius šifravimo raktus iš slaptažodžio [1, 3]. Šio metodo kriptografinis atsparumas yra įvertintas [6]. PBE metodu sukurti šifravimo raktų generatoriai pasižymi minimalia koreliacija tarp įėjimo ir išėjimo bitų bei jautrumu įvesties pokyčiams, t.y. net ir minimalus toks pokytis sukelia didelius išvedimo pokyčius. PBE metodo realizacija yra žinoma įvairiomis programavimo kalbomis, taip pat ir Java kalba. Todėl būtų tikslinga adaptuoti PBE metodą RSA raktų generavimui.

**Tyrimo objektas** – RSA raktų iš slaptažodžio kriptografinis atsparumas.

Tad šio **tyrimo tikslas** - sukurti kriptografiškai atsparų pseudoatsitiktinį RSA raktų generatorių, kuris užtikrintų aukštą kriptografinį atsparumą bei pasižymėtų praktiniu pritaikomumu.

## Tyrimo uždaviniai:

1. PBE metodo pagrindu sukurti algoritmą, skirtą generuoti RSA raktus iš slaptažodžio.
2. Patikrinti PARG determinizimą, t.y. ar generatorius visada sukuria tą patį RSA raktą tam pačiam įvedimui.

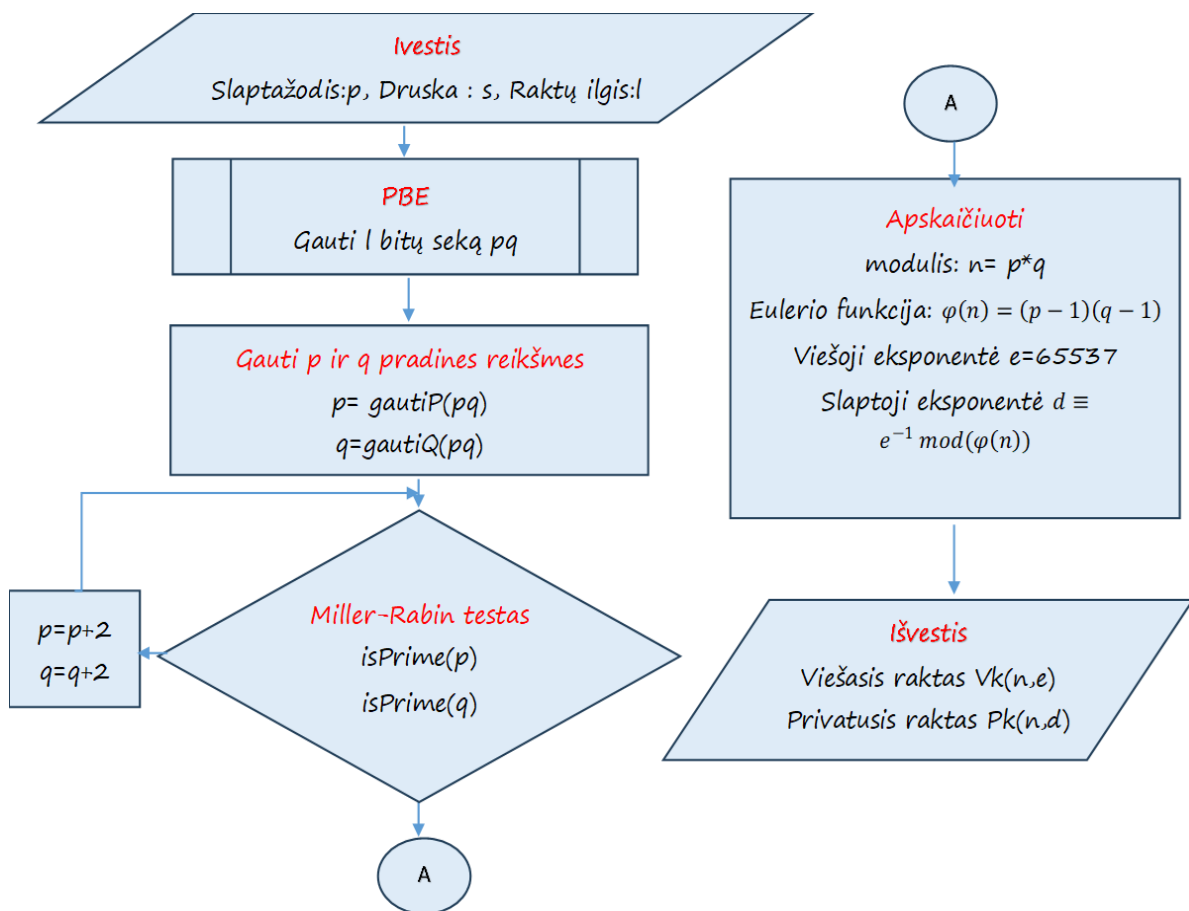
- Įvertinti generuojamų raktų atsitiktinumą, t. y. ar sugeneruoti RSA raktai atrodo tiek pat atsitiktiniai, kaip ir atsitiktinai sugeneruoti RSA raktai? Tai galima įvertinti, naudojant standartizuotus kriptografinius statistikos atsitiktinumą testus, tokius, kaip NIST FIPS 140-2 [9].
- Identifikuoti ir analizuoti galimas šio metodo saugumo grėsmes, pasiūlant tam prevencines.
- Sukurti praktinę PARG algoritmo panaudojimo realizaciją, skirtą failams šifruoti.

**Tyrimo metodai ir priemonės:** Turinio analizė, lyginamoji analizė.

Straipsnis sudarytas iš trijų dalių. Pirmojoje dalyje aptariamas RSA raktų generavimo algoritmas, remiantis PBE metodu. Antroje šio straipsnio dalyje įvertinamas šio algoritmo kriptografinis atsparumas dvejų kriterijų atžvilgiu: determinizmo ir atsitiktinumą, remiantis jau žinomais statistiniais testais. Pagrindiniai PARG metodo privalumai ir trūkumai, taip pat praktiniai jo panaudojimo aspektai, remiantis parašyta aplikacija JavaFX kalba, aptariami trečiojoje dalyje. Autorių siūlomo RSA raktų generavimo iš slaptažodžio ir „druskos“ metodo taikymo galimybės bei rekomendacijos pateikiamos šio straipsnio išvadose.

### RSA raktų iš slaptažodžio generavimo algoritmas PBE metodo pagrindu

RSA raktų iš slaptažodžio generavimo algoritmas remiantis PBE metodu susideda iš trijų esminių dalių (1 pav.).



**1 pav.** Pseudoatsitiktinio generatoriaus blokinė schema

Šaltinis: sudaryta autorių

Pirma, slaptažodžio ir „druskos“ konvertavimas į 2048 bitų ilgio atsitiktinę baitų seką atliekamas naudojant PBE metodą, paprastai taikomą simetrinio šifravimo raktų generavimui. Šiame algoritme naudojamas žinomas ir kriptografiškai atsparus PBE realizavimas – PBKDF2 funkcija, leidžianti generuoti ilgus atsitiktinius raktus iš slaptažodžio ir druskos, taip užtikrinant aukštą saugumo lygį.

Antra, ieškomi du 1024 bitų pirminiai skaičiai padalinant 2048 bitų atsitiktinę baitų seką į dvi 1024 bitų sekas. Pirmoji seka priskiriama skaičiui p, o antroji – q. Kiekvieno skaičiaus „jauniausias“ ir „vyriausias“ bitai (priklausomai nuo pozicijos dvejetainiame skaičiuje, bitai turi skirtingą vertę) nustatomi kaip vienetas, taip sukuriant du didelius 1024 bitų ilgio nelyginius skaičius. Šių skaičių priklausymas pirminiams tikrinamas naudojant tikimybinį Miller-Rabin testą. Algoritmas veikia kartojant kelis bandymus, siekiant sumažinti klaidos tikimybę. Jei skaičius nėra pirminis, jis padidinamas vienetu, kol randamas pirminis skaičius.

Tikimybė, kad atsitiktinai sugeneruotas skaičius  $x$  yra pirminis, apytiksliai lygi  $P(x) \sim \frac{1}{\ln(x)}$  (Gauso formulė). Dėl šios priežasties gali prireikti atlikti ne daugiau nei 50 žingsnių, kol bus rasti du dideli pirminiai skaičiai  $p$  ir  $q$ . Tai užtikrina, kad algoritmas yra efektyvus ir greitas, net ir ieškant didelių pirminių skaičių.

Trečia, RSA raktų poros generavimas prasideda turint du pirminius 1024 bitų skaičius  $p$  ir  $q$ . Pirmiausia apskaičiuojame modulio  $n$  reikšmę, padauginant  $p$  ir  $q$ . Toliau apskaičiuojame Eulerio funkciją  $\varphi(n) = (p - 1)(q - 1)$ . Viešojo eksponentė  $e$  pasirenkama atsitiktinai taip, kad  $1 < e < \phi$  ir  $\gcd(e, \phi) = 1$ . Paprastai  $e$  priskiriama 65537, nes tai didžiausias žinomas pirminis skaičius, turintis binarinėje išraiškoje tik du vienetus, o tai palengvina tolimesnius skaičiavimus. Privačiąją eksponentę  $d$  apskaičiuojame sprenddami lygtį  $d \equiv e^{-1} \pmod{\varphi(n)}$ . Galiausiai suformuojamas viešasis raktas, kurį sudaro modulis  $n$ , viešojo eksponentė  $e$  ir privatusis raktas, kurį sudaro modulis  $n$  ir privačioji eksponentė  $d$ .

Pagal blokinę schemą (1 pav.) sukurtas algoritmo kodas *Java* kalba yra pateiktas ir viešai prieinamas GitHub platformoje [8].

### PARG determinizmo ir atsitiktinumo vertinimas

Sukonstruotą pseudoatsitiktinį RSA raktų generatoriaus kriptografinį atsparumą tikslinga įvertinti pagal dvejus kriterijus. Pirmasis kriterijus yra determinizmas, parodantis, ar generatorius visada sukuria tą patį RSA raktą tam pačiam įvedimui. Antrasis kriterijus yra atsitiktinumas, kuris nagrinėja, kaip atsitiktinai atrodo išėjimo seka, t.y. ar sugeneruotas RSA raktas atrodo tiek pat atsitiktinis, kaip ir atsitiktinai sugeneruoti RSA raktai.

Straipsnio autoriai sukūrė generatoriaus prototipą ir atliko praktinius testus, įvertinusius šiuos du kriterijus. Pirmiausia buvo atliktas determinizmo vertinimas. Tam dešimčiai skirtingų slaptažodžių ir „druskos“ porų buvo sugeneruota po 100 RSA raktų. Testas atskleidė, kad su tuo pačiu slaptažodžiu ir „druska“ buvo gauti vienodi raktai, o tai rodo, kad algoritmas yra deterministinis įvedimo duomenims.

Atsitiktinumo vertinimas atliktas statistiniais testais: *Java* kalba sukurtas generatoriaus prototipas testuotas su NIST FIPS 140-2 statistinių testų rinkiniu. NIST FIPS 140-2 yra JAV vyriausybės sukurta testų sistema, skirta patikrinti kriptografinių modulių, tokių kaip atsitiktinių raktų generatoriai, gebėjimą generuoti iš tiesų atsitiktinius duomenis. Testų rinkinio realizacija įvairiomis programavimo kalbomis yra laisvai prieinama [10]. Tyrimo metu buvo sugeneruota 1000 RSA raktų, kiekvienam iš jų priskiriant skirtingą atsitiktinį slaptažodį. Iš kiekvieno rakto modulio ir slaptosios eksponentės buvo suformuota viena binarinė seka, kuri buvo ištestuota naudojant statistinių testų rinkinį. Kontroliniam tyrimui taip pat buvo sugeneruota 1000 atsitiktinių RSA raktų, su kuriomis buvo atlikti tie patys statistiniai testai. Gautos rezultatų vertės pateiktos 1 lentelėje:

Atlikus NIST FIPS 140-2 testus (1 lentelė), buvo įvertintas pseudoatsitiktinio RSA raktų generatoriaus išėjimo sekos atsitiktinumas.

1 lentelė

NIST FIPS 140-2 statistinių testų rezultatai

Testo pavadinimas	Mūsų programa	Atsitiktinai sugeneruoti RSA raktai
Frequency (Monobit) Test	0.81967	0.8524
Frequency Test within a Block	0.68284	0.9858
Runs Test	1.45018	1.0239
Test for the Longest Run of Ones in a Block	0.73968	0.7715
Binary Matrix Rank Test	0.36654	0.9081
Non-overlapping Template Matching Test	0.30301	0.2876
Overlapping Template Matching Test	0.17119	0.1415
Maurer's "Universal Statistical" Test	0.19092	0.09261
Linear Complexity Test	0.86229	0.21437
Serial Test	P-value 1: 0.9823 P-value 2: 0.97447	P-value 1: 0.81383 P-value 2: 0.54850
Approximate Entropy Test	0.735809	0.75421
Cumulative Sums (Cusum) Test	P-value Forward: 0.90462 P-value Reverse: 0.99015	P-value Forward: 0.81207 P-value Reverse: 0.91979
Random Excursions Test	0.468933	0.10896
Random Excursions Variant Test	0.061300	0.11622

Rezultatai parodė, kad pasiūlytas generatorius atitiko visų testų reikalavimus, išskyrus *Runs* testo. Pastarojo testo „neįveikė“ ir atsitiktinai sugeneruoti raktai. Tai galėjo sąlygoti RSA rakto struktūros specifika, nes modulio „jauniausias“ ir „vyriausias“ bitai yra vienetai, nes modulis yra dviejų pirminių, t.y. nelyginių skaičių sandauga ir pats savo ruožtu yra nelyginis skaičius. O tai ir įrodo, kad sukurto generatoriaus išėjimo seka yra praktiškai nesiskirianti nuo atsitiktinai sugeneruotos sekos ir yra tinkama generuoti RSA raktams.

