



VYTAUTAS MAGNUS  
UNIVERSITY  
MCMXXII

PAULIUS KARPAVIČIUS

---

UNIVERSALUS  
BEVIELIO JUTIKLIO,  
SKIRTO PJOVIMO  
ĮRANKIO BŪKLĖS  
STEBĖJIMUI, TYRIMAI  
IR KŪRIMAS

---

DAKTARO DISERTACIJOS  
SANTRAUKA

TECHNOLOGINIAI MOKSLAI,  
MECHANIKOS INŽINERIJA  
(T 009)

Kaunas  
2021

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
VYTAUTO DIDŽIOJO UNIVERSITETAS

PAULIUS KARPAVIČIUS

**UNIVERSALIAUS BEVIELIO JUTIKLIO, SKIRTO PJOVIMO  
ĮRANKIO BŪKLĖS STEBĖJIMUI, TYRIMAI IR KŪRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka  
Technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija (T 009)

2021, Kaunas

Disertacija rengta 2016–2020 metais Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute.

**Mokslinis vadovas:**

Prof. habil. dr. Vytautas OSTAŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – T 009).

**Redagavo:** Violeta Meiliūnaitė (Leidykla „Technologija“)

**Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:**

Prof. habil. dr. Arvydas PALEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – T 009) – **pirmininkas;**

Prof. habil. dr. Vladimir BABITSKY (Loughborough universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – T 009);

Prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, transporto inžinerija – T 003);

Vyr. m. d. dr. Gintautas DUNDULIS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – T 009).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2021 m. rugpjūčio 26 d. 13:00 val. Kauno technologijos universiteto Disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. paštas [doktorantura@ktu.lt](mailto:doktorantura@ktu.lt).

Disertacijos santrauka išsiųsta 2021 m. liepos 26 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY  
VYTAUTAS MAGNUS UNIVERSITY

PAULIUS KARPAVIČIUS

**RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A UNIVERSAL  
WIRELESS SENSOR FOR CUTTING TOOL CONDITION  
MONITORING**

Summary of Doctoral Dissertation  
Engineering Technological Sciences, Mechanical (T 009)

2021, Kaunas

This dissertation was prepared at Kaunas University of Technology, Institute of Mechatronics, during the period 2016–2020.

**Scientific Supervisor:**

Prof. Habil. Dr. Vytautas OSTAŠEVIČIUS, (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering, T 009).

**Editor:** Violeta Meiliūnaitė (Publishing Office “Technologija”)

**Dissertation Defence Board of Mechanical Engineering Science Field:**

Prof. Habil. Dr. Arvydas PALEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering, T 009) – **chairman**;

Prof. Habil. Dr. Vladimir BABITSKY (Loughborough University, Technological Sciences, Mechanical Engineering, T 009);

Prof. Habil. Dr. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Technological Sciences, Transport Engineering, T 003);

Dr. Gintautas DUNDULIS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering, T 009).

The official defence of the dissertation will be held at 1 p.m. on 26th of August, 2021 at the public meeting of Dissertation Defence Board of Mechanical Engineering Science Field in Dissertation Defense Hall at Kaunas University of Technology.

Address: K. Donelaičio St. 73-403, 44249 Kaunas, Lithuania.

Tel. no. (+370) 37 300 042; fax. (+370) 37 324 144; e-mail doktorantura@ktu.lt.

Summary of doctoral dissertation was sent on 26<sup>th</sup> of July, 2021.

The doctoral dissertation is available on the internet <http://ktu.edu> and at the library of Kaunas University of Technology (K. Donelaičio St. 20, 44239 Kaunas, Lithuania).

## 1. ĮVADAS

### **Temos aktualumas**

„Pramonė 4.0“ tai naujoji pramonės revoliucija, kuri apima tokias sąvokas kaip komunikacija, didieji duomenys (angl. *Big Data*) ir skaitmeninė debesų kompiuterija. Šios naujos koncepcijos priėmimas suteikia milžiniškų galimybių įgyvendinti žiedinės ekonomikos veikslių plano iniciatyvas švaresnei ir konkurencingesnei Europai, siekiant pagerinti bet kurio gamybos proceso, įgyvendinančio šias koncepcijas, kokybę, lankstumą ir efektyvumą. Ši disertacija skirta moksliniams tyrimams ir plėtrai, vienam iš svarbiausių „Pramonės 4.0“ etapų, kai kuriant įrenginius pjovimo procesui stebėti naudojami kibernetiniai-fiziniai komponentai. Kitas nepakeičiamas „Pramonės 4.0“ aspektas – daiktų internetas (DI), kuris įveiklina mašinų tarpusavio ryšius ir tinklus, įveikiančius geografinius apribojimus ir kliūtis, leidžiančius dinamiškai ir efektyviai naudoti turimus gamybos išteklius. Todėl atliekant tyrimus sukurta internetinė bevielio technologinių procesų stebėjimo sistema su paskirstytosiomis debesimis pagrįstomis didžiųjų duomenų programomis. Sujungus DI platformos ir dirbtinio intelekto stipriąsias puses, buvo sukurta prieiga prie realaus pasaulio duomenų ir jų apdorojimo, taip sukuriant virtualų realaus technologinio proceso vaizdą. Įrankio ir ruošinio sąveikos dinamikos tyrimai ir frezavimo proceso savaiminio belaidžio stebėjimo sprendimai užtikrina, kad bus pasiekta produkto kokybė, kuri yra pagrindinis išmaniosios gamybos veiksnys. Šių tyrimų rezultatai bus naudingi „Ateities išmaniųjų gamyklų“ kūrėjams ir plėtojams.

### **Tyrimo tikslas ir uždaviniai**

Šio tyrimo tikslas – išanalizuoti ir sukurti universalų savaiminio maitinimo belaidžio Daiktų interneto jutiklio mazgą, skirtą besisukančių kotinių įrankių būklės stebėsenai.

Pasiekti užsibrėžtam tikslui buvo keliami šie uždaviniai:

1. Teoriškai ištirti ir sukurti universalų savaiminio maitinimo belaidžio jutiklio mazgą, pagrįstą L&T (išilginių ir sukamųjų) virpesių režimų generavimu.
2. Eksperimentiškai patvirtinti ir pritaikyti sukurto bevielio jutiklio mazgo energijos generavimo ir belaidžio duomenų perdavimo savybes įrankių būviui stebėti.
3. Pritaikyti mašininio mokymosi algoritmą įrankių būvio stebėsenos proceso tinkamumui prognozuoti.

## **Tyrimo metodai**

Atlikti teoriniai ir eksperimentiniai dinamikos tyrimai. Virpesių teorija pritaikyta skaitmeniškai modeliuojant baigtinių elementų metodu komercine programine įranga „Comsol Multiphysics 5.1“. Dizainas ir 3D modeliai sukurti naudojant komercinį programinės įrangos paketą „Solidworks 2018“. Tyrimams panaudotas pjezoelektrinis daviklis, 3D skenuojančio lazerio doplerio vibrometras („Polytec Inc.“) ir internetinė bevielio technologinių procesų stebėjimo sistema. Frezavimo eksperimentams buvo naudojamas „Leadwell V-20“ frezavimo centras. Tyrimo metu gautiems signalams gauti ir apdoroti buvo naudojama „PicoScope“ aparatinė ir programinė įranga. Teorinės išvados buvo patikrintos eksperimentiniu tyrimu, atliktu Kauno technologijos universiteto Mechatronikos institute ir Mechanikos inžinerijos katedroje.

## **Ginamieji teiginiai**

- 1) Naudojant besisukantį kotinių įrankių laikiklį su spiraliniais grioveliais, pjezoelektrinio keitiklio virpesių amplitudės pjovimo metu padidėja, sugeneruodamos pakankamai elektros energijos bevieliam jutiklio mazgui maitinti.
- 2) Įrankio dilimo metu sugeneruotos elektros pokyčio įvertinimas gali būti naudojamas pjovimo įrankio būklei stebėti.

## **Mokslinis naujumas**

- 1) Sukurtas bangolaidžio su tolygiai paskirstytais spiraliniais grioveliais skaitmeninis modelis, leidžiantis sukimo virpesius paversti išilginiais, kurie perduodami deformuoti pjezoelektrinį keitiklį.
- 2) Sukurtas universalus jutiklio mazgas, belaidžiu būdu perduodantis duomenis technologiniam procesui stebėti ir valdyti.
- 3) Pasiūlyta dirbtinio intelekto metodika sukurtos įrangos tinkamumui prognozuoti.

## **Praktinė vertė**

- 1) Sukurtas universalus savaiminio maitinimo belaidis jutiklio mazgas, pritaikytas medžiagų pjovimo procesų stebėsenai ir valdymui.
- 2) Sukurtas universalus savaiminio maitinimo bevielio jutiklio mazgas yra patentuotas ir pagamintas.

## **Darbo rezultatų aprobavimas**

Disertacijoje pateikti tyrimai buvo publikuoti įvairiuose žurnaluose ir skelbti konferencijose:

dviejuose „Web of Science“ didelio poveikio tarptautinių žurnalų „The International Journal of Advanced Manufacturing Technology“ (IF2.96) ir „Sensors“ (IF3.275)) straipsniuose ir dviejuose straipsniuose indeksuotame tarptautiniame žurnale „Mechanika“ (IF0.5) ir IEEE konferencijos medžiagoje.

Dalyvauta ir pristatyti rezultatai 6-iose tarptautinėse konferencijose, užregistruotas 1 patentas.

### **Disertacijos struktūra ir apimtis**

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, bendrosios baigiamojo darbo išvados, literatūros sąrašas ir autoriaus publikacijų sąrašas.

Pirmajame disertacijos skyriuje apžvelgiama mokslinė literatūra apie „Pramonę 4.0“, jos samprata ir pagrindiniai komponentai: sąsajos, debesų gamyba, didieji duomenys ir tiesioginio bei realaus laiko apdorojimo procesų stebėseną, pagrįsta savaiminiais bevielėmis jutiklių tinklais. Apžvelgiama literatūra, susijusi su aplinkos energijos generavimu, daugiausia dėmesio skiriama virpesių keitimui į elektros energiją pjezoelektrinėmis keitikliais. Tiriamos rago (horno) tipo bangolaidžio rezonatorių pritaikymo apdirbimo aplinkoje su kotiniais besisukančiais įrankiais galimybės.

