



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Savaeigio javų kombaino šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Dovydas Rutkauskas**  
Projekto autorius

**Doc. dr. Darius Eidukynas**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Savaeigio javų kombaino šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

---

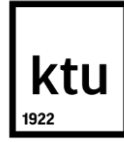
**Dovydas Rutkauskas**  
Projekto autorius

**Doc. dr. Darius Eidukynas**  
Vadovas

**Prof. dr. Vytautas Jurėnas**  
Recenzentas

---

**Kaunas, 2024**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Dovydas Rutkauskas

## **Savaeigio javų kombaino šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių tyrimas**

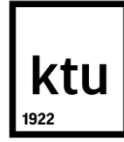
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Dovydas Rutkauskas

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**Kauno technologijos universitetas**

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## **Baigiamojo magistro projekto užduotis**

**Studentui** – Dovydas Rutkauskas

### **1. Projekto tema**

Savaeigio javų kombaino šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių tyrimas

*(Lietuvių kalba)*

Study of the Straw Chopper Frame Vibrations in Self-propelled Combine Harvester

*(Anglų kalba)*

### **2. Projekto tikslas ir uždaviniai**

Tikslas: Ištirti rėmui tenkančių virpesių pokytį, priklausantį nuo smulkintuvo peiliukų būklės ir pasiūlyti konstrukcijos modernizavimo sprendimą.

Uždaviniai:

1. Atlikti literatūros analizę apie javų kombainų smulkinimo peiliukus veikiančias apkrovas ir jų įtaką kombaino konstrukcijai.
2. Sudaryti virpesių pokyčio nuo smulkintuvo peiliukų būklės eksperimentinio tyrimo metodiką ir pagal ją atlikti eksperimentinį tyrimą.
3. Atlikti tyrimo metu gautų duomenų analizę.
4. Pagal gautus tyrimo duomenų analizės rezultatus sudaryti smulkintuvo virpesių diagnostinę sistemą.

### **3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos**

Tiriamasis objektas – savaeigio javų kombaino *Claas Lexion 560* šiaudų smulkintuvas. Tyrimui naudojami penki skirtingą valandų skaičių išdirbę peilių komplektai. Peiliai naudojami originalūs *Claas* dantytų ašmenų, pirkti oficialioje *Claas* atstovybėje Lietuvoje.

### **1. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams**

Netaikoma.

Rutkauskas, Dovydas. Savaeigio javų kombaino šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Doc. dr. Darius Eidukynas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Mechanikos inžinerija, Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Virpesiai, smulkintuvas, dilimas, smulkintuvo peiliai.

Kaunas, 2024. 50 p.

### **Santrauka**

Šiame magistro darbe atlikto tyrimo tema - "Savaeigio javų kombaino šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių tyrimas". Tyrimo tikslas yra ištirti tangentinio javų kombaino šiaudų smulkintuvo virpesius, kintant smulkinimo peilių būklei, siekiant nustatyti jų nudilimo įtaką smulkintuvo veikimui. Problema, dėl kurios darytas šis tyrimas yra susijusi su darbinėje žemės ūkio praktikoje pasitaikančiu virpesių sukeltu guolių subyrėjimu ir smulkintuvo rėmo lūžimu. Dėl šio gedimo patiriami ženklūs finansiniai nuostoliai, kurių galima išvengti įdiegus šiame darbe siūlomą diagnostinę sistemą. Sklandus ir nepertraukiamas žemės ūkio technikos veikimas sezono metu yra kiekvieno ūkininko ir žemės ūkio bendrovių siekiamybė, tam tikslui yra atliekami moksliniai tyrimai ir technika nuolatos yra tobulinama, jog būtų užtikrintas sklandus jos veikimas, nuo kurio priklauso žmonijos apsirūpinimas maistu.

Tyrimui atlikti naudojamos virpesių matavimo priemonės - akcelerometras ir osciloskopas su programine įranga. Smulkinimo peilių būklės kitimui vertinti buvo skaičiuojamas signalo RMS. Tyrimas atliktas dviem etapais: pirmame etape matavimai atliekami kintant kombaino techninei būklei, o antrame etape matavimai atliekami eliminuojant šį veiksni, po to gauti duomenys yra palyginami.