### **PARG: privalumai ir trūkumai**

Vienas iš galimų trūkumų yra jautrumas slaptažodžio atakoms. Kaip ir visos PBE (angl. Password-Based Encryption) schemas, pasiūlytas metodas yra jautrus atakoms prieš slaptažodį. Siekiant sumažinti šią riziką, realizuojant aplikacijoje RSA rakto generavimą tiesiai iš slaptažodžio, būtina imtis šių atsargumo priemonių:

1. Nustatyti reikalavimus reikiamo sudėtingumo slaptažodžiui: minimalų jo ilgį, įvairius simbolius (didžiosios ir mažosios raidės, skaičiai, specialieji simboliai).
2. Pailginti atsako laiką: įvesti papildomą vėlinimą, taip apsunkinant *brute-force* atakas.
3. Riboti prisijungimų skaičių: įdiegti mechanizmą, kuris ribotų prisijungimų bandymų skaičių per tam tikrą laiko tarpą, siekiant užkirsti kelią automatizuotoms atakoms.
4. Saugoti slaptažodį: saugiai saugoti slaptažodžius kriptografinė forma, nenaudojant grįžtamojo šifravimo.

Unikalumo užtikrinimas yra svarbus, nes RSA raktai naudojami tiek šifravimo raktų šifravimui, tiek vartotojo identifikavimui. Todėl būtina užtikrinti, kad sugeneruotas RSA raktas būtų unikalus. Tai galima pasiekti naudojant unikalius vartotojų vardus sistemoje, kaip generatoriaus įėjimo parametą – „*druską*“. Pavyzdžiui, galima naudoti vartotojo elektroninio pašto adresą. Be to, rekomenduojama nenaudoti slaptažodyje vartotojo vardo fragmentų, nes tai gali palengvinti atakas prieš slaptažodį.

Slaptažodžio atstatymo mechanizmas yra būtinas, kadangi vartotojai gali jį pamiršti. Sistema turėtų leisti jam atkurti slaptažodį naudojant atsarginį elektroninio pašto adresą, saugos klausimą ar kitą atkūrimo mechanizmą.

Svarbu pažymėti, kad slaptažodžio keitimo mechanizmas tokioms sistemoms nėra įmanomas taip paprastai, kaip tradicinėse autentifikavimo sistemose. Slaptažodžio pakeitimas iš esmės reikštų naujos RSA raktų poros generavimą, o tai gali sukelti problemų su jau užšifruotais duomenimis. Todėl slaptažodžio keitimo funkcionalumas turėtų būti kruopščiai suplanuotas ir įgyvendintas atsižvelgiant į specifinius sistemos reikalavimus.

Nors pseudoatsitiktinio RSA raktų generatoriaus naudojimas suteikia tam tikrų privalumų, tokių kaip atsisakymas iš anksto saugoti raktus, būtina atidžiai įvertinti galimus trūkumus ir problemas, susijusius su slaptažodžio saugumu, unikalumu ir atkūrimo mechanizmais. Atsakingas šių aspektų įgyvendinimas leistų užtikrinti aukštesnį sistemos saugumo lygį.

### **Praktinis RSA rakto generatorius pritaikymas**

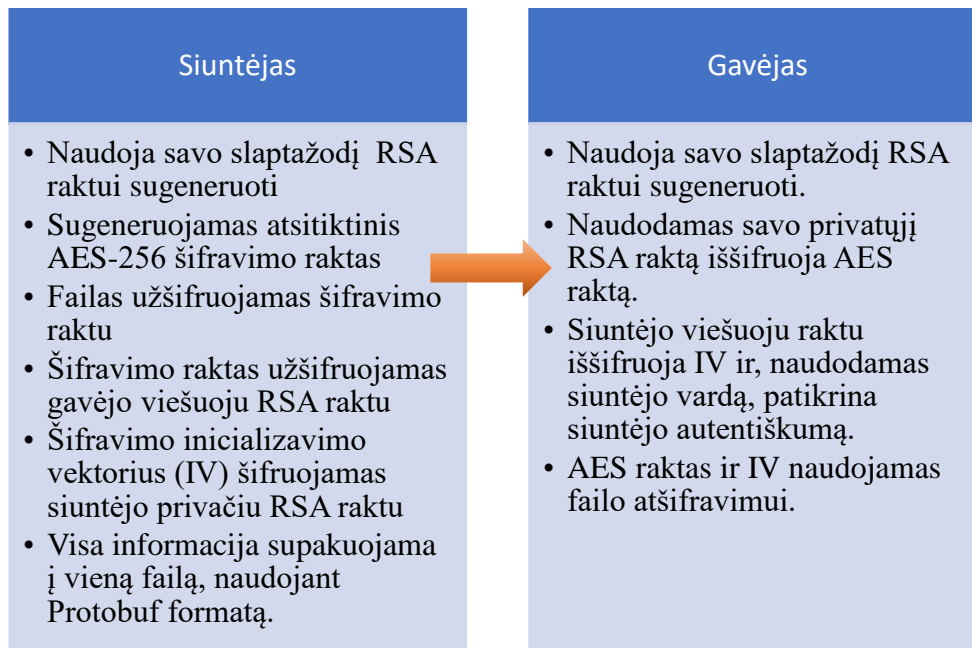
Sukurta programinė įranga JavaFX kalba, skirta saugiai dalintis šifruotais failais per *debesijos* paslaugas. Šios programinės įrangos pagalba buvo iširtas pseudoatsitiktinis RSA raktų generatorius. Sukurta JavaFx aplikacija yra pasiekama per GitHub platformą [7].

Aplikacija nesaugo jokios slaptos informacijos lokaliai; RSA raktai yra generuojami realiu laiku iš vartotojo slaptažodžio ir prisijungimo vardo, viešaisiais raktais su potencialiais adresatais vartotojas apsieičia per *debesį* iš anksto, saugykloje saugomas tik slaptažodžio maišos kodas ir potencialių adresatų viešieji raktai. Ši struktūra užtikrina, kad privatūs duomenys lieka konfidencialūs ir apsaugoti nuo nepageidaujamos prieigos.

Pagrindinės aplikacijos funkcijos:

1. **Failų šifravimas:** Naudojamas atsitiktinai sugeneruotas AES-256 algoritmo šifravimo raktas kiekvieno failo šifravimui.
2. **Šifravimo rakto apsauga:** AES raktas šifruojamas naudojant gavėjo viešąjį RSA raktą, užtikrinant, kad failą galėtų iššifruoti tik teisėtas gavėjas.
3. **IV apsauga:** Šifravimo inicializavimo vektorius (IV) šifruojamas siuntėjo privačiu raktu, apsaugant nuo apsimetinėjimo ir IV manipuliavimo atakų.
4. **Siuntėjo autentiškumo patikrinimas:** Siuntėjo vardas siunčiamas nešifruotai, o gavėjas naudoja šį vardą, kad pasirinktų atitinkamą siuntėjo viešąjį raktą ir iššifruotų IV.
5. **Universalumas:** Visa šifruota informacija, įskaitant failo turinį, šifravimo raktą ir kitus metaduomenis, supakuojama į vieną binarinį failą, naudojant *Protobuf* formatą, kuris savo savo universalumu palaiko klientus, parašytus įvairiomis programavimo kalbomis.

Failų šifravimo ir dešifravimo schema pateikta 2 paveikslėlyje.



**2 pav.** Šifravimo ir dešifravimo schema  
*Šaltinis: sudaryta autorių*

Aplikacijos privalumai:

- Aukštas duomenų saugumo lygis- šifravimui naudojama AES -256 raktai.
- Programa palaiko kelių gavėjų adresavimą.
- Aplikacija užtikrina aukštą duomenų saugumą, nesaugodama jokios slaptos informacijos savo saugykloje.
  - Kadangi programa nesaugo savo raktų, galimas lygiagretus darbas iš kelių darbo vietų bei galimas kelių vartotojų darbas iš vienos darbo vietos.
  - Tinka asmeniniam, komerciniam naudojimui ar mokymo tikslais.

### Išvados

1. Sukurtas naujas iki šiol mokslinėje literatūroje nepublikuotas algoritmas, leidžiantis sugeneruoti RSA raktus tiesiai iš slaptažodžio ir „druskos“. Šis algoritmas yra deterministinis, tai yra, tai pačiam slaptažodžio ir druskos porai generuojamas tas pats RSA raktas. Generuojami raktai savo statistinėmis savybėmis yra panašūs į atsitiktiniu būdu sugeneruotus raktus. Tai leidžia aplikacijose atsisakyti raktų saugojimo ir generuoti raktus tik tada, kai jų reikia. Tai taip pat leidžia naudotis savo privačiu RSA raktu skirtingose darbo vietose, nenaudojant iš anksto įrašyto rakto.
2. Kaip ir visos PBE schemas, šis algoritmas yra jautrus atakoms prieš slaptažodį, todėl, naudojant jį aplikacijose, svarbu atsižvelgti į reikalavimus slaptažodžio sudėtingumui, atsako laiko ilginimą, tai ppat į nesėkmingų prisijungimų prie aplikacijos skaičiaus ribojimą.
3. Tokio tipo aplikacijoms svarbu sukurti slaptažodžio atstatymo procedūrą. Slaptažodžio keitimo mechanizmas tokioms sistemoms neįmanomas – tai iš esmės reiškia naujos RSA raktų poros generavimą.
4. Praktinis pritaikymas: yra sukurta JavaFx aplikacija, realizuojanti RSA raktų generavimo tiesiai iš slaptažodžio mechanizmą. Ši aplikacija skirta saugiai dalintis šifruotais failais *debesyse*.

### Literatūra

1. Dodis, Y., & Katz, A. Security Analysis of Password-Based Encryption. *Cryptology ePrint Archive*, Report 2014/371, 2014. [žiūrėta 2023-08-06]. Prieiga per internetą: [eprint.iacr.org/2014/371](http://eprint.iacr.org/2014/371)
2. Erdőgdu, M. A., & Papakonstantinou, P. A. A New Approach to Secure Password and Parameter Storage. *Proceedings of the 2014 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*.
3. Girault, M., & Tiran, P.. Key Generation from Passwords: The State of the Art. *Cryptology ePrint Archive*, Report 2018/435, 2018. [žiūrėta 2023-10-24]. Prieiga per internetą: [eprint.iacr.org/2018/435](http://eprint.iacr.org/2018/435)
4. Libert, B., Peters, T., & Yung, M. Condensed Unpredictability. *Cryptology ePrint Archive*, Report 2013/126.
5. Menezes, A. J., van Oorschot, P. C., & Vanstone, S. A.. *Applied Cryptography: Protocols, Algorithms, and Source Code*. John Wiley & Sons, 1996. [žiūrėta 2023-09-15]. Prieiga per internetą: [www.amazon.com/Applied-Cryptography-Protocols-Algorithms-Source/dp/0471128457](http://www.amazon.com/Applied-Cryptography-Protocols-Algorithms-Source/dp/0471128457)
6. Menezes, A., van Oorschot, P., & Vanstone, S. Password-Based Encryption: A Survey, 2016.

7. PARG aplikacija. Prieiga per internetą: [github.com/PetrasN/SifravimasRSAGenerator](https://github.com/PetrasN/SifravimasRSAGenerator)
8. PARG kodas Java kalba. Prieiga per internetą: [github.com/PetrasN/RSARaktuGeneratorius1](https://github.com/PetrasN/RSARaktuGeneratorius1)
9. Rukhin, A., et al.. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications. *NIST Special Publication 800-22*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2001.
10. The NIST Statistical Test Suite (STS). Prieiga per internetą: [github.com/terrellmoore/NIST-Statistical-Test-Suite](https://github.com/terrellmoore/NIST-Statistical-Test-Suite)

## ENSURING PUBLIC KEY SECURITY IN CRYPTOGRAPHY: THEORETICAL AND PRACTICAL ASPECTS

### Summary

The RSA (Rivest-Shamir-Adleman) algorithm, which is widely used in cryptography, remains one of the most common public key encryption methods. RSA keys are generated once randomly, and private encrypted keys are stored on a separate medium. The authors proposed a new pseudorandom RSA key generator algorithm (PARG) that allows generating RSA keys directly from the password and additional data, the so-called "Salt". After performing practical tests, in order to evaluate the statistical characteristics of the proposed algorithm, it was found that this algorithm is deterministic, because the same RSA key is generated for the same password and "salt" pair, as well as the keys generated in this way are close to randomly generated keys. This allows applications to refuse to store keys and generate them when needed. Algorithm for generating RSA keys from a password based on the PBE method, the algorithm is sensitive to attacks against the password, so when using it in applications, it is important to provide measures against this type of attacks.

**Key words:** Pseudorandom RSA Key Generator (PARG), algorithm, cryptographic robustness, PBE method.

### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Petras Nefas.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** mokslų daktaras.

**Darbo vietą ir pozicija:** Kauno technikos kolegija, Inžinerijos mokslų fakultetas, Elektronikos technikos studijų programos docentas.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** telekomunikacinių tinklų ir duomenų perdavimo saugumas, kriptografija.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** +370 630 01115, [petras.nefas@edu.ktk.lt](mailto:petras.nefas@edu.ktk.lt)

**Autoriaus vardas, pavardė:** Rūta Jankūnienė.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** daktarė.

**Darbo vieta ir pozicija:** VšĮ Kauno technikos kolegijos, Inžinerijos mokslų fakulteto, elektronikos technikos studijų programos kuratorė, docentė. VšĮ Kauno technologijos universitetas, Mechanikos ir dizaino fakultetas, Transporto inžinerijos katedra, lektorė.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** paslaugų kokybė, belaidžių tinklų sauga ir darbingumas, telekomunikacinio tinklo darbingumo modeliavimas.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** +370 652 19844, [ruta.jankuniene@edu.ktk.lt](mailto:ruta.jankuniene@edu.ktk.lt)

### A COVER LETTER OF AUTHORS

**Author name, surname:** Petras Nefas.

**Science degree and name:** doctor.

**Workplace and position:** University of Applied Engineering Sciences, Faculty of Engineering Sciences, studies program of Electronics Engineering, associated professor.