Antrajame skyriuje pateikiami teoriniai kotinio įrankio laikiklio tyrimai, skirti išilginių ir sukamųjų virpesių režimų generavimui ir besisukančio įrankio virpesių energijos transformavimui į elektros energiją.

Trečiajame disertacijos skyriuje pateikiami savaiminio maitinimo belaidžio jutiklio mazgo projektavimo rezultatai, pristatomas ir išsamiai aptariamas įterptosios sistemos veikimo principas, analizuojama jutiklio mazgo architektūra.

Ketvirtajame skyriuje pristatomas taikant mašininio mokymosi modelius atliktas eksperimentinis teorinio tyrimo rezultatų patikrinimas.

Išvadose pateikiami teorinių ir eksperimentinių tyrimų metu gauti rezultatai.



# 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Nauja pramonės karta, apibrėžta toliaregišku terminu „Pramonė 4.0“, akcentuoja naują pramonės revoliuciją. Šis naujas paradigmos pokytis, naudojant didžiųjų duomenų (angl. *Big Data*) taikymą ir ryšį, didins gamybos lankstumą kartu su masiniu pritaikymu, leidžiančiu siekti kokybės. Ši nauja gamybos paradigma yra daiktų internetas (angl. *Internet of Things*) ir išmanioji gamyba. „Pramonė 4.0“ yra nauja pramonės era, pasižyminti dideliu gamybos apimtities lankstumu, produktų pritaikymu ir aukštu partnerių, įmonių ir tiekėjų integracijos lygiu, kartu užtikrinant tvarumą [1].

Ketvirtoji pramonės revoliucija siejama su gamyklų skaitmenizavimu ir inovatyvių technologijų, tokių kaip internetas ir išmaniosios mašinos, kurios įgalina modulines, efektyvias ir ekologiškas gamybos sistemas, kuriose individualizuoti produktai gali patys kontroliuoti savo gamybos procesą, leidžiantį gaminti nedideliais kiekiais, tuo pačiu metu išlaikant masinės gamybos teikiamą naudą, diegimu [2].

Viena iš kertinių technologijų, įgalinančių „Pramonę 4.0“, yra gebėjimas realiuoju laiku stebėti technologinius procesus. Frezavimo technologinio proceso metu gaunama informacija gali būti naudojama, norint nustatyti įrankio būklę ir likusį jo tarnavimo laiką. Norint nustatyti įrankio nusidėvėjimo lygį kiekvienas atskirai arba šių fizinių signalų derinys gali būti matuojamas taikant tiesiogines ar netiesiogines jutiklių sistemas [3–5].

Jutikliai turėtų būti integruoti į gamybos sistemą, kuri įgyvendina išmanų apdirbimo proceso stebėjimą, pagrįstą debesų kompiuterijos sistemomis, galinčiomis mokytis iš technologinio proceso metu gaunamų duomenų, taip realizuojant kibernetinę-fizinę sistemą [6, 7].

Šiam tikslui pasiekti tinka bevielieji jutikliai, kurie atlieka: aplinkoje esančių skirtingų fizikinių dydžių matavimą, gautų duomenų apdorojimą ir saugojimą, bei jų perdavimą belaidžiu būdu į informacijos surinkimo mazgą, vadinamą bazine stotimi [8]. Kadangi belaidžių įrenginių, maitinamų baterijomis, tarnavimo laikas yra ribotas dėl riboto maitinimo šaltinio pajėgumo, šie jutikliai nėra tvarūs. Alternatyva vidiniam maitinimo elementui gali būti energijos surinkimas iš aplinkoje esančių energijos šaltinių, tokių kaip saulės, terminės, mechaninės ir elektromagnetinės energijos.

Publikacijoje [9] aptariamas jutiklis yra paremtas pjezoelektriniu efektu. Toks įrenginys surenka technologinio proceso metu frezoje generuojamų virpesių energiją, sukuriama frezos dantims fiziškai kontaktuojant su ruošiniu, kurio metu atliekamas cikliškas smūgiavimas. Straipsnio [10] autoriai panaudoja pjezoelektrinį keitiklį energijos surinkimui tekinimo technologinio proceso metu. Straipsnyje [11] naudojamas gembės formos pjezoelektrinis keitiklis yra

tvirtinimas prie besisukančio įrankio – frezos, kuris patiria pagreičio pokyčius, lemiančius pjezoelektrinio keitiklio deformacijas, taip generuojama įtampa, kuri įkrauna kondensatorių, naudojamą kaip alternatyva maitinimo elementui. Dėl frezavimo įrankio būklės pablogėjimo padidėja pjovimo jėgos, žadinančios įrankį apdirbimo proceso metu, todėl padidėja ir pagreičio amplitudės, lemiančios didesnes keitiklį veikiančias jėgas. Kondensatoriuje sukaupta energija yra panaudojama paties jutiklio maitinimui, suteikiant autonomiškumą ir ilgaamžiškumą.

Apžvelgti jutikliai, kurie naudojami apdirbimo procesų stebėjimui, yra tvirtinami tiesiai prie įrankio, todėl gali būti veikiami aplinkos (temperatūra, aušinimo skystis, metalo drožlės), kas gali paveikti jų tarnavimo laiką ir matavimo duomenų tikslumą.

## 2. TEORINIAI ENERGIJOS SURINKIMO IŠ BESISUKANČIŲ ĮRANKIŲ PANAUDOJANT PJEZOELEKTRINIUS KEITIKLIUS TYRIMAI

Šiame skyriuje atliekamas teorinis tyrimas, kurio metu vertinama galimybė pasiekti išilginių ir sukamųjų modų superpoziją kūgio formos įrankio laikiklio paviršiuje suformuojant spiralines įpjovas. Taip pat atliekami tyrimai siekiant įvertinti, kokią įtaką išilginių ir sukamųjų modų superpozija turi pjezoelektrinio keitiklio generuojamam elektriniam krūviui esant frezavimo įrankio žadinimui sukamaisiais virpesiais, bei pateikiamas įrankio laikiklio konstrukcijos tobulinimo vertinimas, siekiant padidinti pjezoelektrinio keitiklio sugeneruojamos energijos kiekį.

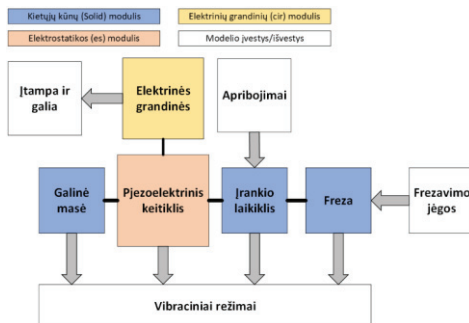
Šiam tikslui panaudotos „Comsol Multiphysics“ ir „Solidworks“ programinės įrangos platformos, skirtos trimačio vaizdo ir daugiafizikinių procesų modeliavimui. Įrankio laikiklio kontaktinio paviršiaus su pjezoelektriniu keitikliu poslinkio vertinimas buvo atliktas naudojant „Kietųjų kūnų (solid)“ fizikinį modulį. Surinkto įrankio laikiklio su pjezoelektriniu keitikliu generuojamos įtampos ir energijos vertinimas esant frezavimo įrankio žadinimui buvo atliktas pasitelkiant „Elektros grandinių (cir)“, „Elektrostatikos (es)“ ir „Kietųjų kūnų (solid)“ fizikinius modulius. Fizikinių modulių, naudojamų FEM skaičiavimuose, blokinė schema pateikta 1 pav.



Įtampai matuoti elektrinės schema yra sujungtos su pjezoelektriniu keitikliu

**1 pav.** Fizikinių modulių, naudojamų FEM skaičiavimuose, schema. Panaudoti fizikiniai modeliai „Comsol Multiphysics“ programinės įrangos aplinkoje FEM skaičiavimams atlikti

Visą naudotą daugiafizikinį modelį išsamiau paaškina 2 pav. pateikta blokinė schema.



**2 pav.** Principinė blokinė schema, naudota „Comsol multiphysics“ FEM modeliavimui

Teorinio tyrimo metu naudotas surinktas geometrinis modelis, pateiktas 3 pav., yra sudarytas iš galinės frezos, įrankio laikiklio (su ir be išpjovų) ir žiedo tipo pjezoelektrinio keitiklio su galine mase. Modelyje naudotos medžiagos: molibdenas galinei frezai, anglinis plienas įrankio laikikliui, 3003 tipo aliuminis galinei masei ir PZT-5H (švino cirkonato tritanatas)  $d_{33}$  tipo pjezoelektriniam keitikliui.

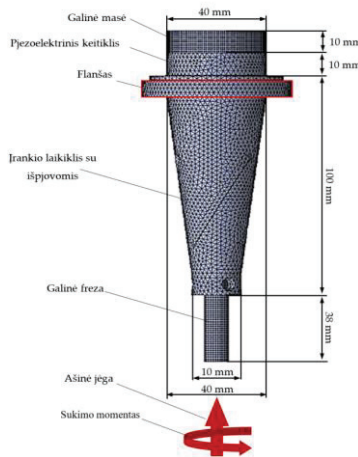
Tyrimai buvo atlikti norint įvertinti kuriamos sistemos savuosius dažnius, kombinuotų išilginių ir sukamųjų virpesių dažnių priklausomybę nuo įrankio laikiklio paviršiuje suformuotų išpjovų ir jų geometrinių parametrų bei jų įtaką pjezoelektrinio keitiklio generuojamai įtampai. Modelyje pjezoketiklio generuojama įtampa ir galia vertinamos matuojant  $V_{out}$  ir  $P_{out}$  parametrus [1, 2]:

$$V_{out} = abs(cir.R1\_v), \quad (1)$$

$$P_{out} = realdot(cir.R1\_i, cir.R1\_v) \quad , \quad (2)$$

kur  $cir.R1\_v$  ir  $cir.R1\_i$  yra „Comsol Multiphysics“ įtampos ir srovės amplitudžių parametrai, matuojami esant elektrinei apkrovai.