Tyrimo rezultatai parodė, kad po 360 darbo valandų dėl netolygaus peilių dilimo atsiranda masės disbalansas kuris sutampa su smulkintuvo sukimosi dažniu. Siekiant išvengti šios problemos, magistro darbe siūloma įdiegti virpesių monitoringo sistemą, kuri leistų stebėti kintančią techninę būklę ir signalizuotu kombaino operatoriui apie remonto planavimą. Ši siūloma sistema yra neardomosios diagnostikos tipo, todėl ji supaprastins šio javų kombaino mazgo techninės būklės diagnostiką ir techninio aptarnavimo planavimą

Šis tyrimas suteikia papildomas žinias apie smulkintuvo veikimą ir pateikia praktines rekomendacijas ūkininkams ir įmonėms, teikiančioms kūlimo arba kombainų nuomos paslaugas, nes ši sistema padės prognozuoti javų kombainų remonto darbų laiką, taip pat ši sistema naudinga javų kombainų gamintojams.

Rutkauskas, Dovydas. Study of the Straw Chopper Frame Vibrations in Self-propelled Combine Harvester. Master's Final Project / supervisor Assoc. Prof. Darius Eidukynas; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Mechanical Engineering, Engineering Sciences.

Key words: Vibration, chopper, abrasion, chopper blades.

Kaunas, 2024. 50 p.

### **Summary**

The topic of the research carried out in this Master's thesis is "Investigation of frame vibrations in a straw chopper frame of a self-propelled combine harvester". The aim of the study is to investigate the oscillations of the tangential straw chopper frame of a combine harvester with variations in the condition of the chopping blades, in order to determine the effect of wear on the performance of the chopper. The problem for which this study has been carried out relates to the vibration-induced bearing collapse and chipper frame breakage that occurs in working agricultural practice. This failure results in significant financial losses, which can be avoided by the implementation of the diagnostic system proposed in this work. The smooth and uninterrupted operation of agricultural machinery during the season is a goal of every farmer and agricultural company, and research and development are constantly being carried out to ensure the smooth operation of the machinery on which mankind's food supply depends.

The instruments used for the study are an accelerometer and an oscilloscope with software for measuring oscillations. The RMS of the signal was calculated to assess the variation in the condition of the chopping knives. The study was carried out in two phases: in the first phase, measurements were taken while the technical condition of the combine harvester was changing, and in the second phase, measurements were taken while this factor was being eliminated, and then the data obtained were compared.

The results of the study showed that after 360 hours of operation, the uneven wear of the blades results in a mass imbalance that coincides with the rotational frequency of the shredder. In order to avoid this problem, the MSc thesis proposes the introduction of an oscillation monitoring system to monitor the changing technical condition and to signal to the harvester operator the planning of repairs. This proposed system is of the non-destructive diagnostic type and will therefore simplify the diagnosis of the technical condition of this combine harvester unit and the planning of the servicing