**Author's research interests:** security of telecommunication networks and data transmission, cryptography.

**Telephone and e-mail address:** +370 630 01115, [petras.nefas@edu.ktk.lt](mailto:petras.nefas@edu.ktk.lt)

**Author name, surname:** Rūta, Jankūnienė.

**Science degree and name:** doctor.

**Workplace and position:** University of Applied Engineering Sciences, Faculty of Engineering Sciences, studies program of Electronics Engineering, associated professor. Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Transport Engineering, lecturer.

**Author's research interests:** quality of service, security and operability of wireless networks, simulation of telecommunication network operability.

**Telephone and e-mail address:** +370 652 19844, [ruta.jankuniene@edu.ktk.lt](mailto:ruta.jankuniene@edu.ktk.lt)



# KROVOS DINAMIKA BALTIJOS ŠALIŲ JŪRŲ UOSTUOSE

**Diana Šateikienė, Gabrielė Rancaitė**

*Klaipėdos valstybinė kolegija*

## **Anotacija**

Klaipėdos valstybinis jūrų uostas yra didžiulis Lietuvos transporto centras, kuriame susijungia skirtingi keliai iš rytų ir vakarų bei eina pagrindinės laivybos linijos, jungiančios skirtingus žemynus. Jūrų uoste vyksta krovinų krova, sandėliavimas bei paskirstymas, kurie yra besikeičiantys apimties atžvilgiu. Krovos dinamika yra kiekvieno jūrų uostų efektyvumo rodiklis, kuris yra siejamas su krovos kompanijose vykdoma veikla bei kraunamų krovinų srautais, todėl būtina išnagrinėti veiksnius, kurie gali turėti įtakos krovinų krovos kitimui. Šiame darbe yra analizuojama ir palyginama krovos dinamika Baltijos šalių jūrų uostuose - Klaipėdos, Rygos ir Talino. Atlikus penkių metų krovos dinamikos analizę, identifikuoti faktoriai turėję įtakos skirtingų krovinų krovos dinamikai. Analizė atlikta skirtingų krovinų tipams identifikuojant dinamikos pokyčius bei juos lėmusius faktorius.

**Reikšminiai žodžiai:** krovos dinamika, generaliniai kroviniai, skystieji kroviniai, birūs kroviniai, jūrų uostai.

## **Įvadas**

Šiandieniniame pasaulyje logistikos procesai yra neatsiejamai svarbūs, nes kiekvieno mūsų naudojami daiktai yra vienaip ar kitaip susiję su krovinų gabenimu, sandėliavimu bei jų paskirstymu. Didelė dalis prekių yra gabenamos jūrų transportu, nes visuomenė globalizuojasi ir prekės keliauja po visą pasaulį, todėl jūrų uostai yra svarbūs prekybos tinklų mazgai, palengvinantys produktų judėjimą tarp regionų. Uostų veiklos pagrindas yra krovinų srautai, kurių kiekiui turi įtakos daugybė skirtingų faktorių. Krovinų rinka yra nuolatos kintanti, vieni srautai nutrūksta, o jų vietoje formuojasi nauji. Yanikov, Smirnov, Lukina ir Mayorov (2019) teigia, kad krovinų pervežimas yra vienas pagrindinių komponentų įmonėse siekiant vykdyti sėkmingą veiklą, o krovos dinamika parodo, kaip uostas sugeba vykdyti veiklą, ko pasėkoje daro didelį poveikį regionų ekonomikai, nes krovinų apyvarta skatina ekonominį augimą ir didindama prekybą. Kadyraliev ir kt. (2022) teigia, kad transporto infrastruktūra garantuoja ekonominį vystymąsi, nes krovinų dinamiką galima glaudžiai susieti su transporto infrastruktūra. Tuo atveju, kai krovinų apyvarta yra didelė, galima teigti, kad transporto infrastruktūra yra išnaudojama efektyviai ir didelės apyvartos uostai prisideda prie darbo vietų kūrimo ir ekonominės plėtros. Rodrigue ir Notteboom (2020) teigia, kad uostai veikia kaip katalizatoriai, kurie skatina vystymąsi konkrečiuose ekonomikos sektoriuose ir vietose, o krovos dinamika uostuose yra ypač svarbi uostų funkcionavimo dalis, kuri gali padėti skatinti šalių ekonomiką augti, kurti darbo vietas.

Vykdamas uostų plėtrą ir investicijas į infrastruktūrą, siekiant veiklą vykdyti mažiau teršiant aplinką, svarbu įvertinti krovinų srautų pokyčius, kurie atsiranda dėl pokyčių krovinų rinkoje. Todėl krovinų srautų analizė ir prognozės yra vienas svarbiausių jūrų uostų plėtros pagrindimo uždavinių, siekiant tapti žaliuoju uostu.

**Tikslas:** Identifikuoti faktorius, lėmusius Baltijos šalių jūrų uostų krovinų krovos dinamiką.

**Uždaviniai:**

1. Nustatyti veiksnius, turinčius įtakos jūrų uosto krovos dinamikai.
2. Išnagrinėti krovos dinamikos pokyčius Baltijos šalių jūrų uostuose.
3. Palyginti krovos dinamiką Baltijos šalių jūrų uostuose.

**Darbo metodas:** mokslinių šaltinių analizė, statistinių duomenų analizė.

## **Veiksniai turintys įtakos jūrų uosto krovos dinamikai**

Krovos dinamika jūrų uostuose yra esminis faktorius, kuris lemia veiklos efektyvumo rodiklį. Šis parodo per tam tikrą laiką uoste kraunamų ir gabenamų krovinų kiekį tonomis ir yra įtakojamas daugelio veiksnių, kurie gali atsirasti vykdamas logistinius procesus.

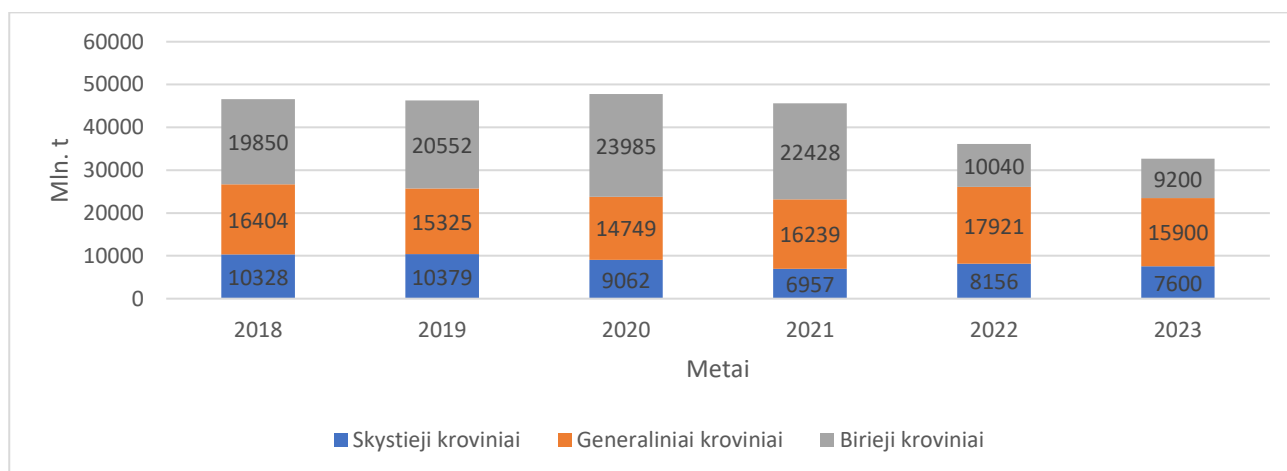
Krovinų apyvarta yra glaudžiai susijusi su pasaulyje vykstančiais procesais, kurie apima ekonomikos augimą ir rinkos paklausą. Rodrigue ir Noyeboom (2020) teigia, kad plėtojant tarptautinę prekybą pasitelkiant jūrų transportą prekių gabenimui iš dalies išaugo dėl nuolatinio ekonominio augimo. Nuolatinis ekonominis augimas daro įtaką globalizacijai ir rinkos paklausai, ją nuolat didinant. Tarptautinės prekybos apimčių svyravimai, vartotojų poreikių pokyčiai nuolat daro didžiulę įtaką uosto krovos dinamikai. Krovos dinamiką įtakoja pramonės sektoriai ir prekių rūšys dominuojančios prekybos srautus. Serry (2019) teigia, kad Baltijos pakrantės uostai yra koridorius tarp rytų ir vakarų Europos, ši geografinė padėtis padėjo Baltijos uostams klestėti gabenant naftą ir dujas. Uostai, kuriuose perkraunami kroviniai, kurie įtakoja tos šalies pramonės sektorius, gali patirti svyravimus dėl prekių kiekio augimo ar mažėjimo. Karas Ukrainoje paveikė Baltijos šalių uostų krovos dinamiką. Įvairūs politiniai veiksniai lėmė svyravimus tarp krovinų, kuriuos perkraudavo Baltijos šalių uostai. Krovos dinamiką gali įtakoti ir logistiniai veiksniai, tokie kaip infrastruktūra, nes uostai,

kurie turi gerai išvystytą infrastruktūrą, tokią kaip automobilių kelius ar geležinkelius, turi daugiau galimybių pritraukti didelius krovinių srautus. Kadyraliev ir kt. (2022) teigia, kad transporto infrastruktūra yra veiksnys, užtikrinantis ekonominį augimą ir darnų prekių judėjimą. Gerai išvystyti transporto tinklai gali padidinti krovos dinamiką uostuose, užtikrinant nenustojamą krovinių judėjimą tarp šalių. Ghiara ir Tei (2021) teigia, kad uosto efektyvumas ir terminalo našumas yra pagrindiniai veiksniai lemiantys uosto plėtrą. Šiuolaikiniai uostų terminalai, į kuriuos yra investuojama ir kurie yra automatizuoti ir modernūs suteikia galimybę pilnai išnaudoti jų potencialą. Krovos dinamika yra neatsiejama ir nuo ekonominių veiksnių. Vo ir Tran (2021) teigia, kad koronaviruso pandemija paveikė ryšius, darbo vietas, prekybą, vartojimą bei viso pasaulio ekonomiką, kas tiesiogiai siejama su uosto veikla.

Kiekvieno jūrų uosto krovos dinamikai turi įtakos patys įvairiausi veiksniai, pradedant nuo ekonominių, politinių baigiant pačio uosto situacija, jo investavimu į modernizaciją ir investavimą.

### Krovos dinamika Baltijos šalių jūrų uostuose

*Krovos dinamika Klaipėdos uoste.* Šis uostas yra ypatingas tuo, kad jis yra neužšalantis. Grauslytė, A. Žukauskaitė ir J. Žukauskaitė (2023) teigia, kad uostai yra pagrindinis globalizacijos rodiklis ir prekybos pagrindas. Klaipėdos uoste yra atliekama daugiausiai multimodalinių krovinių pervežimų tarp Baltijos šalių. Lietuvos strateginė padėtis tarp Baltijos šalių, suteikia Klaipėdos uostui galimybę pervežti krovinius į ir iš įvairių šalių. Abramovičiūtė ir Valionienė (2019) teigia, kad jūrų uostų veiklą apibūdina krovinių apyvarta ir finansiniai rodikliai. Krovos dinamika yra svarbus rodiklis, norint įvertinti uosto veiklą ir gaunamą pelną. vadovaujantis Klaipėdos uosto 2019 metų veiklos ataskaitoje pateiktais duomenimis galima teigti, kad krovos dinamika 2019 metais palyginti su 2018 metais krito 0,7% (žiūrėti 1 pav.), tai lėmė išoriniai veiksniai, tokie kaip pasibaigusios sutartys.



**1 pav.** Krovos dinamika Klaipėdos uoste

*Šaltinis:* sudaryta autorių pagal Klaipėdos uosto veiklos ataskaitas

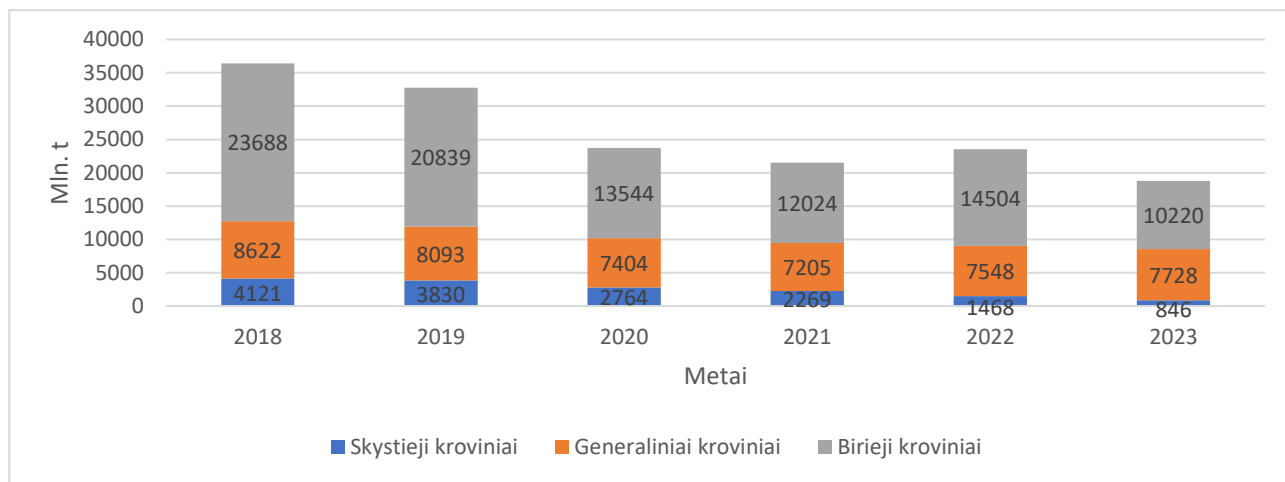
Naftos krovos mažėjimą lėmė vykdomi planiniai remontai naftos perdirbimo įmonėse, bet SGD krova padidėjo dėl išsiplėtusio terminalo naudotojų rato. Biriųjų krovinių krova išaugo dėl kylančios grūdų kainos, bet generalinių krovinių krova sumažėjo dėl prekių ir paslaugų eksporto mažėjimo. Remiantis Klaipėdos uosto 2020 metų veiklos ataskaita, 2020 metais, lyginant su 2019 metais, krovos dinamika išaugo 3,3 %. Biriųjų krovinių krova išaugo dėl baltarusiškų trąšų kiekio augimo ir dėl Lietuvos grūdų derliaus. Skystųjų krovinių krovos dinamikos mažėjimui įtakos turėjo naftos produktai dėl Rusijos ir Saudo Arabijos nesutarimų. Taip pat galima matyti generalinių krovinių krovos dinamikos mažėjimą dėl Covid-19 pandemijos. Vo ir Tran (2021) teigia, kad pasaulinė Covid-19 pandemija įtakojė įvairius transporto sektorius, tokius kaip laivyba ir lėmė prekybos sąnaudų išaugimą. Dėl šios pandemijos smarkiai sumažėjo konteinerių apyvarta ir išaugo transportavimo kainos.