Atlikti tyrimai rodo, ar keičiant įrankio laikiklio geometriją galima pasiekti kombinuotą išilginių ir sukamųjų virpesių modą ir kaip tai gali būti panaudota norint padidinti pjezoelektrinio keitiklio generuojamą elektrinį krūvį esant įrankio žadinimui sukamosios formos virpesiais. Teorinių tyrimų metu išmatuota pjezoelektrinio keitiklio generuojama galia ir įtampa leidžia įvertinti, ar frezavimo metu naudojant suprojektuotą įrenginį gali būti išgautas pakankamas energijos kiekis, tinkamas užmaitinti itin mažos galios elektroniką, skirtą fizikinių signalų matavimams, surinktų duomenų apdorojimui ir perdavimui bevieliu ryšiu.



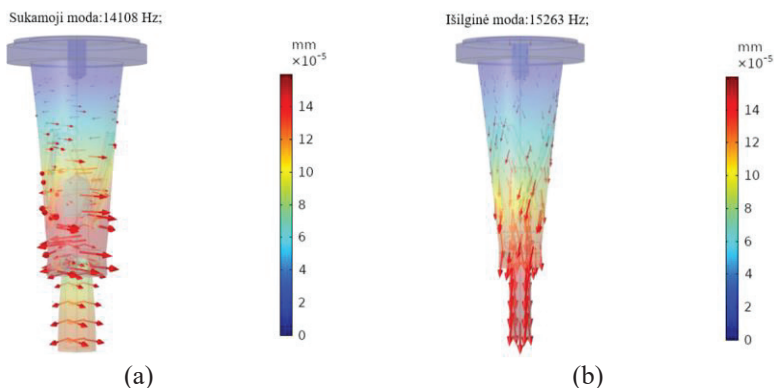
3 pav. Teoriniuose tyrimuose naudojamo įrankio laikiklio surinkimo schema

## 2.1. Kombinuotų išilginių ir sukamųjų virpesių generavimas įrankio laikiklyje

Kūgio formos įrankio laikiklis mokslinėje literatūroje, kartais dar vadinamas „ragu“ (hornu), paprastai naudojamas apdirbimo procesuose, siekiant sužadinti įrankyje tam tikro dažnio virpesius, taip sumažinant pjovimo jėgas bei pagerinant apdirbamo ruošinio paviršiaus kokybę. Dėl tokio kūgio įrankio su ruošiniu sąsajoje yra generuojami išilginiai, sukamieji arba išilginiai-sukamieji virpesiai.

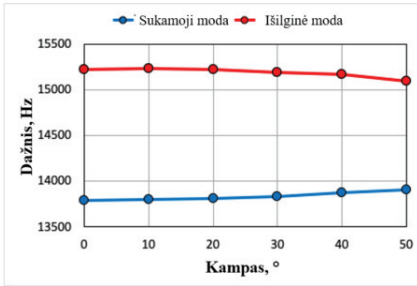
Šiame teorinio tyrimo etape naudojami du kūgio formos įrankio laikikliai, surinkti su freza, kai vieno iš jų paviršiuje suformuotos trys vienodai išdėstytos išpjovos. Modeliavimo rezultatai pateikti 4 pav. Iš jų matome, kad sukamųjų virpesių savasis dažnis pasiekiamas prie 13,9 kHz, o išilginių – prie 15,4 kHz.

Artimi sukamųjų ir išilginių virpesių savių dažniai byloja apie modų superpoziciją, kai kūgio formos įrankio laikiklis yra sužadinas rezonuoti abiem (sukamaisiais-išilginiais) savaisiais dažniais vienu metu.

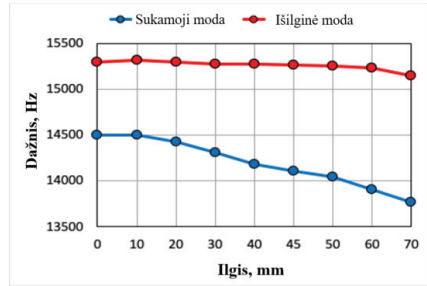


4 pav. Įrankio laikiklio su išpjovomis (a) sukamųjų (b) išilginių virpesių formos

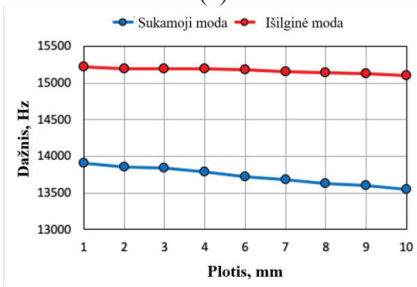
Sukamųjų ir išilginius virpesius ir atvirkščiai keitimo efektyvumas priklauso nuo išpjovų geometrinių parametrų, tokių kaip posvyrio kampas, ilgis, gylis ir plotis. Šių geometrinių parametrų keitimas įtakoja dažnių skirtumą tarp sukamųjų ir išilginių virpesių modų. Šiai įtakai įvertinti buvo atliktas teorinis parametrisinis tyrimas, kurio metu išpjovų posvyrio kampas buvo keičiamas nuo 0° iki 70°, 10° žingsniais, ilgis 0 mm iki 10 mm, 10 mm žingsniais, plotis 1 mm iki 10 mm, 1 mm žingsniais, ir gylis 1 mm iki 6 mm, taip pat 1 mm žingsniais. Iš gautų rezultatų (5 pav.) matome, kad didžiausią įtaką sukamųjų ir išilginių virpesių modų superpozicijai turi išpjovų gylis, kurį didinant dažnių skirtumas tarp šių modų dažnių padidėja iki 16,5 %. Tolesniems teoriniams tyrimams pasirinktas išpjovų gylis yra 3 mm, ilgis – 45 mm, plotis – 3 mm, o posvyrio kampas – 30°.



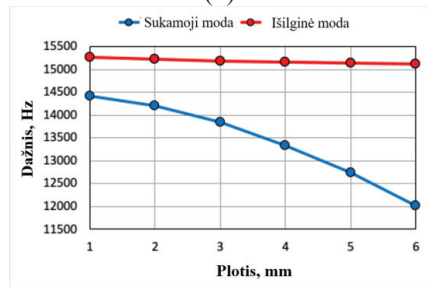
(a)



(b)



(c)

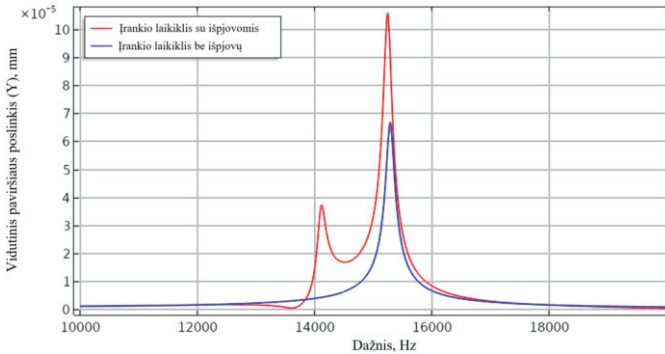


(d)

**5 pav.** Įrankio laikiklio sukamųjų ir išilginių virpesių formos dažnių priklausomybė nuo išpjovų (a) – posvyrio kampo, (b) – ilgio, (c) – pločio ir (d) – gylio

Ūėjiant teorinius tyrimus įrankio laikiklis buvo surinktas kartu su freza, kuri buvo ŗadinama tangentine, radialine ir ašine jėgų dedamosiomis taip imituojant frezavimo procesą.

Iš gautų rezultatų (6 pav.) matome, kad naudojant įrankio laikiklį su išpjovomis esant įrankio ŗadinimui formuojama sukamųjų ir išilginių virpesių moda. Matome, kad ant kūgio formos įrankio laikiklio paviršiaus suformuotos išpjovos ne tik lemia sukamųjų ir išilginių virpesių formos atsiradimą, bet taip pat beveik du kartus padidėja paviršiaus poslinkio amplitudė ašine kryptimi, nes išpjovos sumažina įrankio standumą radialine kryptimi, taip įgalindama dalinai keisti sukamuosius ir radialinius virpesius į išilginius.

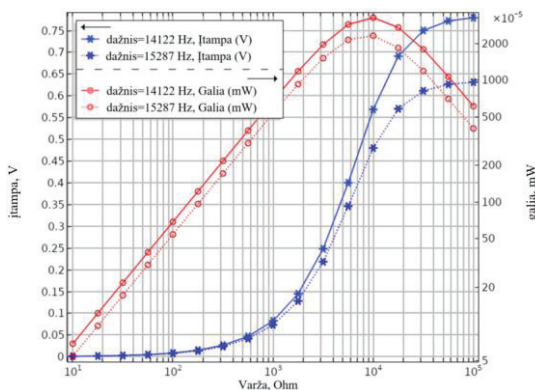


6 pav. Vidutiniai paviršiaus poslinkiai matuoti įrankio laikikliui su išpjovomis ir be jų

## 2.2. Įrankio virpesių transformavimas į elektros energiją

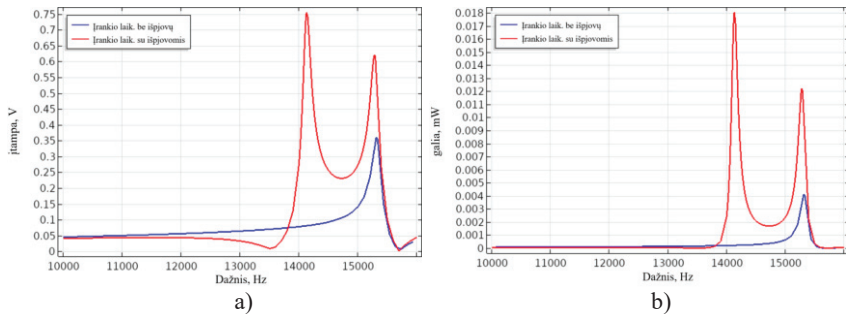
Šio tyrimo metu pjezoelektrinis keitiklis ir galinė masė buvo surinktas kartu su įrankio laikikliu (3 pav.), turinčiu išpjovas savo paviršiuje ir be jų. Įtampos ir galios matavimai buvo atlikti „Comsol multiphysics“ aplinkoje 10–20 kHz dažnių diapazone esant frezos žadinimui sukamaisiais, radialiniais ir ašiniais virpesiais.

Pjezoelektrinis keitiklis, surinktas su įrankio laikikliu, buvo prijungtas prie apkrovos varžos, kurios reikšmė buvo keičiama nuo  $10 \Omega$  iki  $100 \text{ k}\Omega$  (7 pav.). Tai leido įvertinti, kad optimali apkrovos varža, sudaranti sąlygas išgauti didžiausią įtampą ir galią, yra  $31,6 \text{ k}\Omega$ . Kitame žingsnyje 10–20 kHz dažnių diapazone buvo matuojama įtampa ir galia, gaunama iš pjezoelektrinio keitiklio, surinkto kartu su įrankio laikikliu su išpjovomis ir be jų, esant frezos žadinimui.