This study provides additional knowledge on the performance of the crusher and practical recommendations for farmers and companies providing threshing or combine hire services, as this system will help to predict the time needed to repair the combine harvester, and is also useful for combine harvester manufacturers.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros analizė .....</b>	<b>12</b>
1.1. Virpesiai ir jų poveikis žemės ūkio technikai.....	12
1.1.1. Virpesių šaltiniai žemės ūkio technikoje .....	12
1.1.2. Matavimo prietaisai žemės ūkio technikoje .....	14
1.1.3. Duomenų surinkimas ir analizė .....	14
1.1.4. Technologinės priežiūros įtaka virpesiams .....	15
1.1.5. Standartų įtaka virpesių matavimams.....	15
1.1.6. Integruota virpesių valdymo sistema.....	16
1.2. Virpesių tyrimo metodai žemės ūkio technikoje .....	18
1.2.1. Eksperimentiniai metodai .....	18
1.2.2. Teoriniai metodai.....	18
1.3. Virpesių žala žemės ūkio technikai .....	19
1.4. Šiaudų smulkinimo poreikis .....	20
1.4.1. Šiaudų apdorojimo procesas ir jo svarba žemės ūkio sektoriuje.....	20
1.4.2. Ekologiniai ir ekonominiai aspektai: šiaudų smulkinimas ir jo įtaka žemės ūkio veiklai.....	21
1.5. Javų kombainų smulkinimo peiliukai.....	22
1.5.1. Veikimo principas .....	22
1.5.2. Efektyvumas ir reguliavimas .....	22
1.6. Atlikti javų kombainų šiaudų smulkintuvų tyrimai .....	23
1.6.1. Smulkintuvo guolių virpesių tyrimai.....	23
1.6.2. Javų kombaino smulkintuvo peilių nudilimo tyrimas .....	24
1.7. Apibendrinimas .....	25
<b>2. Tyrimo metodika ir tyrimo atlikimas.....</b>	<b>26</b>
2.1. Tyrimo tikslas ir hipotezė .....	26
2.2. Naudojama įranga ir priemonės.....	26
2.3. Tyrimo metodika .....	27
2.3.1. Pašalinių veiksnių eliminavimas .....	27
2.3.2. Numatomas tyrimo atlikimo laikas .....	27
2.3.3. Duomenų analizės metodai.....	28
2.4. Tyrimo vykdymo eiga .....	28
2.4.1. Tiriamasis objektas .....	28
2.4.2. Kombaino paruošimas tyrimui .....	29
2.4.3. Tyrimo priemonės .....	30
2.4.4. Virpesių matavimas .....	30
<b>3. Tyrimo rezultatai ir duomenų analizė.....</b>	<b>34</b>
3.1. Tyrimo rezultatų apibendrinimas .....	40
<b>4. Smulkintuvo virpesių monitoringo sistema .....</b>	<b>41</b>
4.1. Virpesių monitoringo sistemos naudojimo pagrindimas.....	41
4.2. Diagnostinės sistemos sandara .....	41
4.3. Sistemos fiksuojami dažniai ir veikimo principas.....	42
4.4. Monitoringo sistemos savikainos skaičiavimas.....	43
4.4.1. Tyrimui sunaudotų medžiagų ekonominės sąnaudos .....	43

4.4.2. Monitoringo sistemos kaina .....	43
4.4.3. Monitoringo sistemos ekonominė nauda.....	43
<b>Išvados .....</b>	<b>45</b>
<b>Literatūra .....</b>	<b>46</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>48</b>
1 priedas. Matlab kodas RMS konvertavimui į virpesių pagreitį: .....	48
2 priedas. Matlab kodas RMS reikšmių konvertavimui į virpesių pagreitį ir duomenų palyginimui atskiruose matavimuose: .....	49
3 priedas. Matlab kodas RMS reikšmių konvertavimui į virpesių pagreitį ir grafiko sudarymui: ....	50

## Lentelių sąrašas

<b>3.1 lentelė.</b> Virpesių signalo reikšmės $x$ $y$ $z$ ašimis .....	34
<b>3.2 lentelė.</b> Matavimų duomenys esant kintančiai techninei būklei .....	35
<b>3.3 lentelė.</b> Matavimų duomenys eliminavus kintančią kombaino techninę būklę .....	38