2021 metais lyginant su 2020 metais, krovos dinamika krito 4,6 %. Tam įtakos turėjo skystųjų krovinių krova, tai lėmė naftos krovos mažėjimas dėl pasaulinių tendencijų. Europos Sąjunga priėmė reglamentą, kuriuo siekiama iki 2050 m. užtikrinti klimato neutralumą. Naftos produktų krovos mažėjimą lėmė prarasta Baltarusijos naftos produktų krova dėl taikomų sankcijų, o biriųjų krovinių krova sumažėjo dėl Lietuvos grūdų derliaus tais metais ir dėl Baltarusijos trąšų krovos sumažėjimo dėl taikomų sankcijų. Slunkin, Shraibman ir Hubavara (2021) teigia, kad didžiąją dalį krovinių parkeliaujančių iš Baltarusijos sudarė trąšos. Generalinių krovinių krova išaugo dėl atsidariusios naujos laivybos linijos.

2022 metais krovos dinamika sumažėjo 20,8 % lyginant su parėjusiais 2021 metais, tam didelę įtaką padarė biriųjų krovinių krovos dinamikos sumažėjimas, kurį lėmė Rusijos agresija Ukrainai. Pasak Kuczyńska-Zonik ir Sierzputowska (2023) Rusijos agresija atnešė pokyčių ekonominiuose santykiuose su Baltijos šalimis, šioms blokuojant eksportą į Rusiją, šis karas pakeitė Baltijos šalių santykius su Rusija ir Baltarusija. Dėl sankcijų buvo netekta Baltarusiškų trąšų, sustojo medienos, cemento ir metalo eksportas iš Baltarusijos. Skystųjų krovinių krova išaugo dėl Rusijos veiksmų, siekiant išnaudoti SGD terminalą. Generalinių krovinių krova išaugo dėl Lietuvos Respublikos Vyriausybės 2022 m. vasario 9 d. nutarimo, kuris padeda konteinerių perskirstymo veiklai skatinti.

2023 m. krovinių apyvarta mažėjo visose analizuojamose krovinių grupėse. Nors tranzitinis krovinių srautas praktiškai išnyko, bendra krova, palyginus su 2022 metais krito 9 %, tranzitinio srauto netekimą iš dalies kompensavo augusi grūdų ir kitų žemės ūkio produktų, suskystintų gamtinių dujų, statybinių medžiagų krova. Jakštas (2021) teigia, kad Baltijos šalys per praėjusius 10 metų vis stengiasi atsiriboti nuo priklausomybės vienam dujų tiekėjui. Klaipėdos uosto krova pastaraisiais metais mažėja dėl pasaulį paveikusių veiksnių, tokių kaip karas Ukrainoje, sankcijos su Baltarusija, koronaviruso pandemija ir kitų įvairių veiksnių, tokių kaip pasibaigusios sutartys, Europos Sąjungos ir Lietuvos įstatymai.

**Krovos dinamika Rygos uoste.** Rygos uostas yra pagrindinis logistikos, prekybos ir ekonominio augimo centras Latvijoje. Liebuviene ir Čižiūniene (2021) teigia, kad Latvija istoriškai buvo viena iš pagrindinių tranzito šalių šiaurės-pietų ir rytų-vakarų prekybai. Rygos uostas, išikūręs geografiškai patogioje vietoje yra itin svarbus siekiant gabenti prekes šiomis kryptimis, uosto krovinių srautų dinamika pateikta 2 paveiksle.

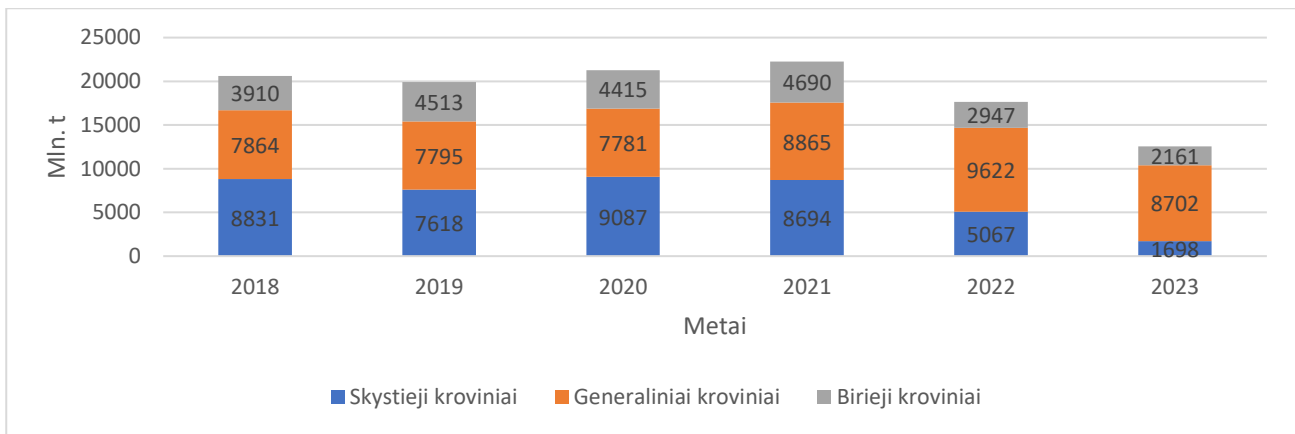


**2 pav.** Krovos dinamika Rygos uoste

*Šaltinis:* sudaryta autorių pagal Rygos uosto krovos dinamikos ataskaitas

Lyginant Rygos uosto krovą 2019 metais su 2018 metais, nustatyta, kad krova sumažėjo 10,1 %, tai nulėmė mažiau gabenami energetiniai išteklių, tokie kaip anglis. 2020 metais krova dar sumažėjo 27,6 %, kuriai įtakos turėjo visą pasaulį paveikusi Covid-19 pandemija. Vo ir Tran (2021) teigia, kad koronaviruso pandemija stipriai paveikė pasaulinę prekybą. Krovos dinamikos mažėjimas Rygos uoste užfiksuotas ir 2021 metais, nes perkrauta 9,34 % mažiau nei 2020 metais. Šiam sumažėjimui didžiausią įtaką turėjo birieji kroviniai, nes tai lėmė Europos Sąjungos sankcijos Baltarusijai. Pasak Slunkin, Shraibman ir Hubavara (2021) dėl įvestų sankcijų Latvija prarado galimybę pritraukti papildomo krovinių tranzito iš Baltarusijos. 2022 metais nustatytas 8,6% krovinių apyvartos padidėjimas, kuriam įtakos turėjo didelės investicijos į Rygos uosto modernizavimą, automatizavimą ir vystymą. Kadyraliev ir kt. (2022) teigia, kad šalys stengiasi savo išteklius paskirstyti taip, kad būtų gaunama maksimali grąža. Rygos uostui ši investicija 2022 metais pasitvirtino. Bet 2023 metais užfiksuotas 20,1 % krovos dinamikos sumažėjimas, kuris gali būti įtakotas besitęsiančio karo Ukrainoje ir sankcijų Baltarusijoje. Rygos uosto krovos dinamika svyruoja dėl panašių veiksnių kaip ir Klaipėdos uosto krovos dinamika.

**Krovos dinamika Talino uoste.** Estijos pagrindinis uostas yra Taline, kuris jungia ją su įvairiais prekybos keliais ir skatina ekonominę plėtrą. Remiantis Talino uosto 2019 metų veiklos ataskaita, 2019 metais, lyginant su 2018 metais (žiūrėti 3 pav.), krovos dinamika sumažėjo 3,3 %, tai nėra žymus pokytis, bet jį galėjo įtakoti laikinas atsiribojimas nuo rusiškų produktų dėl Tarptautinės jūrų organizacijos.

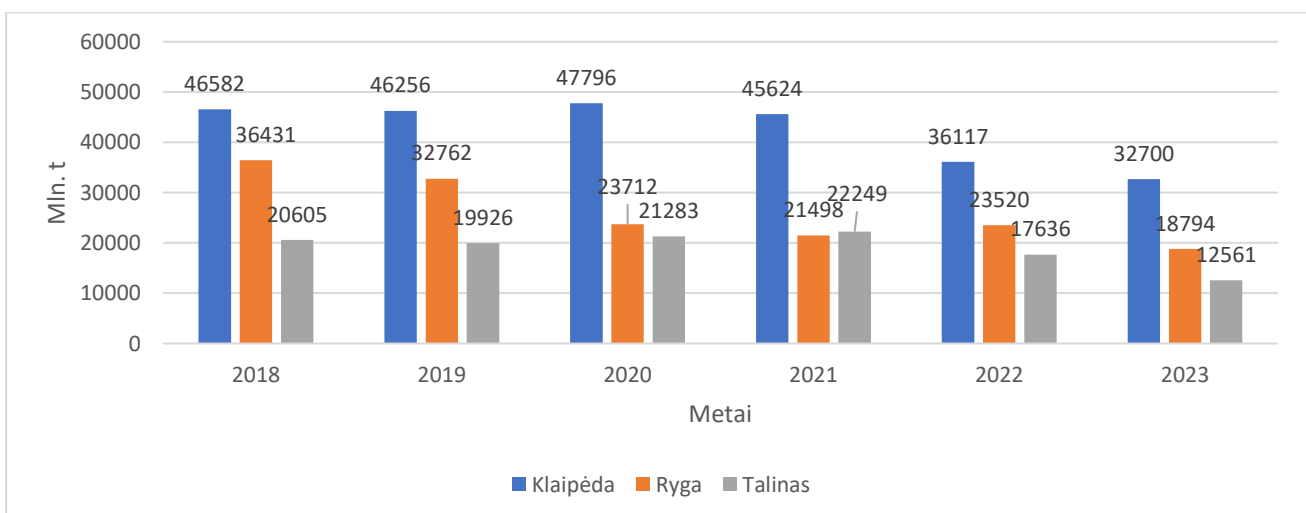


### 3 pav. Krovos dinamika Talino uostuose

Šaltinis: sudaryta autorių pagal Talino uosto veiklos ataskaitas

Pasak Bilgili (2021) Tarptautinė jūrų organizacija paruošė reglamentą, kuris siekė iki 2020 metų sumažinti laivų išmetamą sieros oksidą. Siekiant patenkinti šį reglamentą, laikinai buvo vengta naudoti rusišką kurą ir jo krova sumažėjo. 2020 metais augo 7 % dėl ro-ro krovinių, kurie nesustojo dėl Talino-Helsinkio maršruto, kuris nebuvo stipriai paveiktas dėl koronaviruso pandemijos, bei išaugo skystųjų krovinių krova. Talino uosto 2021 metų ataskaitoje rašoma, kad krova tais metais išaugo 5% dėl ro-ro ir biriųjų krovinių apyvartos augimo. Biriųjų krovinių krova augo dėl daugiau pervežamo žvyro ir medienos granulių, kurios kompensavo grūdų krovos sumažėjimą dėl sankcijų su Baltarusija. Pasak Slunkin, Shraibman ir Hubavara (2021) Estijos ekonomikos stipriai nepalietė konfliktas su Baltarusija. Sumažėjus grūdų krovai, Talino uostas pakeitė šį kraunamą produktą kitais. 2022 metais krovos dinamika krito 20,7 % dėl sankcijų su Rusija. Kuczyńska-Zonik ir Sierzputowska (2023) teigia, kad po konflikto pradžios, sekančiomis dienomis Baltijos šalys paskelbė sankcijas Rusijai. Stipriai smuko skystųjų ir biriųjų krovinių apyvarta, bet generalinių kilo dėl ro-ro krovos dinamikos augimo. Pasak McWilliams, Sgaravatti, Tagliapietra ir Zachmann (2022) Europos sąjunga stengiasi Europą padaryti nepriklausomą nuo viso kuro, gabenamo iš Rusijos iki 2030 metų. Tai reiškia, kad Europos šalys atsisako Rusijos siūlomų produktų ir skystųjų bei biriųjų krovinių apyvarta krenta. 2023 metais krovos apyvarta palyginti su 2022 metais krito 28,2 %. Estijos uostuose krovos dinamika taipogi svyruoja dėl panašių veiksnių, kurie palietė visą pasaulį ir Europą.

**Baltijos šalių jūros uostų krovos dinamikos palyginimas.** Visi šie uostai yra Baltijos jūros rytinėje pakrantėje, juos jungia tie patys keliai, bet jų krovos dinamika yra labai skirtinga. Išanalizavus krovos dinamikos duomenis nuo 2018 metų (žiūrėti 4 pav.), galima teigti, kad pirmauja Klaipėdos uostas.