7 pav. Pjezoelektrinio keitiklio įtampos ir galio priklausomybės nuo apkrovos varžos vertės

Iš gautų rezultatų galime matyti, kad kai pjezoelektrinis keitiklis yra surinktas su įrankio laikikliu, turinčiu išpjovas savo paviršiuje ir naudojant apkrovos varžą, įrenginį sužadinus sukamųjų-ašinių virpesių modeje, galime išgauti daugiau nei du kartus didesnę įtampą (8a pav.) ir daugiau nei keturis kartus didesnę galią (8b pav.) lyginant su įrankio laikikliu be išpjovų.



8 pav. Iš pjezoelektrinio keitiklio matuota įtampa (a) ir galia (b) naudojant įrankio laikiklį su išpjovomis ir be jų

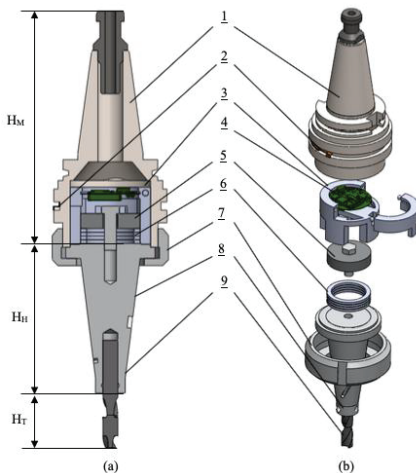
## Skyriaus išvados

1. Atliktas tyrimas parodė, kad išpjovos gylis turi didžiausią įtaką sukamosios-išilginės modos superpozicijai.
2. Naudojant kūgio formos laikiklį su išpjovomis galima:
  - 2.1. pasiekti iki dviejų kartų didesnius paviršiaus poslinkius išilgine kryptimi ir
  - 2.2. išgauti iki 8,3 karto didesnę įtampą, generuojamą pjezoelektrinio keitiklio esant žadinimui sukamojoje modeje, bei iki 1,7 kartų esant žadinimui išilginėje modeje.
3. Kai įrankio laikiklis yra sužadinimas rezonuoti sukamosios-išilginės modos režimu pjezoelektrinio keitiklio surenkamos energijos pakanka užmaitinti mažos galios elektroniką.



### 3. ĮRENGINIO, SKIRTO BESISUKANČIŲ ĮRANKIŲ BŪKLĖS STEBĖJIMUI, PROJEKTAVIMAS

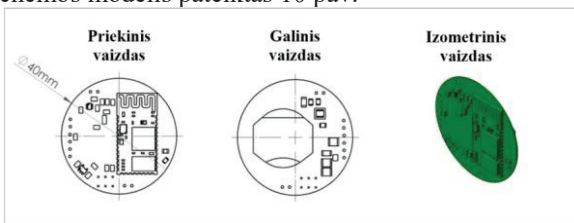
Šiame skyriuje aprašomas besisukančių įrankių būklės stebėjimo įrenginys. Įrenginys susideda iš kūgio formos įrankio laikiklio su spiralinėmis įpjovomis, pjezoelektrinio keitiklio, galinės masės, elektroninio mazgo su duomenų apdorojimo ir belaidžio perdavimo galimybėmis integruoto Morzės kūgyje. 9 pav. pateiktas suprojektuoto įrenginio trimačio vaizdo skerspjūvis.



9 pav. (a) – įrenginio skerspjūvio vaizdas, (b) – įrenginio surinkimo skleistinė. (1) – Morzės kūgis; (2) – antena bevelei komunikacijai; (3) – spausdintos schemos laikiklis; (4) spausdinta schema su elektronika; (5) – galinė masė; (6) – ašine kryptimi poliarizuotas PZT-5H pjezoelektrinis keitiklis; (7) – jungė; (8) – kūgio formos įrankio laikiklis; (9) – galinė freza

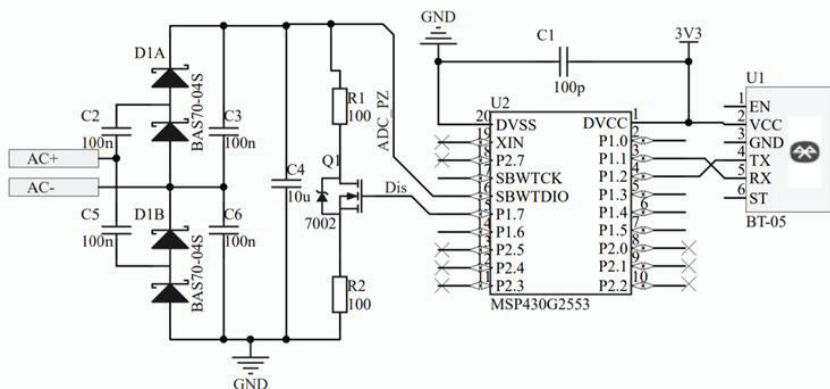
#### 3.1. Spausdintos plokštės ir belaidžio jutiklio schemas dizainas

Morzės kūgio viduje kartu su pjezoelektriniu keitikliu ir galine mase tvirtinama spausdintinė elektronikos schema. Trimatis suprojektuotos spausdintos schemos modelis pateiktas 10 pav.



10 pav. Priekinis, galinis ir izometrinis spausdintos schemos vaizdas

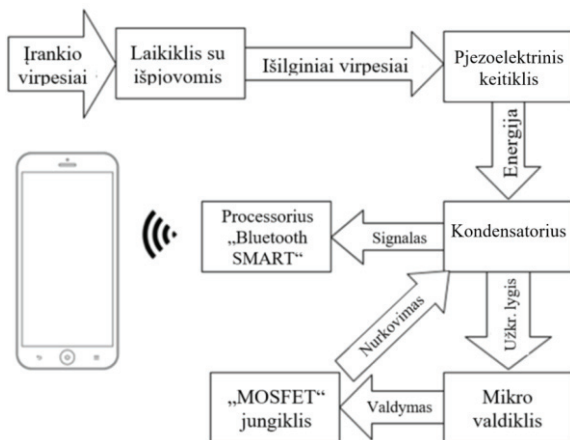
Suprojektuoto jutklio elektrinė schema, pateikta 11 pav., susideda iš: įtampos daugiklio (D1A ir D1B), kondensatorių (C2, C3, C5, C6), į kuriuos įrankio žadinimo metu yra tiekiami pjezoelektrinio keitiklio sugeneruota įtampa. Iš įtampos daugiklio įtampa tiekiami į kondensatorių C4, kurio įkrovos lygis yra matuojamas per mikrovaldiklio U2 10bit ADC įėjimą ir lyginamas su nustatytu įkrovos lygiu. Jeigu kondensatoriaus C4 įtampos lygis padidėja virš šios nustatytos ribos, apkrova, kurią sudaro R1 ir R2 varžos, perjungiamą Q1 N-kanalo tranzistoriaus, taip iškraunant C4 kondensatorių. Po kondensatoriaus iškrovimo pradedamas kitas matavimo ciklas. Iš C4 kondensatoriaus iškrauta įtampa yra tiekiami į superkondensatorių, iš kurio gali būti panaudojama jutkliui maitinti. Kondensatoriaus iškrova yra registruojama mikrovaldiklyje, ir informacija apie tai išsiunčiama bevieliu („Bluetooth“) ryšiu į kitą išmanųjį įrenginį, pvz., išmanųjį telefoną, kuriame šių įvykių parametrai yra kaupiami.



11 pav. Suprojektuoto jutklio prototipo elektrinė schema

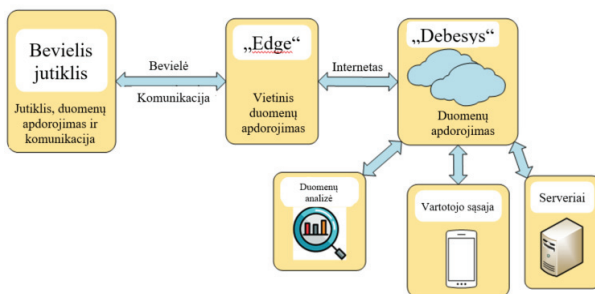
### 3.2. Sukurto įrenginio architektūra ir veikimo principas

Sukurto jutklio architektūra pateikta 12 pav. Įrenginio veikimo principas pagrįstas energijos surinkimu apdirbimo proceso metu. Dylant įrankiui padidėja jį veikiančios radialinės jėgos. Šie įrankyje sužadinti virpesiai perduodami į kūgio formos įrankio laikiklį, kuriame dėl suformuotų išpjovų yra dalinai keičiami į išilginius virpesius, kurie perduoti į pjezoelektrinį keitiklį jį deformuoja ir taip yra generuojama įtampa, kuri paduodama į C4 kondensatorių. Kai kondensatorius pasiekia mikrovaldiklyje nustatytą įtampos lygį, jis yra nukraunamas ir informacija apie šį įvykį bevieliu ryšiu perduodama į kitus įrenginius.



12 pav. Suprojektuoto jutiklio sistemos lygio architektūra.

Pagrindinis ryšio įrenginys, kuriam informacija apie kondensatoriaus nukrovimo įvykį frezavimo metu siunčiama iš siūlomo belaidžio jutiklio per „LAN“ ar „PAN“ tinklą, vadinamas „edge“ prietaisu. Su šiuo įrenginiu ryšys gali būti palaikoma naudojant „WI-FI“, „Bluetooth“, Bluetooth Smart, „Zigbee“ ar kitus protokolus, priklausomai nuo esamų apribojimų: reikalinga greیتaveika, atstumas nuo siųstuvo, galimas prietaiso energijos suvartojimas. Paprastai šis įrenginys atlieka vietinį gautų duomenų apdorojimą tuo pačiu suteikdamas prieigą prie interneto (13 pav.). Toliau duomenys gali būti siunčiami į „debesis“ aukštesnio lygio duomenų analizei ir archyvavimui serveriuose.