## Paveikslų sąrašas

<b>1.1 pav.</b> Tvarkingo vidaus degimo variklio virpesių spektras [3].....	13
<b>1.2 pav.</b> Sugedusio variklio virpesių spektras [3] .....	13
<b>1.3 pav.</b> Javų kombaino schema [30] .....	14
<b>1.4 pav.</b> Variklio defektas ir jo virpesių spektras.....	17
<b>1.5 pav.</b> Guolio virpesių spektras (a) ir trinties paviršiaus defektas (b) [10].....	17
<b>1.6 pav.</b> Kombainas su vikšrine važiuokle.....	20
<b>1.7 pav.</b> Smulkintuvo veikimo schema [31] .....	22
<b>1.8 pav.</b> Jutiklio jungimo taškai [2].....	23
<b>1.9 pav.</b> Duomenų palyginimas [2] .....	24
<b>2.1 pav.</b> Tyrimo įranga.....	26
<b>2.2 pav.</b> Savaeigis javų kombainas CLAAS Lexion 560 .....	28
<b>2.3 pav.</b> CLAAS Lexion šiaudų smulkintuvo vaizdas [32] .....	29
<b>2.4 pav.</b> Šiaudų skleistuvas .....	29
<b>2.5 pav.</b> Tyrimo schema.....	30
<b>2.6 pav.</b> Matavimo įrangos jungimas prie tiriamojo objekto .....	31
<b>2.7 pav.</b> Naujas smulkinimo peilis .....	31
<b>2.8 pav.</b> Smulkintuvo peilis išdirbęs 80 darbo valandų .....	32
<b>2.9 pav.</b> Smulkintuvo peilis išdirbęs 160 darbo valandų .....	32
<b>2.10 pav.</b> Smulkintuvo peilis išdirbęs 240 darbo valandų .....	33
<b>2.11 pav.</b> Smulkintuvo peilis išdirbęs 490 darbo valandų .....	33
<b>3.1 pav.</b> Virpesių amplitudės trimis skirtingomis ašimis palyginimo diagrama.....	34
<b>3.2 pav.</b> Virpesių signalo stiprumo kitimo grafikas .....	35
<b>3.3 pav.</b> Akselerometro signalas esant naujiems peiliams .....	36
<b>3.4 pav.</b> Akselerometro signalas matuojant 80 valandų dirbusio peilių komplekto virpesius.....	36
<b>3.5 pav.</b> Akselerometro signalas matuojant 160 valandų dirbusio peilių komplekto virpesius.....	37
<b>3.6 pav.</b> Akselerometro signalas matuojant 240 valandų dirbusio peilių komplekto virpesius.....	37
<b>3.7 pav.</b> Akselerometro signalas matuojant 490 valandų dirbusio peilių komplekto virpesius.....	38
<b>3.8 pav.</b> Virpesių pagreičio reikšmės priklausomybės nuo darbo valandų skaičiaus priklausomybės grafikas .....	39
<b>3.9 pav.</b> Maksimalaus virpesių piko reikšmės konvertuotos į virpesių pagreičio priklausomybės nuo darbo valandų grafikas.....	39
<b>3.10 pav.</b> Grafikų palyginimas .....	40
<b>4.1 pav.</b> Virpesių jutiklis [33] .....	41
<b>4.2 pav.</b> Monitoringo sistemos komponentai .....	42
<b>4.3 pav.</b> Jutiklių ir valdymo bloko montavimo schema .....	42

## Įvadas

Žemės ūkio sektorius yra vienas iš svarbiausių žmonijos kultūros aspektų, kuris ne tik užtikrina gyvybiškai svarbų maisto tiekimą, bet ir atlieka esminį vaidmenį ekonomikos plėtroje. Šiuolaikinio pasaulio kontekste, modernios žemės ūkio technologijos tampa kertine žemės ūkio veiklos dalimi. Pasitelkus šias technologijas siekiama maksimalaus produkcijos gamybos efektyvumo patiriant mažiausius kaštus. Šiuolaikinės žemės ūkio mašinos turi ne tik palengvinti žemės ūkio sektoriuje dirbančių žmonių darbą, bet ir turi vykdyti technologinius procesus taip, jog būtų tausojama aplinka, sunaudojama mažiau degalų bei žemės ūkyje naudojamų cheminių medžiagų, taip pat, į aplinką būtų išmetama kiek įmanoma mažiau šiltnamio efektą sukeliančių dujų. Vienos iš svarbiausių mašinų maisto gamybos grandinėje yra derliaus dorojimui skirtos mašinos, kurioms sugedus ir dėl to tinkamu laiku nenuėmus derliaus, gali būtų patiriami reikšmingi nuostoliai arba net sugadinamas ir prarandamas visas užaugintas derlius. Kad būtų išvengta tokių nepageidaujamų pasekmių, svarbu užtikrinti sklandų šių mašinų darbą ir ieškoti būdų kaip jį nuolatos tobulinti. Savaeigiai javų kombainai yra viena pagrindinių derliaus dorojimo mašinų žemės ūkyje, skirta nuimti ne tik javų, bet ir kitų augalų, subrandinančių sėklas (žolių, dvimečių daržovių), derlių.