### 4 pav. Krovos dinamika Klaipėdos, Rygos ir Talino uostuose

Šaltinis: sudaryta autorių pagal Klaipėdos, Rygos ir Talino uostų veiklos ataskaitas

Šį skirtumą gali įtakoti daugelis veiksnių, tokie kaip infrastruktūra, uosto pajėgumas, konkurencingumas ir šalies ekonomika. Rodrigue ir Notteboom (2020) teigia, kad uosto infrastruktūra turi būti plėtojama, siekiant sukurti pajėgumus gabenti krovinius. Didėjant krovos dinamikai, privaloma vystyti uosto infrastruktūrą, kad

patenkinti besikuriančią paklausą, uosto techninės galimybės yra neatsiejamos nuo krovos dinamikos. Pasak Wattanukul, Henry, Reeveerakul ir Ouzrout (2022) tinkamos informacijos gavimas ir reagavimas, palengvina uosto valdymą, kuris suteikia galimybę atsižvelgti į sprendimų planavimą. Tinkamai planuojant sprendimus iškilus netikėtoms sąlygoms, tokioms kaip koronaviruso pandemija ar Rusijos agresija, yra palengvinama situacija ir uosto pajėgumas yra išnaudojamas kaip tik galima geriau. Konkurencingumas tarp šių uostų taip pat galėjo turėti įtakos šių uostų krovos dinamikos skirtumams. Kaliszewski, Kozłowski, Dąbrowski, ir Klimek (2020) išskiria veiksnius, kurie įtakoja konkurencingumą tarp uostų, tai yra terminalų paslaugų kokybė, tinkamas jūrinis pasiekiamumas. Uostams konkuruojant yra svarbus uosto gylis, kad į terminalus galėtų patekti vis didesni laivai. Paslaugų kokybė yra ypač svarbus veiksnys siekiant užtikrinti krovos dinamikos paklausos didėjimą, nes šiai būnant mažai klientai nenorės kreiptis į uostą siekdami paslaugų gavimo. Šalies ekonomika turi didelę įtaką tos šalies uosto krovos dinamikos svyravimams. Ševčenko-Kozlovskaja ir Čižiūnienė (2022) teigia, kad logistikos sektorius daro didelę įtaką šalies BVP. Šių šalių uostai savo šalies BVP augimui daro gan didelę įtaką. Galima matyti paralelę tarp šių šalių krovos dinamikos ir bendrojo vidaus produkto lygio. Lietuvoje šis lygis yra aukščiausias, o Estijoje žemiausias.

Apibendrinant galima teigti, kad šių šalių krovos dinamika yra skirtinga, Klaipėdos uostas pirmauja šiuo aspektu, o Talino uostas yra paskutinėje vietoje. Šį skirtumą įtakoja keli veiksniai, tokie kaip infrastruktūra, uosto pajėgumas, konkurencingumas ir šių šalių ekonominiai skirtumai.

### Išvados

1. Krovos dinamikai yra svarbus rodiklis, parodantis kokių tempų dirba uostas ir kokį kiekį krovinių šis sugeba pergabenti. Šiam rodikliui įtakos turi įvairūs veiksniai: ekonominiai, politiniai, veiksminga transporto infrastruktūra ir investicijos į uostą turi įtakos krovinių apyvartai, kurią vykdo uostas.

2. Išnagrinėjus Klaipėdos, Rygos ir Talino jūros uostų krovos dinamiką nuo 2018 metų iki 2023 metų, nustatyta dalis vienodų veiksnių lėmusių krovos mažėjimą. Šiuose uostuose krovos dinamikai įtakos turėjo politiniai veiksniai: Rusijos agresija Ukrainoje, sankcijos Baltarusijai, bei koronaviruso pandemija. Kiti identifikuoti veiksniai turėję įtakos krovos tendencijoms yra Europos Sąjungos įstatymai ir Tarptautinės jūrų organizacijos iniciatyvos.

3. Baltijos šalių jūrų uostuose krovos dinamika skiriasi. Išnagrinėjus pastarųjų penkių metų statistiką, nustatyta, kad tarp Baltijos šalių jūrų uostų, Klaipėdos uostas pirmauja krovinių kiekiu, o Talino uostas krauna mažiausiai. Šį skirtumą įtakoja įvairūs veiksniai, kurie būdingi šioms šalims ir jų uostams: infrastruktūros, uosto pajėgumo, šalių ekonominiai skirtumai ir konkurencingumas.

### Literatūra

1. Abramovičiūtė, R., & Valionienė, E. (2019). Jūrų uostų veiklos įstatymų, taisyklių palyginimas teisiniu požiūriu Baltijos šalių mastu. *Technologijų ir verslo aktualijos*–2019, 8.
2. Bilgili, L. (2021). Life cycle comparison of marine fuels for IMO 2020 Sulphur Cap. *Science of the total Environment*, 774, 145719.
3. Europos Sąjunga. *Europos parlamento ir tarybos reglamentas* (2021 m. birželio 30 d. Nr. 401/2009) [žiūrėta 2024-02-21]. Prieiga per internetą: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/LT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32021R1119>
4. Freeport of Riga (2020). Financial statements. [žiūrėta 2024-02-22]. Prieiga internetu: <https://rop.lv/sites/default/files/2021-05/Financial%20Statements%202019.pdf>
5. Freeport of Riga (2020). Port statistics. [žiūrėta 2024-02-22]. Prieiga internetu: <https://rop.lv/en/port-statistics>
6. Ghiara, H., & Tei, A. (2021). Port activity and technical efficiency: determinants and external factors. *Maritime Policy & Management*, 48(5), 711-724.
7. Grauslytė, B., Žukauskaitė, A., & Žukauskaitė, J. (2023). Žaliosios koncepcijos įgyvendinimas Klaipėdos jūrų uoste. *Darnios aplinkos vystymas*, 20(1), 86-93.
8. Yanykov, N. V., Smirnov, A. N., Volkov, A. I., Lukina, D. V., & Mayorov, A. V. (2019, August). Technological parameters for vehicles in the organization of cargo transportation in the agro-industrial complex. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 315, No. 6, p. 062023). IOP Publishing.
9. Jakštas, T. (2022). The Klaipėda LNG Terminal and Its Impact on the Baltic States' Gas Market. In *The Future of Energy Consumption, Security and Natural Gas* (pp. 221-244). Palgrave Macmillan, Cham.
10. Kadyraliev, A., Supaeva, G., Bakas, B., Dzholdosheva, T., Dzholdoshev, N., Balova, S., ... & Krinichansky, K. (2022). Investments in transport infrastructure as a factor of stimulation of economic development. *Transportation Research Procedia*, 63, 1359-1369.
11. Kaliszewski, A., Kozłowski, A., Dąbrowski, J., & Klimek, H. (2020). Key factors of container port competitiveness: A global shipping lines perspective. *Marine Policy*, 117, 103896.
12. Klaipėdos uostas. (2024). Veiklos ataskaitos. [žiūrėta 2024-02-20]. Prieiga internetu: <http://www.portofklaipeda.lt>
13. Kuczyńska-Zonik, A., & Sierzputowska, K. (2023). 3 The Baltic States in the Face of Russian Aggression in Ukraine. *The Russia-Ukraine War of 2022: Faces of Modern Conflict*.



14. Liebuviėnė, J., & Čižiūnienė, K. (2021). Comparative Analysis of Ports on the Eastern Baltic Sea Coast. *Logistics*, 6(1), 1.
15. Lietuvos Respublikos Vyriausybė. *Nutarimas Dėl Lietuvos Respublikos vyriausybės 2008 m. Kovo 5 d. Nutarimo Nr. 245 „dėl Klaipėdos valstybinio jūrų uosto rinkliavų rūšių, jų maksimalių dydžių sąrašo ir taikymo principų aprašo patvirtinimo“ pakeitimo*. (2022 m. vasario 9 d. Nr. 113) [žiūrėta 2024-02-21]. Prieiga per internetą: <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAD/ba0d7af18d9211ecb8b0fe92fb660e20>
16. McWilliams, B., Sgaravatti, G., Tagliapietra, S., & Zachmann, G. (2022). Can Europe manage if Russian oil and coal are cut off?. *Bruegel-Blogs, NA-NA*.
17. Port of Tallinn (2024). Annual reports. [žiūrėta 2024-02-22]. Prieiga internetu: <https://www.ts.ee/en/investor/annual-reports/>
18. Rodrigue, J. P., & Notteboom, T. (2020). Ports and economic development. *Port economics, management and policy*.
19. Serry, A. (2019). Containerisation in the Baltic Sea region: development, characteristics and contemporary organisation. *European Spatial Research and Policy*, 26(1), 9-25.
20. Slunkin, P., Shraibman, A., & Hubarava, H. (2021). Belarus and the Baltic States: repercussions of the lingering political crisis. *Pobrane z: http://library.fes.de/pdf-files/bueros/ukraine/18025-20210623.pdf*.
21. Ševėenko-Kozlovska, G., & Čižiūnienė, K. (2022). The impact of economic sustainability in the transport sector on GDP of neighbouring countries: Following the example of the baltic states. *Sustainability*, 14(6), 3326.
22. Vo, T. D., & Tran, M. D. (2021). The impact of covid-19 pandemic on the global trade. *International Journal of Social Science and Economics Invention*, 7(1), 1-7.
23. Wattanakul, S., Henry, S., Reeveerakul, N., & Ouzrout, Y. (2022). A port digital twin model for operational uncertainty management. *The Journal of Modern Project Management*, 9(3).

## CARGO TURNOVER IN THE SEAPORTS OF THE BALTIC COUNTRIES

### Summary

This paper examines the change in loading dynamics of the seaports of the Baltic countries over the last five years using the activity reports of the ports of Klaipėda, Riga and Tallinn. Cargo dynamics are examined in order to understand the amount of cargo transported by these ports in the last year and what influences these figures. The dynamics of cargo is studied by distinguishing between general, liquid and bulk types of cargo. These ports are important because they are the main centers of logistics trade and economic growth for these countries. All this information is described and analyzed using scientific and informational analysis. Changes in cargo dynamics can be influenced by many factors, such as the country's economy, geopolitics, and port infrastructure. Also in this work, after analyzing the changes in loading dynamics of Klaipėda, Riga and Tallinn from 2018 to 2023, using the activity reports of these ports, they are comparable. In this comparison, it can be seen that Klaipėda port transports the most tons of cargo out of these three ports, and Tallinn port the least. This difference in loading dynamics can be influenced by various factors that directly affect port cargo handling operations. These factors can be named as infrastructure, port capacity, economic differences between countries and competitiveness.

**Key words:** cargo dynamics, general cargo, liquid cargo, bulk cargo, sea ports.

### AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Diana Šateikienė.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** mokslų daktarė, docentė.

**Darbo vietą ir pozicija:** Klaipėdos valstybinės kolegijos, dėstytoja.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** uosto logistika ir jūrų transporto poveikis aplinkai.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** d.sateikiene@kvk.lt

**Autoriaus vardas, pavardė:** Gabrielė Rancaitė.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** Studentė.

**Darbo vietą ir pozicija:** Klaipėdos valstybinės kolegijos, verslo fakulteto, verslo administravimo katedros studentė.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** logistikos vadyba.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** gab.rancaite@kvkedu.lt



# ĮMONĖS SANDĖLIO VALDYMO SISTEMA

Julija Smirnova<sup>1</sup>, Jurij Tekutov<sup>1, 2, 3</sup>

Klaipėdos valstybinė kolegija<sup>1</sup>, Klaipėdos universitetas<sup>2</sup>, Lietuvos verslo kolegija<sup>3</sup>

## Anotacija

Esamoje sistemoje darbuotojai susiduria su mobilumo ir efektyvumo problemomis, nes jiems reikia atlikti daug operacijų ir negalima valdyti sistemos iš bet kurios vietos. Siūlomas sprendimas yra įgyvendinti mobiliosios aplikacijos projektą, kuris leistų darbuotojams lengviau ir greičiau valdyti sandėlį. Norint nustatyti sistemos teikiamas funkcijas, yra sudaryta panaudojimo atvejų diagrama, aprašytos tikslinės naudotojų grupės, panaudojimo atvejai, funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai sistemai. Sukurta įmonės sandėlio valdymo sistema geba talpinti užsakytų gaminių ir išsiuntimui ruošiamų produktų sandėlyje informaciją. Atlikus verifikavimą, išsiaiškinta, kad sandėlio valdymo sistema atitinka išsikeltus funkcinis ir nefunkcinis reikalavimus.

**Reikšminiai žodžiai:** sandėlis, Firebase, Android, skeneris, mobilioji aplikacija.

## Įvadas

**Dalykinė sritis.** Įmonės sandėlio valdymo sistema yra skirta talpinti užsakytų ir sandėlyje esančių produktų informaciją, ją sekti, naikinti ir koreguoti.

**Probleminė sritis.** Geresnis atsargų valdymas gali sumažinti įmonės išlaidas ir padidinti pelną (Saxena, 2009). Tiriamos įmonės sandėlyje šiuo metu naudojama sistema yra gan nemobili. Norint valdyti didelio sandėlio sistemą nėra įmanoma jos pasiekti iš bet kurios sandėlio vietos, tokiu būdu darbuotojai turi atlikti daug rankinių operacijų, kurios reikalauja laiko ir energijos, o tai sukelia neefektyvumą ir vykdymo klaidas (Minalga, 2008). Norint išvengti tokių klaidų ir paspartinti sandėlio valdymą, bus kuriama įmonės sandėlio valdymo sistemos mobili aplikacija, kuri bus verifikuojama ir lengviau pasiekama sandėlio darbuotojams.

**Tyrimo aktualumas.** Sandėlio valdymo sistema yra kuriama įmonei. Žvelgiant į įmonės probleminę sritį, šis sistemos projektas padės paspartinti sandėlio valdymą, kadangi bus naudojama iš bet kurios vietos.