13 pav. Belaidžio jutiklio tinklo architektūra

Aprašyto tyrimo metu, vietoje „edge“ įrenginio buvo naudojamas „iOS“ arba „Android“ išmanusis telefonas, palaikantis „Bluetooth“ bevielio ryšio funkciją. Taip informacija iš jutiklio yra siunčiama į išmanųjį telefoną, kuriame gauti duomenys yra rodomi ekrane bei tuo pačiu metu įrašomi į tekstinį failą tolesniam apdorojimui ir analizei.

### **Skyriaus išvados**

- 1) Suprojektuotas kūgio formos įrankio laikiklis su išpjovomis su integruotu pjezoelektriniu keitikliu ir jutiklio elektronika.
- 2) Jis sudarytas iš spausdintos schemos su elektronika, paruoštos pagal elektrines schemas.
- 3) Aprašyta jutiklio mazgo ryšių ir duomenų valdymo architektūra.

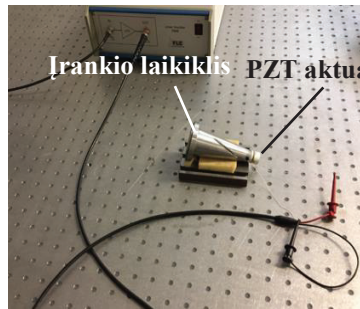
## 4. EKSPERIMENTINIAI PRIETAISO, SKIRTO BESISUKANČIŲ ĮRANKIŲ BŪKLĖS STEBĖJIMUI, TYRIMAI

### 4.1. Kūgio formos įrankio laikiklio virpesių formos tyrimas

Siekiant įvertinti, kaip kūgio formos įrankio laikiklio paviršiuje suformuotos spiralinės įpjovos veikia sukamųjų ir išilginių virpesių modų superpoziciją, buvo pagaminti du įrankio laikikliai: vienas su įpjovomis, kitas be jų. Eksperimento metu kūgio formos įrankio laikiklio (su įpjovomis ir be jų), sužadinto naudojant pjzoelektrinį akuatorių, virpesių modos buvo registruojamos naudojant 3D „Polytech“ skenerį (14 pav.).



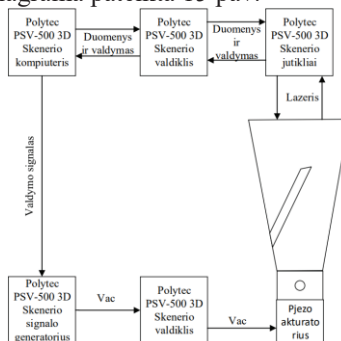
(a)



(b)

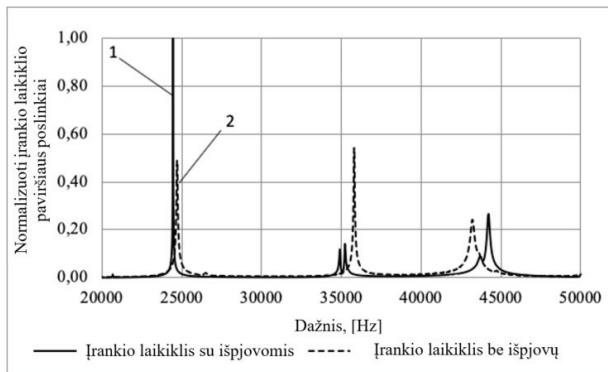
**14 pav.** Eksperimento metu naudojamas 3D „Polytech“ skeneris kūgio formos įrankio laikiklio virpesių formoms registruoti (a) ir kūgio formos įrankio laikiklis su išpjovomis žadinamas naudojant pjzoelektrinį akuatorių (b)

Eksperimento blokinė diagrama pateikta 15 pav.



**15 pav.** Kūgio formos įrankio laikiklio su išpjovomis ir be jų eksperimento blokinė diagrama naudota virpesių formos tyrimų metu

Ekspimento metu pjezoelektriniu aktuatoriumi įrankio laikiklis (su išpjovomis ir be jų) buvo sužadintas 0–50 kHz dažnio diapazone. Naudojant lazerinį skenerį, kūgio paviršiaus poslinkiai ašine kryptimi buvo išmatuoti ir gauti rezultatai pateikti 16 pav.

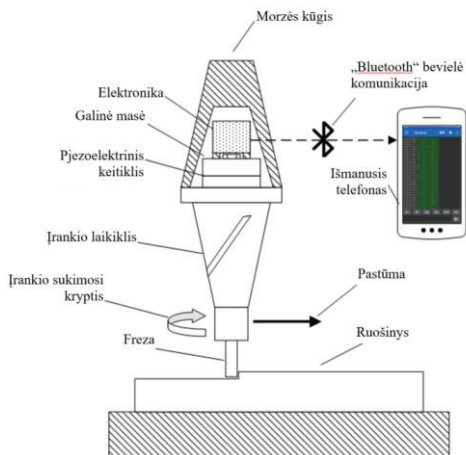


**16 pav.** Išmatuotos įrankio laikiklio paviršiaus poslinkių amplitudės ašine kryptimi esant žadinimui (1) – įrankio laikikliui su išpjovomis, (2) – įrankio laikikliui be išpjovų

Ekspimento metu gauti rezultatai rodo, kad naudojant įrankio laikiklį su išpjovomis, kai jis yra sužadintas rezonuoti savo išilginėje modoje, paviršiaus poslinkiai yra du kartus didesni, nei įrankio laikiklio be išpjovų. Gauti rezultatai sutampa su rezultatais, gautais teorinio tyrimo metu (plg. 6 pav.).

#### **4.2. Eksperimentiniai tyrimai įrankio virpesių energijos surinkimo savybėms nustatyti frezavimo metu**

Šio eksperimentinio tyrimo metu buvo vertinamos įrankio virpesių energijos surinkimo galimybės frezavimo proceso metu ir jų priklausomybė nuo paties proceso ir įrankio laikiklio geometrinų parametų. Eksperimentų schema yra pateikta 17 pav.



17 pav. Įrenginio eksploatavimo eksperimento metu schema

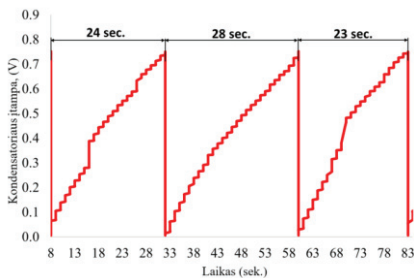
Eksperimentas buvo atliktas naudojant „Leadwell V-20“ frezavimo centrą, apdirbant 1.0037 tipo plieninį ruošinį trijų dantų galine freza. Frezavimas buvo atliekamas naudojant įrankio laikiklį su ir be įpjovų. Mikrovaldiklis buvo užprogramuotas, kad C4 kondensatoriui pasiekus 0,7 V įkrovą, jis būtų nukraunamas, o informaciją apie kondensatoriaus užsikrovimo lygį „Bluetooth“ bevielės komunikacijos būdu buvo persiunčiama į išmanųjį telefoną 250 ms cikliškumu.

Pirmoje eksperimento dalyje frezavimo proceso parametrai buvo parinkti tokie: suklio apskukos – 1210 aps./min, pastūma – 148 mm/min, frezavimo gylis – 1 mm. Gauti rezultatai, pateikiami 18 pav., vaizduoja kondensatoriaus užsikrovimo lygio kitimą laike, naudojant įrankio laikiklį su ir be įpjovų.

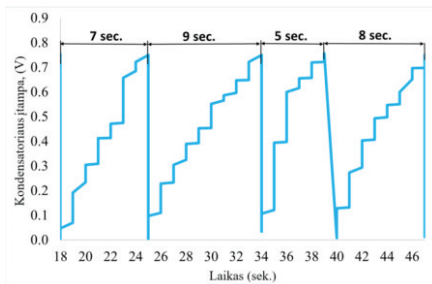
Iš gautų rezultatų matome, kad C4 kondensatoriaus užkrovimo iki nustatytos 0,7 V ribos laikas priklauso nuo naudojamo įrankio laikiklio. Naudojant įrankio laikiklį be įpjovų vidutinis kondensatoriaus užkrovimo laikas iki 0,7 V yra 25 sekundės, o naudojant įrankio laikiklį su įpjovomis šis laikas sutrumpėja iki 7,25 sekundės, t. y. matomas 3,4 karto skirtumas. Tai reiškia, kad naudojant įrankio laikiklį su įpjovomis, 3,4 kartus daugiau įrankio virpesių energijos galima sugeneruoti frezavimo proceso metu.

Eksperimentas buvo kartojamas dar du kartus, kiekvienos iteracijos metu naudojant skirtingus frezavimo proceso parametrus:

- 1) suklio apskukos – 1210 aps./min, pastūma – 148 mm/min, frezavimo gylis – 1,5 mm.;
- 2) suklio apskukos – 1500 aps./min, pastūma – 148 mm/min, frezavimo gylis – 1,5 mm.



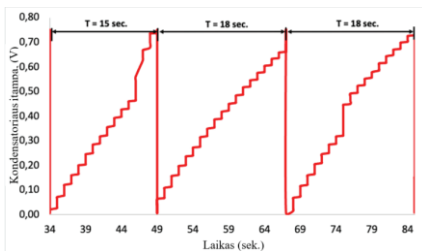
(a)



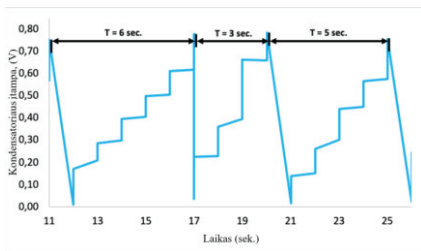
(b)

**18 pav.** Kondensatoriaus C4 užsikrovimo lygio kitimas laike naudojant (a) – įrankio laikiklį be įpjovų, (b) – įrankio laikiklį su įpjovomis

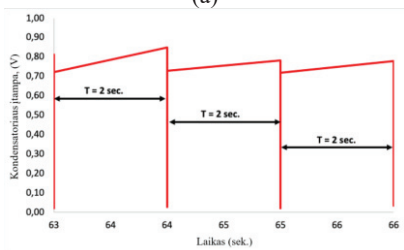
Iš gautų rezultatų matome (19 pav.), kad frezavimo metu didinat apsukus ir įpjovimo gylį, nepriklausomai nuo to, ar naudojamas įrankio laikiklis su ar be įpjovų, sugeneruojamos energijos kiekis (išreikštas kaip kondensatoriaus C4 užkrovimo lygis laiko skleistinėje) išauga, tai nutinka dėl išaugusių jėgų, veikiančių įrankį. Bet visais atvejais kondensatoriaus C4 užkrovimo laikas yra 3,4-4,09 karto trumpesnis (sugeneruojamos energijos skirtumas), kai yra naudojamas įrankio laikiklis su įpjovomis.