Magistro darbas sutelktas į iki šiol nagrinėtą, tačiau nepakankamai tiriamą sritį – savaeigio javų kombaino šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių tyrimą. Tyrimo tikslas – įvertinti šių virpesių įtaką kombaino konstrukcijai, konkrečiai dėl šiaudų smulkintuvo peilių būklės. Toks tyrimas tampa itin svarbus siekiant didinti technologinį žemės ūkio procesų efektyvumą ir sumažinti technikos eksploatavimo trikdžius.

Magistro darbo tikslas yra ištirti rėmui tenkančių virpesių pokytį, priklausantį nuo smulkintuvo peiliukų būklės ir pasiūlyti konstrukcijos modernizavimo sprendimą. Šiam tikslui pasiekti yra keliami uždaviniai:

1. Atlikti literatūros analizę apie javų kombainų smulkinimo peiliukus veikiančias apkrovas ir jų įtaką kombaino konstrukcijai.
2. Sudaryti virpesių pokyčio nuo smulkintuvo peiliukų būklės eksperimentinio tyrimo metodiką ir pagal ją atlikti eksperimentinį tyrimą.
3. Atlikti tyrimo metu gautų duomenų analizę.
4. Pagal gautus tyrimo duomenų analizės rezultatus sudaryti smulkintuvo virpesių diagnostinę sistemą.

## **1. Literatūros analizė**

Ši literatūros analizė sutelkia dėmesį į svarbiausias temos dalis – savaeigio javų kombaino šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių dinamiką, nagrinėjant tai kaip esminį žemės ūkio technologijos plėtros aspektą. Tai sritis, kuri išskyla kaip iššūkis modernioms žemės ūkio inžinerijos koncepcijoms, kurios nuolat tobulėja, siekdamos geriau atitikti ekonominės ir ekologinės darnos principus.

Analizė pradedama apžvelgiant virpesių sampratą ir jų įtaką žemės ūkio technikai. Ši dalis sukuria pagrindą suprasti, kaip virpesiai turi įvairiapusę įtaką kombaino konstrukcijai, sukuriant galimybę kritiškai įvertinti šių veiksnių sąveiką. Be to, literatūros analizėje išnagrinėta šiaudų smulkinimo svarba, atskleidžiant šios derliaus doravimo operacijos reikšmę ne tik ekonominiu, bet ir aplinkosauginiu bei agrotechnologiniu aspektu. Taip pabrėžiamas šio darbo aktualumas ir svarba plėtoti šiaudų smulkintuvų technologinį progresą.

Išsami analizė padeda suvokti, kaip esminės koncepcijos ir teorijos yra susijusios su tyrinėjama tema. Kartu tai suteiks perspektyvą tolimesniems tyrimams ir leis nukreipti dėmesį į svarbiausias kryptis, siekiant pažangios žemės ūkio technikos plėtros. Literatūros analizės tikslas – atskleisti svarbiausius mokslinius ir praktinius aspektus, susijusius su šia tematika, ir nustatyti pagrindinius spragas bei kryptis tolimesniam tyrimui.

### **1.1. Virpesiai ir jų poveikis žemės ūkio technikai**

Virpesiai (vibracijos), terminas yra kilęs iš lotynų kalbos žodžio „vibro“, apibrėžiamas kaip kūno arba kūno dalies svyravimas aplink tam tikrą tašką arba ašį, prie kurios yra pritvirtintas kūnas. Šis fizikinis reiškinys dažnai įvyksta dėl sukeltos išorinės jėgos arba pradinio svyravimo, ir jos pasižymi periodiškumu, kurio metu kūnas kinta tarp dviejų ar daugiau priešingų krypčių arba aplink tam tikrą pusiausvyrą. Mechaniniai virpesiai gali būti aprašomi pagal jų amplitudę, dažnį, laiką ir kitas charakteristikas bei gali būti modeliuojami naudojant fizikos dėsnius ir matematinius metodus, tokius kaip tiesinė arba ne tiesinė diferencialinės lygtys [1].