**Numatomas pritaikymas.** Sistemoje turi būti diegiama barkodų skaitytuvų sistema, kuri leis darbuotojams efektyviau per mobiliąją aplikaciją talpinti ir redaguoti produktų informaciją sistemoje. Taip pat turi būti automatizuoti darbo procesai, pavyzdžiui, sandėlio tvarkymo procesai, kad būtų sumažintas laiko ir energijos reikalavimas.

**Tyrimo tikslas** – suprojektuoti ir realizuoti įmonės sandėlio valdymo sistemą.

Siekiant įgyvendinti numatytą tikslą, keliami šie darbo **uždaviniai:**

1. Suprojektuoti įmonės sandėlio valdymo sistemą;
2. Realizuoti įmonės sandėlio valdymo sistemą;
3. Verifikuoti ir ištestuoti įmonės sandėlio valdymo sistemą.

**Tyrimo objektas.** Įmonės sandėlio sistema.

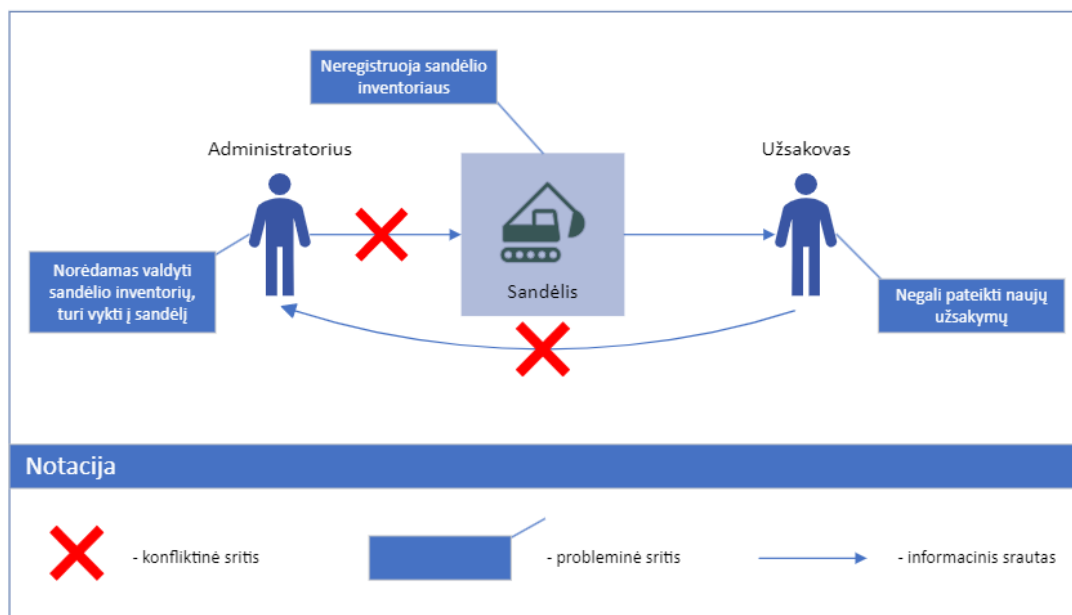
**Metodika:** informacijos paieška, informacijos sisteminimas, sistemos projektavimas, reikalavimų specifikacija, realizavimas bei testavimas.

## 1. Įmonės sandėlio valdymo sistemos projektavimas

Siekiant patvirtinti šios sistemos aktualumą įmonei, yra aptariamos dalykinė ir probleminė sritys, jos pavaizduojamos vaizdiškai raiškiajame paveikslėlyje. Norint nustatyti sistemos teikiamas funkcijas, yra sudaroma panaudojimo atvejų diagrama, aprašomos tikslinės naudotojų grupės, panaudojimo atvejai, funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai sistemai. Taip pat pagrįstos numatomos naudoti technologijos ir programos, pateikta grafinės naudotojo sąsajos vizija.

Vaizdiškam problemos apibūdinimui yra naudojamas raiškis paveikslėlis (angl. *Rich Picture*). Jis vaizduoja dalykinės srities objektus, jų tarpusavio ryšius. Raiškis paveikslėlis (sukurta naudojant *Microsoft Visio<sup>TM</sup>*) vaizduojamas 1 paveiksle.

Raiškiajame paveikslėlyje yra nurodytos dvi konfliktinės sritys. Pirmoji konfliktinė sritis atsiranda tada, kai administratorius, norėdamas valdyti sandėlio inventorių, turi vykti į patį sandėlį. Antroji konfliktinė sritis atsiranda tada, kai užsakovas užsako produktą tuomet, kai administratorius nėra sandėlyje. Tokiu būdu yra sugaišamas laikas. Šias problemas galėtų išspręsti sandėlio valdymo sistemos mobilumas. Sukūrus įmonei šį sistemos projektą, darbuotojai ir pats administratorius visą produktų informaciją, jos valdymą bei judėjimą galėtų pasiekti nuotoliniu būdu per mobiliąją aplikaciją.



1 pav. Probleminės srities raiškūs paveikslėlis

**Tikslinės naudotojų grupės:** Įmonės sandėlio valdymo sistemoje yra trys naudotojų grupės – programuotojai ir administratoriai, priimančys užsakymus, juos talpinantys *Microsoft Excel* lentelėje, prižiūrintys sistemos veikimą, produktų patalpimą, jų kiekio atitikimą ir darbuotojai, talpinantys produktų informaciją į sistemą. Šios sistemos naudotojai yra pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė

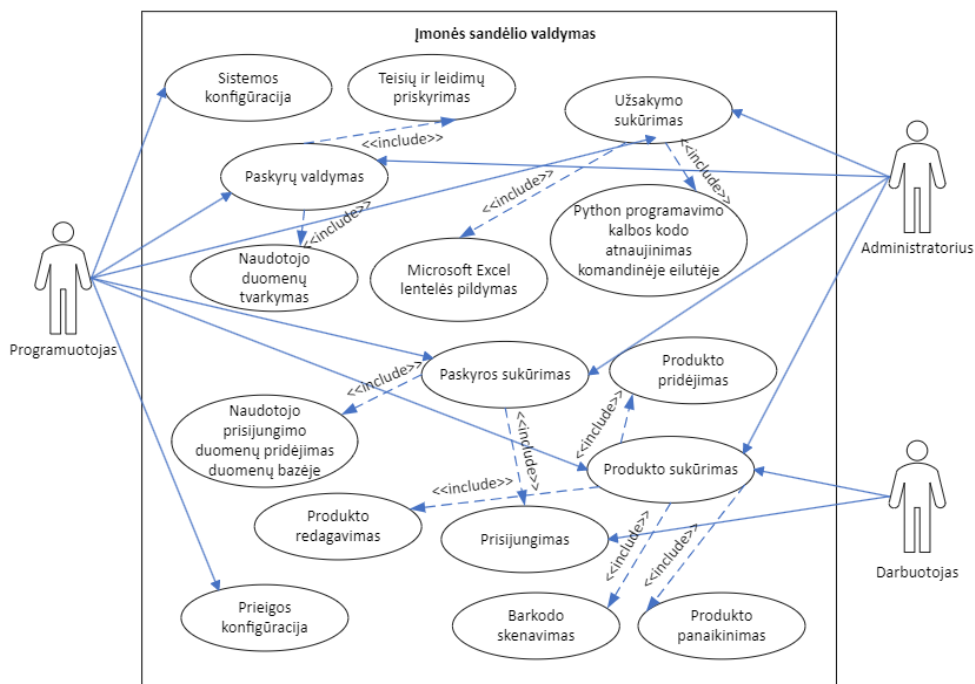
Sistemos naudotojai		
Naudotojai	Patirtis	Uždaviniai
Programuotojas	Įgijęs profesinio bakalauro arba bakalauro kvalifikacinį laipsnį arba atliekantis praktiką.	Prižiūrėti sistemos veikimą, redaguoti sistemos funkcijas, grafinę sąsają.
Administratorius	Bendrosios kompiuterinės žinios ir įgūdžiai, susipažinimas su sistemos veikimu.	Pildyti užsakymų sąrašą <i>Microsoft Excel</i> lentelėje, prižiūrintys produktų patalpimą, jų kiekio atitikimą
Darbuotojas	Bendrosios kompiuterinės žinios ir įgūdžiai, susipažinimas su sistemos veikimu.	Talpinti, naikinti ir koreguoti produktų informaciją sistemoje.

Lentelėje yra pateiktos trys naudotojų grupės – programuotojai, administratoriai bei sandėlio darbuotojai. Programuotojai yra skirti tik tokiu atveju, jei kiltų nesklandumų su sistemos veikimu arba reikėtų papildyti ar panaikinti sistemos funkcijas, grafinę sąsają. Administratorių užduotys yra pildyti užsakymų lentelę ir stebėti sandėlio darbuotojų keliamą produktų informaciją.

**Panaudojimo atvejai, funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai sistemai.** Norint patenkinti užsakovo poreikius, toliau bus aprašyti panaudojimo atvejai, suformuluoti funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai sandėlio valdymo sistemai.

**Panaudojimo atvejai.** Kuriant sandėlio valdymo sistemą yra aprašomi panaudojimo atvejai. Taip pat būtina išsiaiškinti įvairių naudotojų funkcijas. Šiems reikalavimams vaizduoti naudojama panaudojimo atvejų diagrama (Pressman ir Maxim, 2014).

Toliau pateiktoje panaudojimo atvejų diagramoje matome, jog sistemoje yra trys naudotojai su savo funkcijomis – programuotojas, administratorius ir darbuotojas. Administratorius gali priimti užsakymus, juos talpinti *Microsoft Excel* lentelėje, sukurti paskyrą, valdyti paskyras, sandėlyje esančius produktus, juos pridėti, panaikinti. Darbuotojas turi prieigą pridėti produktą, nuskenuodamas sandėlyje esančio produkto barkodą, ir redaguoti jo informaciją. Programuotojas atlieka tokias funkcijas, kaip sistemos ir prieigos konfigūracijos ir visas kitas, kurias atlieka administratorius ir darbuotojai. Diagrama pateikta 2 paveiksle.



2 pav. Panaudojimo atvejų diagrama

Funkcijos, kurios leidžia naudotis esminėmis sistemos funkcijomis yra pažymėtos PA1 – prisijungimas, PA2 – paskyrų valdymas, teisių ir leidimų priskyrimas, naudotojo duomenų tvarkymas, PA3 – užsakymo sukūrimas, į kurį įeina *Python* programavimo kalbos kodo atnaujinimas komandinėje eilutėje ir *Microsoft Excel* lentelės pildymas, PA4 – produkto sukūrimas, barkodo skenavimas, informacijos redagavimas ir panaikinimas. Pirmojo panaudojimo atvejo aprašymas pateiktas 2 lentelėje.

2 lentelė

**Panaudojimo atvejo „Prisijungimas“ aprašymas**

Panaudojimo atvejo Nr.	1
Panaudojimo atvejis (PA)	Prisijungimas.
Tikslas	Suteikti prieigą naudotojui prie sistemos funkcijų prisijungus. Prieš tai naudotojas turėtų būti užregistruotas sistemoje.
Aktoriai	Administratorius, darbuotojas.
Ryšiai su kitais PA	-
Nefunkciniai reikalavimai	Sistema turi būti patikima, saugi. Taip pat sistemoje turi būti viskas suprantama naudotojui, t.y. patogi naudotojo sąsaja.
Prieš-sąlygos	Naudotojas yra neprisijungęs, tačiau užregistruotas sistemoje.
Sužadavimo sąlygos	Yra įvedamas prisijungimo vardas, slaptažodis ir paspaudžiamas mygtukas „Prisijungti“.
Po-sąlygos	Naudotojas prisijungia prie sistemos.
Pagrindinis scenarijus	Naudotojas turi turėti savo el. pašto adresą, kad galėtų būti pridėtas sistemoje. Prisiregistravus ir prisijungus jam suteikiama prieiga prie sistemos funkcijų.
Alternatyvūs scenarijai	Atsiranda trikdžių sistemoje ar duomenų bazėje, dėl ko naudotojas negali prisijungti prie sistemos.

Toliau iš panaudojimo atvejų yra išvedami funkciniai ir nefunkciniai reikalavimai sistemai.

**Funkciniai reikalavimai sistemai:** Norint patenkinti užsakovo poreikius, toliau bus suformuluoti funkciniai reikalavimai sandėlio valdymo sistemai. Jie bus išvedami iš panaudojimo atvejų. Funkciniai reikalavimai apibūdina tai, ką sistema turi daryti, t.y. kokias funkcijas sistema turi atlikti ir kaip jos turi veikti. Funkciniai reikalavimai turi būti aiškiai ir tiksliai aprašyti, kad sistema būtų tinkamai sukurta ir veiktų taip, kaip tikisi naudotojai.

Toliau yra išvedami funkciniai reikalavimai sistemai (toliau – FR):

FR1 – jei naudotojas yra registruotas sistemoje, jis turi galėti prisijungti.

FR2 – administratorius turi galėti pildyti *Microsoft Excel* faile esančią užsakymų lentelę.

FR3 – administratoriui suvedus duomenis į *Excel* lentelę ir įvedus komandą komandinėje eilutėje, sistema turi galėti automatiškai atnaujinti duomenis duomenų bazėje ir mobilioje aplikacijoje.

FR4 – administratorius turi galėti matyti užsakytų ir išsiuntimui ruošiamų, sandėlyje esančių produktų informaciją.

FR5 – sistema turi leisti darbuotojui pridėti išsiuntimui ruošiamo produkto informaciją, nuskenavus administratoriaus sugeneruotą barkodą.

FR6 – darbuotojui sėkmingai pridėjus produktą į sąrašą, sistema turi nebeleisti kitą kartą pridėti produkto su tokiu pačiu barkodu.

FR7 – sistema pranešimo langu turi informuoti apie pavykusį arba nepavykusį atlikti veiksmą.