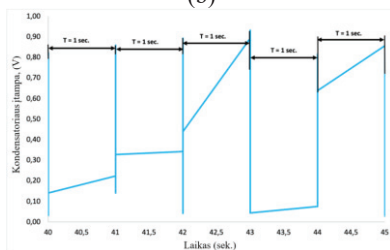
(a)



(b)



(c)



(d)

**19 pav.** Kondensatoriaus C4 užsikrovimo lygio kitimas laike taikant frezavimo parametrus: apsukos – 1210 aps./min, pastūma – 148 mm/min, frezavimo gylis – 1,5 mm naudojant (a) – įrankio laikiklį be įpjovų, (b) – įrankio laikiklį su įpjovomis. Apsukos –

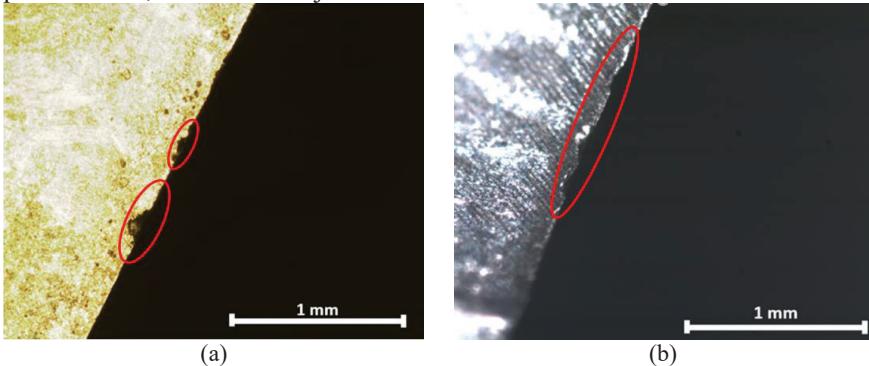


1210 aps./min, pastūma – 148 mm/min, frezavimo gylis – 1,5 mm naudojant (c) – įrankio laikiklį be išpjovų, (d) – įrankio laikiklį su įpjovomis

### 4.3. Eksperimentiniai tyrimai įrankio nusidėvėjimo identifikavimui naudojant suprojektuotą įrenginį

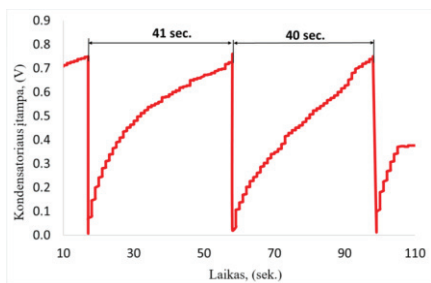
Šioje eksperimentinių tyrimų dalyje, buvo tiriama, ar naudojant suprojektuotą įrenginį galima nustatyti įrankio nusidėvėjimą, kuris yra išreikštas kaip C4 kondensatoriaus užkrovimo laiko pokytis. Šiam tikslui buvo naudojamas surinktas įrenginys (plg. 11 pav.), tik šiuo atveju buvo pasitelkta dviejų dantų karbidinė galinė freza. Buvo apdirbamas 6082 tipo aliuminio ruošinys. Parinkti frezavimo proceso parametrai buvo tokie: suklio apskukos – 4000 aps./min, pastūma – 300 mm/min, frezavimo gylis – 1 mm.

Eksperimento metu buvo naudojamos dvi galinės frezos: viena nauja, kita turinti dirbtinai sukurtus pjaunamosios briaunos defektus (20 pav.). Ši freza buvo naudojama įvertinti, kaip kinta kondensatoriaus C4 užkrovimo laikas frezavimo proceso metu, esant nusidėvėjimui.

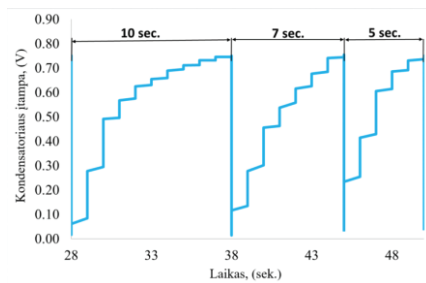


20 pav. (a) ir (b) eksperimentų metu naudotos galinės frezos pjaunančiojoje briaunoje dirbtinai suformuoti defektai

Bandymų metu gauti rezultatai yra pateikti 21 pav. Iš jų matome, kad frezavimo metu naudojant frezą su defektais, kondensatoriaus užsikrovimo laikas sutrumpėja iki 5,7 karto, lyginant su kondensatoriaus užsikrovimo laiku, kai ruošinys apdirbamas su nauja freza. Defektai frezoje lemia, kad didesnės jėgos veikia įrankį darbo metu – taip yra sužadinami didesnės amplitudės virpesiai, kurie pjezoelektrinio keitiklio yra surenkami ir konvertuojami į elektros energiją.



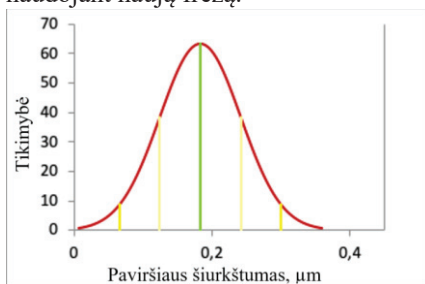
(a)



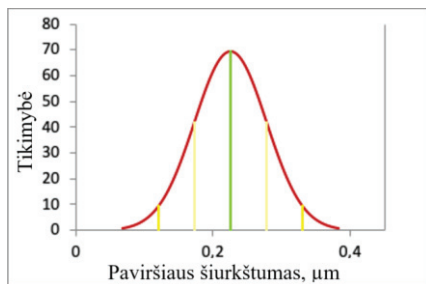
(b)

**21 pav.** Kondensatoriaus užkrovimo laikas iki 0,7 V naudojant (a) – naują frežą, (b) – naudojant frežą su defektais

Paviršiaus šiurkštumo  $R_a$  parametro matavimai buvo atlikti naudojant „Mitutoyo SJ-210“ įrenginį. 22 pav. pateikiami ruošinio paviršiaus  $R_a$  šiurkštumo matavimai naudojant „Mitutoyo SJ-210“ įrenginį, kai ruošinys yra apdirbamas naudojant įrankio laikiklį, turintį išpjovas ir be jų. Ruošinio apdirbimas atliktas naudojant naują frežą.



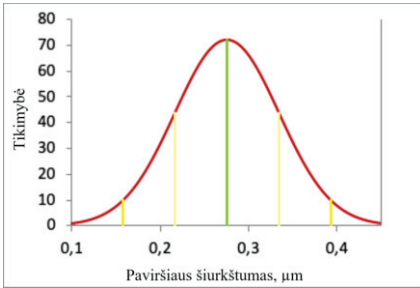
(a)



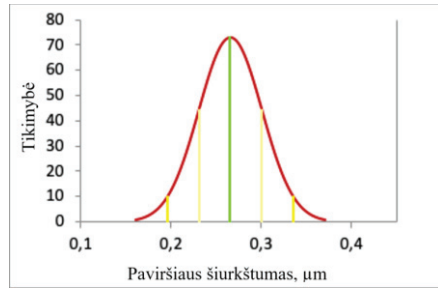
(b)

**22 pav.** Ruošinio paviršiaus šiurkštumo matavimų, atliktų po frezavimo, normalus skirstinys; buvo naudojamas (a) – įrankio laikiklis be išpjovų ir (b) – turintis išpjovas

Gauti rezultatai rodo, kad naudojant įrankio laikiklį su išpjovomis vidutinis ruošinio šiurkštumo dydis yra 18,6 % mažesnis, bet matavimų pasiskirstymo diapozonas yra 35 % mažesnis, lyginant su įrankio laikiklio be išpjovų duomenimis. Ruošinio paviršiaus šiurkštumo rezultatai, atlikus frezavimą su nusidėvėjusia freza, yra pateikti 23 pav.



(a)



(b)

**23 pav.** Ruošinio paviršiaus šiurkštumo matavimų, atliktų po frezavimo, normalus skirstinys; buvo naudojama nusidėvėjusi freza su (a) – įrankio laikikliu be įpjovų ir (b) – turinčiu įpjovas

Naudojant nusidėvėjusį įrankį, vidutinė ruošinio paviršiaus šiurkštumo reikšmė įrankio laikikliui su įpjovomis ar be jų yra praktiškai vienodos, bet naudojant įrankio laikiklį su išpjovomis, reikšmių pasiskirstymas yra 45,6 % mažesnis. Tai gali būti įtakojama kombinuotų išilginių-sukamųjų virpesių formų atsiradimo įrankio laikiklyje, kuris yra perduodamas į įrankį, sukuriant efektą, panašų į naudojamą vibracinio pjovimo metu.

#### 4.4. Eksperimentiniai tyrimai, skirti pjaustytuvų nusidėvimui su belaidžio jutiklio mazgu nustatyti taikant mašininio mokymosi modelius

Šiame eksperimentinių tyrimų etape ruošinio paviršiaus frezavimas buvo atliktas 61 kartus, pradedant su aštriu (nauju) įrankiu, palaipsniui pasiekiant jo nusidėvimą. Viso frezavimo metu, duomenys iš įrenginio apie kondensatoriaus užsikrovimo lygį buvo siunčiami 250 ms ciklu į išmanųjį telefoną. Po kiekvienos ruošinio paviršiaus frezavimo iteracijos, paviršiaus šiurkštumo  $R_a$  parametras buvo matuojamas 15 kartų naudojant „Mitutoyo SJ-210“ paviršiaus šiurkštumo matavimo prietaisą.

Eksperimento metu buvo fiksuojami du parametrai: kondensatoriaus užsikrovimo lygis frezavimo proceso metu bei ruošinio paviršiaus šiurkštumas po kiekvienos apdirbimo iteracijos. Šiems parametrams buvo taikytas „Support Vector Machine“ (SVM) pagrįstas prognozavimo modelis, siekiant numatyti įrankio nusidėvimą, išreikštą ryšiu tarp kondensatoriaus įkrovos lygio ir paviršiaus šiurkštumo pokyčių. SVM yra vienas iš populiariausių prižiūrimo mokymosi algoritmų, taikomų klasifikavimo ir regresijos uždaviniams spręsti. Kai jis yra skirtas regresijos uždaviniams spręsti, taikomas kitas pavadinimas SVR („Support vector regression“). SVR metodas naudojamas spręsti netiesines problemas, naudojant palyginti mažą modelio parametru skaičių. Dažnai SVR

modelis yra naudojamas „edge“ įrenginiuose dėl jo greitaveikos ir priimamų sprendimų patikimumo. Tai yra ypač svarbu kuriant išmaniąsias įrenginių stebėsenos sistemas, tokias kaip aprašomas jutiklis, kur panaudojant SVR modelį, kondensatoriaus užsikrovimo laiko pokyčiai yra pastebimi labai greitai.

Kiekviena ruošinio frezavimo iteracija vidutiniškai truko 10 min., per kurias buvo sugeneruota 2400 kondensatoriaus įkrovos lygio duomenų taškų ir 15 paviršiaus šiurkštumo verčių, naudojamų SVM modelyje, kurio išvestimi laikomos vidutinės paviršiaus šiurkštumo vertės. Šiam tikslui naudojant kondensatoriaus užsikrovimo matavimo rezultatus buvo suskaičiuotos septynios statistinės vertės, kurios pateiktos 1 lentelėje.

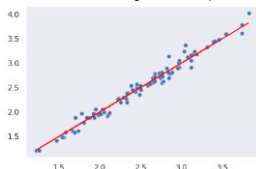
**1 lentelė.** Suskaičiuotos statistinės vertės, naudotos kaip SVR modelio įvesties duomenys

<b>Skaičiuota vertė</b>	<b>Paaškinimas</b>
<i>Avg</i>	Vidutinės kondensatoriaus užsikrovimo vertės
<i>Var</i>	Kondensatoriaus įkrovos lygio verčių kintamumas
<i>Sd</i>	Kondensatoriaus įkrovos lygio standartinis nuokrypis
<i>ACorr</i>	Kondensatoriaus įkrovos lygio verčių standartinis nuokrypis
<i>M<sub>4</sub>Avg</i>	4 duomenų taškų paprastieji slenkamieji įkrovos lygio verčių vidurkiai
<i>InterQ</i>	Tarpkvartilinė įkrovos lygio duomenų vertė
<i>Energy</i>	Absoliuti įkrovos lygio verčių energija

SVM modelio tinkamumas buvo įvertintas apskaičiuojant nustatymo koeficientą ir prognozavimo paklaidą. Naudojant gautus duomenis įvertintas  $R^2$  regresijos balas, kuris yra statistinis matas, rodantis, kiek duomenys yra arti pritaikytos regresijos tiesės, RBF-SVM modeliui kinta nuo 0,930 iki 0,975 priklausomai nuo naudojamų branduolių skaičiaus ( $1 \div 4$ ), kaip pateikta 24 pav.

$$R^2 = 0,97566775994$$

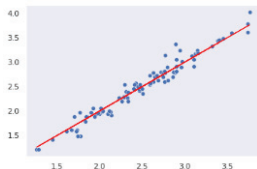
SVR(C=4, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='scale',  
branduoliys='rbf')



(a)

$$R^2 = 0,958919381860$$

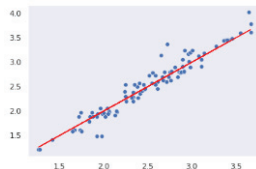
SVR(C=2, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='scale',  
branduoliys='rbf')



(b)

$$R^2 = 0,930381291742$$

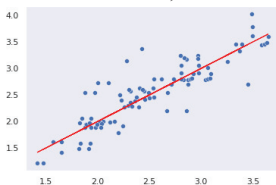
SVR(C=1, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='scale',  
branduoliys='rbf')



(c)

$$R^2 = 0,7786679105$$

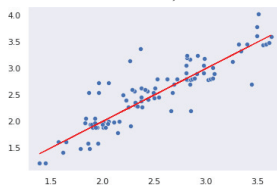
SVR(C=4, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='auto', branduoliys  
='linear')



(d)

$$R^2 = 0,77649652937$$

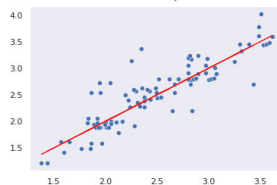
SVR(C=2, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='auto', branduoliys  
='linear')



(e)

$$R^2 = 0,774049232444$$

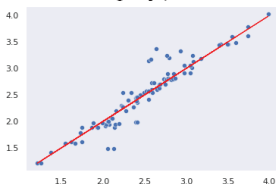
SVR(C=1, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='auto', branduoliys  
='linear')



(f)

$$R^2 = 0,911783959637$$

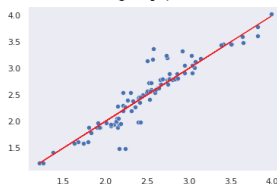
SVR(C=4, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='scale', branduoliys  
='poly')



(g)

$$R^2 = 0,874943830963$$

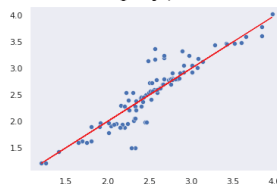
SVR(C=2, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='scale', branduoliys  
='poly')



(h)

$$R^2 = 0,838342249562$$

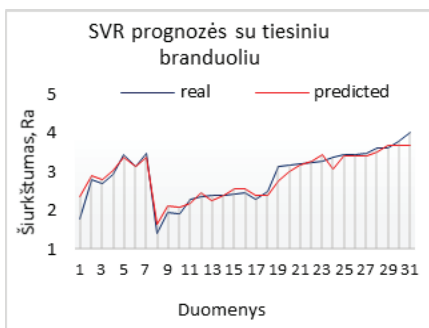
SVR(C=1, laipsnis=3,  
epsilon=0,05,  
gamma='scale', branduoliys  
='poly')



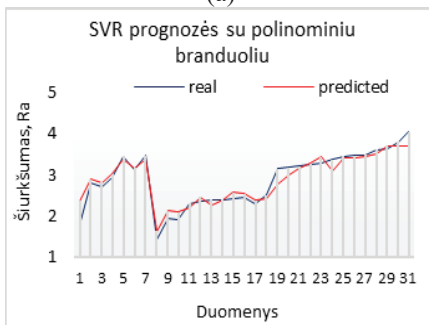
(i)

**24 pav.**  $R^2$  koeficiento vertės naudojant RBF-SVM modelį priklausomai nuo branduolių skaičiaus ir tipo. (a) – 4 rbf branduoliai, (b) – 2 rbf branduoliai, (c) – 1 rbf branduoliai, (d) – 4 tiesiniai branduoliai, (e) – 2 tiesiniai branduoliai, (f) – 1 tiesiniai branduoliai, (g) – 4 polinominiai branduoliai, (h) – 2 polinominiai branduoliai, (i) – 1 polinominiai branduoliai

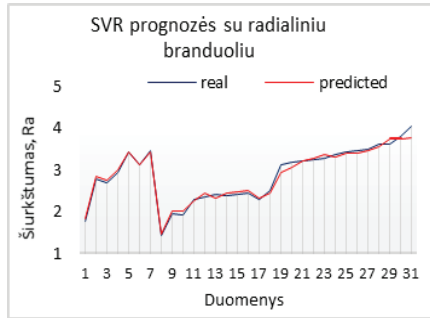
Čia apskaičiuojami trys laiko eilutės prognozavimo klaidų matai: vidutinė kvadratinė klaida (RMSE); vidutinis absoliutusias nuokrypis (MAD) ir vidutinė absoliuti procentinė paklaida (MAPE). Mūsų eksperimentuose apskaičiuojama MAPE, siekiant įvertinti SVM modelių prognozavimo tikslumą. Modelio testavimui naudojame duomenis (kondensatoriaus įkrovos lygio vertes laike) iš skirtingų 31 frezavimo operacijų. Vidutinė SVAP modelio prognozių su radialinės pagrindinės funkcijos branduoliu ir  $C = 4$  MAPE vertė yra lygi 2,420 %. Naudojant SVM su daugianariu branduoliu ir  $C = 4$ , gauta vidutinė MAPE vertė lygi 5,431 %, o didžiausia paklaida pastebėta naudojant tiesinį branduolį 8,608 %. Numatomos ir realios (faktinės) paviršiaus šiurkštumo vertės bandymo metu pateiktos 25 pav.



(a)



(b)



(c)

**25 pav.** SVM modelio su skirtingais branduoliais bandymo rezultatai: (a) – tiesinis, (b) – polinominis, (c) – radialinės pagrindo funkcija

Šiame eksperimentiniame tyrimo etape buvo naudojamas SVM regresijos metodas, siekiant išspręsti frezavimo nusidėvėjimo prognozavimo problemą, naudojant paviršiaus šiurkštumo matavimus kaip pagrindinį įrankio būklės rodiklį. SVR su radialinio pagrindo funkcijos branduoliu pateikia mažiausią prognozavimo paklaidą (2,420 % MAPE), lyginant su polinominio (5,431 % MAPE) ir tiesinio (8,608 % MAPE) branduoliais.

### Skyriaus išvados

- 1) Kūgio formos įrankio laikiklio vibracinio atsako tyrimas naudojant „Polytec PSV-500 3D“ lazerinį doplerio vibrometrą parodė, kad įpjovų įvedimas lemia du kartus didesnes išilginės formos virpesių amplitudes.
- 2) Frezavimo metu naudojant įrankio laikiklį su įpjovomis galima išgauti iki 3,4 karto daugiau energijos, nei naudojant įrankio laikiklį be įpjovų.
- 3) Naudojant SVM regresijos mašininio mokymosi metodą, galima numatyti frezavimo įrankio nusidėvėjimą vertinant kondensatoriaus krovimosi pokytį.

## BENDROSIOS IŠVADOS

1. Literatūros apžvalga atskleidė, kad norint įgyvendinti „Pramonė 4.0“ technologijas, reikalingi bevieliai, savaime įsikraunantys išmanūs jutikliai, įgalinantys vykdyti apdirbimo proceso stebėseną realiu laiku.