Pirmasis funkcinis reikalavimas (FR1) detaliau yra aprašytas 3 lentelėje.

3 lentelė

**Pirmasis funkcinis reikalavimas (FR1)**

Reikalavimas #:	1	Reikalavimo tipas:	Funkcinis	Įvykis/panaudojimo atvejis #:	1
Aprašymas:	Naudotojas, norėdamas pasiekti sistemos funkcijas, iš pradžių turi būti užregistruotas sistemoje ir tada turi prisijungti įvesdamas savo el. pašto adresą ir slaptažodį.				
Pagrindimas:	Kad galėtų naudotis sistemos teikiamomis funkcijomis, naudotojas turi prisijungti įvesdamas el. pašto adresą ir slaptažodį, kad sistema galėtų identifikuoti asmenį.				
Šaltinis:	Naudotojas				
Tikimo kriterijus:	Naudotojas turi prieigą prie sistemos teikiamų funkcijų.				
Užsakovo tenkinimas:	6	Užsakovo netenkinimas:		6	
Priklausomybės:	Nėra	Konfliktai:		Nėra	
Papildoma medžiaga:	Nėra				
Istorija:	Užregistruotas 2023 m. balandžio 20 d.				

Tokiu būdu iš panaudojimo atvejų buvo išvestas pirmasis funkcinis reikalavimas.

**Nefunkciniai reikalavimai sistemai.** Norint patenkinti užsakovo poreikius, toliau bus suformuluoti nefunkciniai reikalavimai sandėlio valdymo sistemai. Kaip ir funkciniai reikalavimai, nefunkciniai taip pat bus išvesti iš panaudojimo atvejų. Nefunkciniai reikalavimai apibūdina tai, kaip sistema turi elgtis ar veikti tam tikromis aplinkybėmis ar sąlygomis. Jie gali apimti tokiu dalykus, kaip naudojimo patogumas, saugumas ar patikimumas (Couchbase, 2022). Šioje sistemoje nefunkciniai reikalavimai bus taikomi ne atskirai kiekvienai funkcijai, bet visai sistemai (Sommerville, 2015).

Toliau yra išvedami funkciniai reikalavimai sistemai (toliau – NFR):

NFR1 – naudotojui jungiantis prie aplikacijos, sistema turi priskirti naudotojui rolę.

NFR2 – puikiai suprantama naudotojo sąsaja.

NFR3 – sistema turi būti pritaikyta prie įvairių ekrano dydžių.

Detalesnis pirmojo nefunkcinio reikalavimo aprašymas yra pateiktas 4 lentelėje.

4 lentelė

**Pirmasis nefunkcinis reikalavimas (NFR1)**

Reikalavimas #:	1	Reikalavimo tipas:	Nefunkcinis	Įvykis/panaudojimo atvejis #:	Visi
Aprašymas:	Naudotojui jungiantis prie aplikacijos, sistema turi priskirti naudotojui rolę atsižvelgiant į naudotojo užimamas pareigas.				
Pagrindimas:	Pagal panaudojimo atvejų diagramą sukonfigūruotos prieigos teisės.				
Šaltinis:	Naudotojai.				
Tikimo kriterijus:	Administratorius ir darbuotojas turi prieigą prie savo funkcijų.				
Užsakovo tenkinimas:	6	Užsakovo netenkinimas:		6	
Priklausomybės:	Nėra	Konfliktai:		Nėra	
Papildoma medžiaga:	Nėra				
Istorija:	Užregistruotas 2023 m. balandžio 20 d.				

Iš panaudojimo atvejų buvo išvestas pirmasis nefunkcinis reikalavimas.

**Naudojamos technologijos.** Kuriant įmonės sandėlio valdymo sistemos mobiliąją aplikaciją reikia pagrįsti bei palyginti numatomas naudoti technologijas ir programas su kitomis galimomis.

**Sistemos kūrimas.** Sandėlio valdymo sistema bus kuriama „Android Studio“ aplinkoje, kuri yra populiarus aplikacijų kūrimo platforma. „Android Studio“ yra sukurta Android operacinės sistemos programų kūrimui, joje yra integruotos įvairios funkcijos, tokios kaip automatinis kodas ir saugyklos debesyse, kurios padidina kūrimo efektyvumą.

Šioje aplinkoje pasirinkta Java programavimo kalba, dėl jos platesnio įrankių ir bibliotekų kiekio lyginant su *Kotlin* programavimo kalba. Java yra naudojama kuriant daugybę įvairių tipų programų: nuo žaidimų iki verslo sistemų. Taip pat ji yra oficiali kalba, kuria parašytos Android operacinės sistemos bibliotekos.

Kuriant sandėlio valdymo sistemą bus įdiegta *Firestore SDK* komponentų biblioteka, kuri suteikia visus reikalingus įrankius valdyti backend'ą, tokius kaip duomenų bazes realiu laiku, autentifikavimo funkciją, automatinį saugumą.

Skenerio integravimui į sistemą bus naudojama *Zxing* (angl. *Zebra Crossing*) biblioteka, kuri leidžia atpažinti 1D ir 2D barkodus, įskaitant QR kodus, EAN, UPC, Code 39, Code 128, ITF ir daugelį kitų. Tradiciniai brūkšninių kodų skaitytuvai naudoja analoginius briaunų detektorius, kad aptiktų tamsių ir šviesių sričių ribas. Jei briaunos stiprumas viršija nustatytą ribą, laikoma, kad aptikta briauna atitinka brūkšnio (erdvės) ribą (Shellhammer, Goren, ir Pavlidis, 1999). Prekių gamyboje, logistikoje ir sandėlio operacijose plačiai naudojamas yra *EAN/UPC* barkodas (Qin, Chai, Wang, 2019). Kuriant įmonės sandėlio valdymo sistemos projektą ši biblioteka bus ypatingai naudinga, kai reikės generuoti unikalius produktų barkodus.

Užsakymų patalpinimui yra naudojamas *Microsoft Excel*. Šios programos lentelėje administratorius generuoja barkodą ir aprašo kitą produkto informaciją. Kad visi užpildyti duomenys persikeltų į duomenų bazės kolekciją ir mobiliąją aplikaciją, yra naudojama *Python* programavimo kalba *JSON* failo sukūrimui ir jo atnaujinimui. Taip pat komandinė eilutė, kurioje įvedama *Python* kodo atnaujinimo komanda „python [failo\_pavadinimas.py]“.

**Duomenų bazės kūrimas.** Vartotojų paskyrų duomenys bei produktų informacija bus talpinama *NoSQL Google Cloud Firestore* duomenų bazėje. *NoSQL (Not Only SQL)* yra terminas, kuris apibūdina duomenų bazes, kurios nesiremia reliaciniu duomenų modeliu. *NoSQL* duomenų bazės nereikalauja duomenų struktūros, kuri būtų apibrėžta iš anksto, ir gali saugoti ir tvarkyti nestruktūrizuotus duomenis (Sarker, 2022).

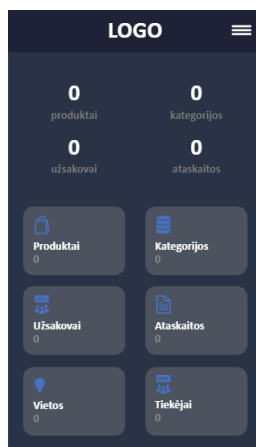
Palyginus su *MySQL* duomenų baze, *NoSQL* yra pranašesnė tuo, jog ji yra realiu laiku veikianti duomenų bazė, kuri leidžia tiesiogiai, greitai ir efektyviai pasiekti duomenis. Tai padaryta naudojant *Web Socket* protokolą, kuris užtikrina, kad duomenys bus sinchronizuojami tarp kliento ir serverio. Taip pat *Firestore* gali automatiškai padidinti arba sumažinti serverių skaičių, kad atitiktų duomenų bazės apkrovą ir užtikrintų, kad aplikacija visada veiktų optimaliai.

*NoSQL* duomenų bazė buvo pasirinkta ir dėl to, jog ji gali saugoti ir tvarkyti tiek struktūrizuotus, tiek nestruktūrizuotus duomenis (Couchbase, 2022). Tai leidžia programuotojams saugoti ir valdyti daugybę skirtingų duomenų tipų: tekstinius, skaičinius, vaizdinius, dokumentus. Tai ypač naudinga, kai reikia talpinti skirtingų tipų duomenis vienoje duomenų bazėje. Be to, *Firestore* yra lengvai integruojama su „Android Studio“ aplinka įdiegiant *Firestore SDK*.

**Grafinės naudotojo sąsajos vizija.** Naudotojo sąsaja yra labai svarbi visų kompiuterių sistemų dalis. Dėl prastos vartotojo sąsajos kasdien didėja klaidų skaičius, didėja mokymo išlaidos ir mažėja našumas (Stone, Jarrett, Woodroffe ir Minocha, 2005). Įmonės sandėlio valdymo sistemos mobilioje aplikacijoje ji turi būti puikiai suprantama. Pradinio lango „Prisijungimas“ vizija yra pateikiama 3 paveiksle.

3 pav. Pradinis langas „Prisijungimas“

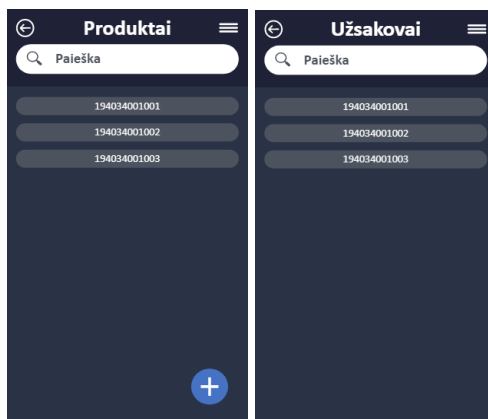
Paveiksle matoma, jog prisijungimo langas susideda iš dviejų teksto laukų, kuriuose prašoma įvesti el. pašto adresą ir slaptažodį, ir mygtuko, kurį paspaudus vykdoma autentifikacija. Po mygtuko galima pastebėti ir du tekstinius mygtukus: „Prisiregistruoti“, kuris nukreipia į registracijos langą, ir „Pamiršote slaptažodį?“, kurio pagalba yra atveriamas iššokantis pranešimas su teksto lauku įvesti el. pašto adresą. Po sėkmingo prisijungimo pagrindinis įmonės sandėlio valdymo sistemos langas yra „Pradžią“, kuris vaizduojamas 4 paveiksle.



4 pav. Pagrindinis langas „Pradžia“

Paveiksle matoma, jog pagrindinis vartotojo sąsajos langas yra sudarytas iš trijų dalių. Lango viršuje yra logotipas su atsiveriančia meniu juosta. Žemiau galima matyti patalpintų produktų, dienos planų, užsakovų ir ataskaitų skaičius. Kiek žemiau yra 6 mygtukai, vedantys į pasirinktą langą: „Produktai“, „Kategorijos“, „Užsakovai“, „Ataskaitos“, „Vietos“, „Tiekėjai“. Toliau bus apžvelgiami keletas jų. Norint apžvelgti arba papildyti produktų sąrašą spaudžiamas mygtukas „Produktai“. Jis matomas 5 paveiksle.

Produktų lango apačioje matomas mygtukas produkto pridėjimui. Paspaudus jį, yra atidaromas pranešimo langas su barkodo skenavimo funkcija ir informacijos įvedimų laukais. Pridėti produktai pažymėti barkodo numeriais, jie yra spaudžiamieji. Paspaudus produkto objekto mygtuką, yra atidaromas naujas langas su visų nuskenuotų produktų informacija. Administratoriui užpildžius *Excel* failo lentelę ir patalpinus užsakymus į sistemą, jie matomi lange „Užsakovai“.



5 pav. Langai „Produktai“ ir „Užsakovai“

Paveiksle matoma, jog lange „Produktai“ įvesti produktai susirūšiuoja palei esamus arba naujai sukurtus dienos planus ir atsiranda įvesto plano turinyje. Visi laukai yra spaudžiamieji. Paspaudus pasirinktą produktą, jis gali būti redaguojamas, naikinamas arba pildomas.

**Projektavimo apibendrinimas.** Taigi, buvo suprojektuota įmonės sandėlio sistemos mobilioji aplikacija. Tiriamos įmonės sandėlyje šiuo metu sistema yra gan nemobili, tad iš to išplaukė probleminė sritis – pakelti mobilumą ir leisti darbuotojams pasiekti sistemą iš bet kurios sandėlio vietos. Pagrindinį sistemos panaudojimą nustatyti padėjo dalykinė sritis, kuris projekte aprašytas kaip prieiga talpinti, sekti ir koreguoti sandėlyje esančius produktus. Taip pat šioje dalyje buvo apibrėžiamos tikslinės naudotojų grupės – programuotojai, administratoriai ir darbuotojai, kurias žinant buvo galima priskirti kiekvienai grupei savuosius uždavinius ir funkcijas sistemoje. Iš naudotojų grupių buvo išvedami panaudojimo atvejai, funkciniai reikalavimai sistemai ir sudaroma panaudojimo atvejų diagrama. Tęsiant apie nefunkcinius sistemos reikalavimus, jie padėjo nustatyti kokybės standartus, kuriuos reikia atitikti, tai būtų aiškiai suprantama naudotojo sąsaja, saugus prisijungimas prie sistemos.

## 2. Įmonės sandėlio valdymo sistemos realizacija

Šioje dalyje aprašomas projekto realizacijos rezultatas, įtraukiant kodą, bibliotekas, komponentus bei duomenų bazę. Bus vaizdiškai paaiškinamas prisijungimas prie sistemos, kaip integruojama duomenų bazė bei kokios yra sistemos funkcijos. Taip pat aprašoma sistemos grafinė vartotojų sąsaja.



**Sistemos grafinės vartotojų sąajos kūrimas.** Aprašomas sistemos grafinės vartotojų sąajos kūrimo procesas. Pirmiausia, yra sukuriamas sistemos prisijungimo langas, kuris matomas 6 paveiksle.