2. Sukurtas universalus įrenginio kompiuterinis modelis. Atlikto modeliavimo pasitelkus „Comsol Multiphysics“ programinės įrangos paketą rezultatai atskleidė, kad naudojant kūgio tipo įrankio laikiklį su įpjovomis galima suaktyvinti savųjų sukamųjų-išilginių virpesių modas, padidinančias virpesių amplitudes ašine kryptimi tuo pačiu intensyviau žadinančias pjezoelektrinį keitiklį ir didinančias generuojamos elektros energijos kiekį.

3. Pasiūlyta savaime užsimaitinančio įrenginio architektūra, leidžianti kaupti pjezoelektrinio keitiklio sugeneruotą įtampą kondensatoriuje bei perduoti informaciją apie kondensatoriaus užkrovimo lygį realiu laiku naudojant belaidės komunikacijos technologijas.

4. Atlikti energijos generavimo matavimai frezavimo metu parodė, kad siūloma jutiklio mazgo architektūra leidžia nustatyti įrankio nusidėvėjimo būklę, išreiškiamą kaip kondensatoriaus įkrovos pokytis, o taikant SVM mašininio mokymo algoritmą galima prognozuoti įrankio nudilimo laikotarpį.

Sukurtas universalus jutiklio mazgas buvo užpatentuotas Lietuvos Respublikos valstybiniame patentų biure.



## LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Shrouf, F., Ordieres, J., & Miragliotta, G. (2014). Smart factories in industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. In *2014 International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 9-12 December, Selangor, Malaysia*, (pp. 667-701). IEEE.
2. Heiner, L., Fettke, P., Kemper, H.G., Feld, T., & Hoffmann M. (2014). Industry 4.0. Information Systems and Engineering. *Business & Information Systems Engineering*, 6 (4), 239-424. doi: 10.1007/s12599-014-0334-4
3. Mahonraj, T., Shankar, S., Rajsekar, R., Sakthivel, N.R., & Pramanik, A. (2020). Tool condition monitoring techniques in milling process – a review. *Journal of Material Research and Technology*, 9 (1), 1032-1042. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.10.031
4. Zhang, X., Lu, X., Wang, S., Wang, W., & Li, W.D. (2018). A multi-sensor based online tool condition monitoring system for milling process. *Procedia CIRP*, 72, 1136-1141. doi: 10.1016/j.procir.2018.03.092
5. Rizal, M., Ghani, J.A., Nuawi, Z., & Haron, C.H.C. (2014). Research article a review of sensor system and application in milling process for tool condition monitoring. *Research Journal of Applied Sciences. Engineering and Technology*, 7 (10), 2083-2087. doi: 10.19026/rjaset.7.502
6. Altinas Y., & Aslan, D. (2017). Integration of virtual and on-line machining process control monitoring. *CIRP Annals*, 66 (1), 349-352. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.047
7. Zhu, K., & Zhang, Y. (2018). A cyber physical production system framework of smart CNC machining monitoring system. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23 (6), 2579-2586. doi: 10.1109/TMECH.2018.2834622
8. Yadav, S., & Yadav R.S. (2016). A review on energy efficient protocols in wireless sensor networks. *Wireless Networks*, 22, 335-350. doi: 10.1007/s11276-015-1025-x
9. Ostasevicius, V., Jurenas, V., Markevicius, V., Gaidys, R., Zilys, M., Cepenas, M., & Kizauskiene, L. (2016) Self-powering wireless devices for cloud manufacturing applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83, 1937-1950. doi: 10.1007/s00170-015-7617-x
10. Ostasevicius, V., Markevicius, V., Jurenas, V., Zilys, M., Cepenas, M., Kizauskiene, L., & Gyliene, V. (2015). Cutting tool vibration energy harvesting for wireless sensor applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 233, 310-318. doi: 10.1016/j.sna.2015.07.014
11. Ostasevicius, V., Jurenas, V., Augustinaitis, V., Gaidys, R., Cesnavicius, R., Kizauskiene, L., & Dundulis, R. (2017). Monitoring the condition of the cutting tool using self-powering wireless sensor technologies. *International*

*Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 2803-2817. doi:  
10.1007/s00170-016-8939-z

## AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

### „ISI Web of Science“ publikacijos su citavimo indeksu

1. Ostasevicius, Vytautas; **Karpavicius, Paulius**; Paulauskaite-Taraseviciene, Agne; Jurenas, Vytautas; Mystkowski, Arkadiusz; Cesnavicius, Ramunas; Kizauskiene, Laura. A machine learning approach for cutter wear monitoring by self-powering wireless sensor nodes // Sensors. Basel : MDPI. ISSN 1424-8220. 2021, vol. 21, iss. 9, art. no. 3137, p. 1-26. DOI: 10.3390/s21093137. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; DOAJ] [IF: 3,275; AIF: 3,581; IF/AIF: 0,914; Q1 (2019, InCites JCR SCIE)] [M.kr.: T 007, N009, T 009] [Indėlis: 0,142].
2. Ostasevicius, Vytautas; **Karpavicius, Paulius**; Jurenas, Vytautas; Cepenas, Mindaugas; Cesnavicius, Ramunas; Eidukynas, Darius. Development of universal wireless sensor node for tool condition monitoring in milling // International journal of advanced manufacturing technology. London : Springer. ISSN 0268-3768. eISSN 1433-3015. 2020, vol. 110, iss. 3-4, p. 1015-1025. DOI: 10.1007/s00170-020-05812-x. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus] [IF: 2,633; AIF: 3,749; IF/AIF: 0,702; Q2 (2019, InCites JCR SCIE)] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,166].
3. Ostaševičius, Vytautas; Jūrėnas, Vytautas; **Karpavičius, Paulius**; Baskutienė, Jolanta. Self-powered wireless sensor system application for cutting process control // Mechanika. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1207. eISSN 2029-6983. 2017, vol. 23, no. 3, p. 456-461. DOI: 10.5755/j01.mech.23.3.17957. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; Academic Search Complete] [IF: 0,529; AIF: 2,663; IF/AIF: 0,198; Q4 (2017, InCites JCR SCIE)] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,250].
4. Ostaševičius, Vytautas; **Karpavičius, Paulius**; Janušas, Giedrius; Balevičius, Gytautas. Design and implementation of uniform light guide based, force and deflection measurement device // Mechanika. Kaunas : KTU. ISSN 1392-1207. eISSN 2029-6983. 2016, vol. 22, no. 4, p. 279-284. DOI: 10.5755/j01.mech.22.4.15414. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; Academic Search Complete] [IF: 0,382; AIF: 2,419; IF/AIF: 0,157; Q4 (2016, InCites JCR SCIE)] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,250].

### IEEE duomenų bazė

5. Ostasevicius, Vytautas; Mystkowski, Arkadiusz; Karpavicius, Paulius; Jurenas, Vytautas. Investigation of piezoelectric transducer application for vibrational energy harvesting in milling operation // Mechatronic Systems

and Materials: IEEE proceedings of the 15th international conference – MSM 2020, Bialystok, Poland, 1-3 July, 2020, p. 30. [Indėlis: 0.250]

### Konferencijų pranešimų medžiagoje

1. Ostasevicius, Vytautas; Jurenas, Vytautas; **Karpavicius, Paulius**. Feasibility investigation and design of a piezoelectric self-powered sensor for monitoring the tool condition during milling // *Mechanika 2017: proceedings of the 22<sup>nd</sup> international scientific conference*, May 2017, Kaunas University of Technology, Lithuania. [Indėlis: 0.333]
2. Ostasevicius, Vytautas; Jurenas, Vytautas; Eidukynas, Darius; **Karpavicius, Paulius**. Reverse ultrasonic actuator for efficient machining // *Mechanika 2018: proceedings of the 23<sup>rd</sup> international scientific conference*, May 2018, Kaunas University of Technology, Lithuania. [Indėlis: 0.250]
3. **Karpavicius, Paulius**; Ostasevicius, Vytautas; Jurenas, Vytautas; Eidukynas, Darius; Cepenas, Mindaugas; Cesnavicius, Ramunas. Development of real time wireless milling tool condition monitoring system // 9-th Junior Scientist Conference, March 2019, The Lithuanian Academy of Sciences. [Indėlis: 0.200]
4. Ostasevicius, Vytautas; Jurenas, Vytautas; Eidukynas, Darius; **Karpavicius, Paulius**. Possibilities of milling process monitoring in cloud manufacturing applications // *Mechanika 2019: proceedings of the 24<sup>th</sup> international scientific conference*, May 2019, Kaunas University of Technology, Lithuania. [Indėlis: 0.250]
5. Ostasevicius, Vytautas; Mystkowski, Arkadiusz; **Karpavicius, Paulius**; Jurenas, Vytautas. Investigation of piezoelectric transducer application for vibrational energy harvesting in milling operation // *Mechatronic Systems and Materials: 15<sup>th</sup> international conference – MSM 2020*, Bialystok, Poland, 1-3 July, 2020. [Indėlis: 0.250]
6. Ostasevicius, Vytautas; Jurenas, Vytautas; **Karpavicius, Paulius**. Research and development of the universal wireless sensor for cutting tool condition monitoring // *Mechanika 2021: proceedings of the 25<sup>th</sup> international scientific conference*, May 2021, Kaunas University of Technology, Lithuania. [Indėlis: 0.333]

### Patentas

Ostasevicius V, Jurenas V, **Karpavicius P**, Bubulis A, Eidukynas D, Cesnavicius R, Cepenas M. Bevielis jutiklis besisukančių įrankių kokybei vertinti. Patentu pateikimo numeris LT2009:553.

### **Trumpai apie autorių**

Paulius Karpavičius gimė 1988 m. Marijampolėje, Lietuvoje.

2007–2011 – studijos Kauno technologijos universitete, Tarptautinių studijų centre; įgijo eksporto inžinerijos bakalauro laipsnį.

2012–2015 – studijos Kauno technologijos universitete, Mechanikos ir dizaino fakultete; įgijo mechatronikos magistro laipsnį.

2016–2020 – doktorantūros studijos Kauno technologijos universitete, Mechatronikos institute, mechanikos inžinerija (09T).

E. paštas: karpaviciuspaulius@gmail.com

UDK 621.9.02(043.3)

SL344. 2021-07-08, 2,25 leidyb. apsk. l. Tiražas 50 egz. Užsakymas 181.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas  
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