**6 pav.** Sistemos prisijungimo langas

Paveiksle matoma, jog pirminiame prisijungimo lange į sistemą yra 2 teksto įvedimo laukai el. pašto adresui ir slaptažodžiui. Paspaudus mygtuką „Rodyti slaptažodį“, slaptažodis yra nebeslepiamas. Taip pat šiame lange yra matomas tekstinis mygtukas „Pamiršote slaptažodį?“, kurį paspaudus ir įvedus savo el. pašto adresą, į Jūsų el. pašto laiškadėžę yra išsiunčiamas pranešimas su nuoroda slaptažodžio pasikeitimui. Suvedus prašomą informaciją ir paspaudus prisijungimo mygtuką, sistema patikrina, kokia rolė turi būti priskiriama. Šioje sandėlio valdymo sistemoje egzistuoja trys naudotojų grupės: programuotojas, darbuotojas ir administratorius. Pastarojo pagrindinį langą galima matyti 7 paveiksle.



**7 pav.** Pagrindinis administratoriaus langas

Pateiktame paveiksle galima matyti, jog tai administratoriaus rolę užimančio naudotojo pagrindinis langas. Jame yra 2 pagrindiniai mygtukai: „Užsakymai“ ir „Produktai“. Užsakymų lange yra išvedami visi užsakymai su visais produktų, stiklo paketų, atributais, patalpintais paties administratoriaus Excel lentelėje. Produktų lange yra pagrindinė, visiems darbuotojams prieinama, funkcija – produktų pridėjimas naudojant skenerį. Taip pat šių mygtukų apačioje yra nuo sistemos atsijungimo mygtukas. Darbuotojo pagrindinis langas skiriasi tik tuo, jog jis neturi prieigos prie užsakymų. Užsakymo objektą užsakymų sąrašė galima matyti 8 paveiksle.



**8 pav.** Užsakymo objektas

Produktų lange nuskenavus pagaminto produkto barkodą, kuris sutampa su užsakymų lange jau esančiu, šis užsakymo objektas pirmiausia yra išsaugomas naujoje „išrintų užsakymų“ kolekcijoje, ištrinamas iš užsakymų ir pridamas naujas objektas prie ruošiamų išsiuntimui produktų sąrašo. Produktų lange taip pat yra atvaizduojamas sąrašas ir mygtukas produkto skenavimo procesui. Sąrašo objektą galima matyti 9 paveiksle.

PRIVATUS02042023

9 pav. Nuskenuoto produkto objektas

Šiame paveiksle matoma, jog nuskenavus į produktų langą yra pridamas objektas, kuris yra pavadintas užsakovo pavadinimu ir gamybos data. Jis yra įvedamas, jog būtų lengviau atsekamas išsiunčiamas produktas arba produktų grupė.

Produkto pridėjimo procesas yra pradamas paspaudžiant produktų lango apačioje esantį mygtuką „+“. Tuomet pažingsniui atsiveria alerdialog konstruktoriaus objekto langai su prašymais įvesti tekstą į tekstinį lauką arba paspausti mygtuką. Šie langai matomi 10 paveiksle.



10 pav. Produkto pridėjimo procesas

Paveiksle galima matyti, jog produkto pridėjimas susideda iš trijų žingsnių: užsakovo bei gamybos datos įvedimo į tekstinį lauką, barkodo skenavimo ir išsaugojimo mygtuko paspaudimo arba sekančio barkodo skenavimo. Praktika rodo, jog užsakovas pateikia ne tik vieno produkto užsakymą, tad patogumo dėlei yra skenuojami visi barkodai ir vienu mygtuko paspaudimu išsaugojami į vieną produkto objektą. Nuskenavus bent vieną netinkamą barkodą, naudotojo ekrane atsiranda iššokantis pranešimas su klaida ir neleidžiama atlikti pakeitimų nei vienoje sistemos vietoje. Toks pats likimas ištinka ir tuo atveju, jei naudotojas nuskenuoja jau anksčiau pridėtą produktą.

**Testavimo procesas.** Testavimas bus atliekamas naudojant *JUnit* testavimo sistemą, įsivertinant, kokio rezultato yra tikimasi, susižymint visus vykdomos funkcijos testo atvejus, stebint padarinius ir po įvykdytos funkcijos patikrinama, ar gautas rezultatas yra teisingas ir toks, koks buvo numatytas (Do, Rothermel ir Kinneer, 2005). Norint šiuos testus pritaikyti Java realizacijoms, testai bus konvertuoti į tinkamą *Java* programoms formą (Gromov, Prokopenko, Shabaldina, ir Laputenko, 2019). Užsakymo pridėjimo funkcijos per *Excel* ir komandinę eilutę testavimas bus atliekamas rankiniu būdu. Tokiu būdu sistemos projektas matomas iš vartotojo pusės ir pastebimos funkcijų veikimo klaidos. Įmonės sandėlio valdymo sistemos mobiliosios aplikacijos grafinės vartotojų sąsaja bus testuojama *Lambdatest* aplinkoje (Lambdatest, 2022).

**Realizacijos apibendrinimas.** Produkto realizacijos dalyje pirmiausiai buvo aprašomas prisijungimas prie sistemos. Šiam veiksmui atlikti yra naudojama *NoSQL Google Cloud Firestore* duomenų bazė, kuri integruojama į sistemą prijungiant *Firebase* konsolę ir įdiegiant *Firebase Authentication SDK* priedą naudojant *Gradle* biblioteką (Sarker, 2022). Taip pat buvo pateiktas vartotojų sąrašas duomenų bazėje, kuriame vartotojams priskiriami unikalūs identifikacijos numeriai (UID). Buvo aprašomos sistemos funkcijos. Viena jų – užsakymų pildymas *Firebase* duomenų bazėje ir pridėjimas į sistemą naudojantis *Microsoft Excel*

programoje esančia lentelę ir duomenų atnaujinimas įvedant komandą komandinėje eilutėje. Ši funkcija yra skirta administratoriaus rolę užimančiam naudotojui. Sekanti – produkto pridėjimo funkcija, naudojant *Zxing* atvirojo kodo bibliotekos barkodo skenerį. Galiausiai, buvo atvaizduojamas sistemos grafinės vartotojų sąsajos kūrimas.

### Išvados

1. Projektuojant įmonės sandėlio valdymo sistemos projektą, buvo išaiškinta probleminė sritis – mobilumas. Tad buvo nuspręsta pakelti mobilumą ir leisti darbuotojams pasiekti sistemą iš bet kurios sandėlio vietos. Taip pat buvo apibrėžiamos tikslinės naudotojų grupės – programuotojai, administratoriai ir darbuotojai – ir iš to išvedami panaudojimo atvejai. Suprojektuotas architektūrinis sistemos sprendimas ir pagrindžiamos numatomos naudoti technologijos.

2. Realizacijos dalyje pirmiausia buvo paaiškinamas prisijungimas prie sistemos. Taip pat buvo pateiktas vartotojų sąrašas duomenų bazėje, kuriame vartotojams priskiriami unikalūs identifikacijos numeriai (UID). Buvo aprašomos sistemos funkcijos. Viena jų – užsakymų pildymas Firebase duomenų bazėje ir pridėjimas į sistemą naudojantis Excel programoje esančia lentelę ir duomenų atnaujinimas įvedant atitinkamą komandą komandinėje eilutėje. Ši funkcija yra skirta administratoriaus rolę užimančiam naudotojui. Sekanti – produkto pridėjimo funkcija, naudojant *Zxing* atvirojo kodo bibliotekos barkodo skenerį. Galiausiai, buvo atvaizduojamas sistemos grafinės vartotojų sąsajos kūrimas.

3. Testavimo dalyje buvo testuojamos sistemos funkcijos su JUnit testavimo sistema ir mobiliosios aplikacijos grafinė vartotojų sąsaja Lambdatest aplinkoje. Testavimui buvo pasitelkti Android operacinės sistemos gamintojų įrenginiai, kurie padengia skirtingas versijas, ekranų dydžius bei raišką, užtikrinami kuo platesnį suderinamumą su įvairiais vartotojais. Atlikus verifikavimą, išsiaiškinta, kad sandėlio valdymo sistema atitinka išsikelčius funkcinis ir nefunkcinis reikalavimus. Ištestavus, buvo parodoma, jog sistema tinka įvairiems įrenginiams. Galiausiai buvo aprašoma naudojimo instrukcija kiekvienos tikslinės naudotojų grupės atžvilgiu.

Šis straipsnis prisideda prie Klaipėdos valstybinėje kolegijoje vykdomo taikomojo mokslinio tyrimo „Veiklos valdymo modelių taikymas žiniomis grindžiamoje informacinių sistemų inžinerijoje“ (veiklos sritis: darnios aplinkos vystymas; kryptis: inovatyvios technologijos; tematika (šaka): išmaniosios komunikacijų technologijos, TMV IF-027).

### Literatūra

1. Do, H., Rothermel, G., Kinneer, A. 2005. *Empirical studies of test case prioritization in a JUnit testing environment*. IEEE.
2. Lutz, M. 2010. *Programming Python: Powerful Object-Oriented Programming*. O'Reilly.
3. Minalga, R. 2008. *Aprūpinimo logistika*. Mykolo Romerio universitetas.
4. Pressman, R. S. ir Maxim, B. R. 2014. *Software Engineering: A Practitioner's Approach*. McGraw-Hill.
5. Qin, D., Chai, S., Wang, C. 2019. *A Novel Wireless Barcode Print-And-Scan System Based on Android*. doi: 10.23977/amce.2019.024.
6. Sarker, S. 2022. *Choosing a cloud database solution for managing AEM survey datasets*. doi: 10.1080/14432471.2022.2034322.
7. Couchbase. 2022. *Why NoSQL?* [interaktyvus], [žiūrėta 2023 m. kovo 18 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.couchbase.com/resources/why-nosql>.
8. Saxena, R. S. 2009. *Inventory Management: Controlling in a Fluctuating Demand Environment*. Global India Publications.
9. Sommerville, I. 2015. *Software Engineering; Tenth-Edition*. New York: Pearson.
10. Lambdatest. 2022. *Cross browser testing cloud* [interaktyvus], [žiūrėta 2023 m. balandžio 14 d.]. Prieiga per internetą: [https://www.lambdatest.com/?fp\\_ref=astseo16](https://www.lambdatest.com/?fp_ref=astseo16).
11. Gromov, M., Prokopenko, S., Shabaldina, N. ir Laputenko, A. 2019. *Model Based JUnit Testing*. IEEE. doi: 10.1109/EDM.2019.8823472.
12. Stone, D., Jarrett, C., Woodroffe, M., ir Minocha, S. 2005. *User Interface Design and Evaluation*. Elsevier, Inc.
13. Shellhammer, S. J., Goren, D. P. ir Pavlidis, T. 1999. *Novel signal-processing techniques in barcode scanning*. IEEE. doi: 10.1109/100.755815.

## WAREHOUSE MANAGEMENT SYSTEM

### Summary

The system currently in use in the company's warehouse is rather immobile. In order to manage a large warehouse, it is not possible to access the system from any part of the warehouse, thus requiring the staff to carry out a large number of manual operations which are time and energy consuming, leading to inefficiencies and execution errors. The purpose of the paper is to design and implement a warehouse management system. In the existing system, workers face mobility

and efficiency issues because they need to perform many manual operations and cannot control the system from anywhere. The proposed solution is to implement a mobile application project that would allow employees to manage the warehouse more easily and quickly. The warehouse management system design is capable of storing information on ordered products and products ready for dispatch in a warehouse.

**Key words:** warehouse, Firebase, Android, scanner, mobile app.

## AUTORIŲ LYDRAŠTIS

**Autoriaus vardas, pavardė:** Julija Smirnova.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** lektorė.

**Darbo vietą ir pozicija:** Klaipėdos valstybinės kolegijos, Technologijų fakulteto, Inžinerijos ir informatikos katedros lektorė.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** informacinės technologijos, taikomųjų tyrimų metodologija.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 618 54683, j.smirnova@kvk.lt.

**Autoriaus vardas, pavardė:** Jurij Tekutov.

**Mokslo laipsnis ir vardas:** daktaras, docentas.

**Darbo vietą ir pozicija:** Klaipėdos valstybinės kolegijos, Technologijų fakulteto, Inžinerijos ir informatikos katedros docentas.

**Autoriaus mokslinių interesų sritys:** žiniomis grindžiami studijų proceso valdymo modeliai.

**Telefonas ir el. pašto adresas:** 8 618 54681, j.tekutov@kvk.lt.

## A COVER LETTER OF AUTHORS

**Author name, surname:** Julija Smirnova.

**Science degree and name:** lecturer.

**Workplace and position:** Klaipėda State University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Engineering and Informatics Department lecturer.

**Author's research interests:** information technology, applied research methodology.

**Telephone and e-mail address:** 8 618 54683, j.smirnova@kvk.lt.

**Author name, surname:** Jurij Tekutov.

**Science degree and name:** doctor, associated professor.

**Workplace and position:** Klaipėda State University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Engineering and Informatics Department associated professor.

**Author's research interests:** study process control knowledge based models.

**Telephone and e-mail address:** 8 618 54681, j.tekutov@kvk.lt.

**ISSN 2029-9303**

**ISSN 2783-6215**

**INŽINERINĖS IR EDUKACINĖS TECHNOLOGIJOS**  
**2024 Nr. 1**

Lietuvių kalbos redaktorė **Sonata Paulauskienė**  
Užsienio kalbos redaktorė **Judita Štreimikienė**

Tiražas 70 egz. 77 psl. Parengimo spaudai data 2024-06-27  
Išleido Kauno technikos kolegija, Tvirtovės al. 35, LT-50155 Kaunas

[www.ktk.lt](http://www.ktk.lt)

El.p. [ktk@edu.ktk.lt](mailto:ktk@edu.ktk.lt)