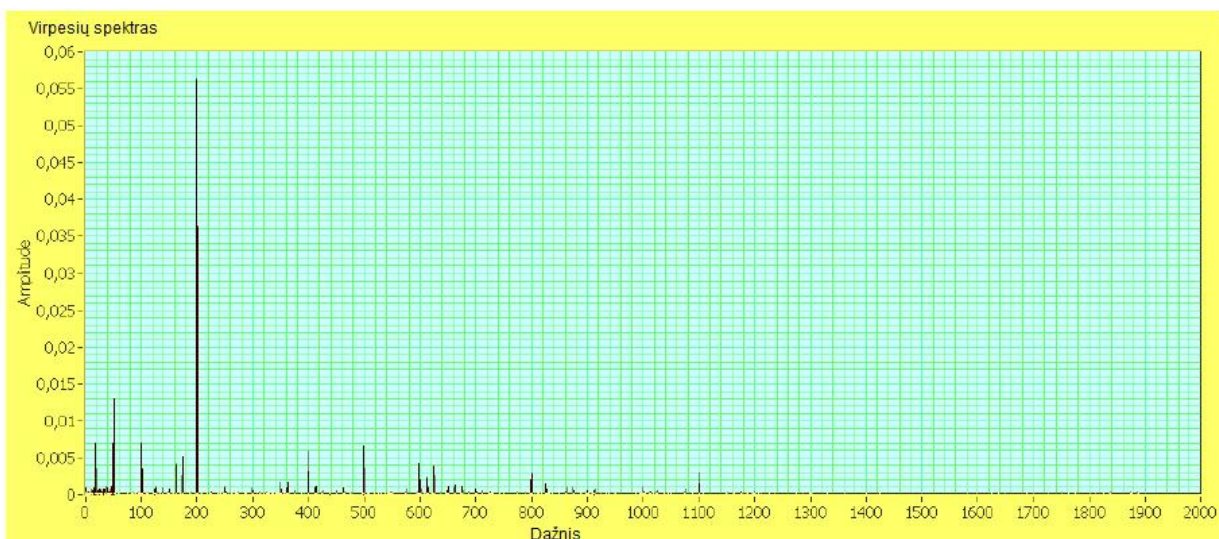
Virpesiai žemės ūkyje gali būti matuojami įvairiais būdais, priklausomai nuo siekiamo tyrimo tikslumo ir aplinkybių. Lietuvoje panašūs žemės ūkio technikos virpesių tyrimai yra atliekami Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos mašinų bandymo stotyje (mokomajame ūkyje) arba ūkininkų ūkiuose. Matuojant ūkiuose esančios technikos virpesius gaunami rezultatai geriau atspindi realią situaciją, negu tyrimai, atlikti laboratorijose [2]. Virpesių matavimas ir analizė žemės ūkio technikoje yra būtina siekiant suprasti, kaip šis fizikinis reiškinys veikia žemės ūkio mašinas ir įrangą, jog būtų galima diegti techninius patobulinimus. Virpesių pobūdis gali skirtis priklausomai nuo įvairių veiksnių, įskaitant dirvos tipą, naudojamą techniką ir darbo sąlygas.

#### **1.1.1. Virpesių šaltiniai žemės ūkio technikoje**

Virpesiai žemės ūkio technikoje atsiranda iš įvairių šaltinių. Virpesius žemės ūkio mašinose sukelia vidaus degimo variklis, pavarų dėžė, galios tiekimo velenas, hidraulikos komponentai, o sudėtingesnėse derliaus doravimo mašinose virpesius sukelia kiti judantys mechanizmai. Vidaus degimo variklio sukeltus virpesius nagrinėjo [3]. Tyrime pateikiami tvarkingo (žr. 1.1 pav.) ir sugedusio (žr. 1.2 pav.) variklių virpesių spektro diagramos. Mokslininkai teigia, jog sukaupus duomenų bazę apie atskirų detalių virpesius, iš bendro variklio virpesių spektro galima diagnozuoti, kuri detalė yra sugedusi.



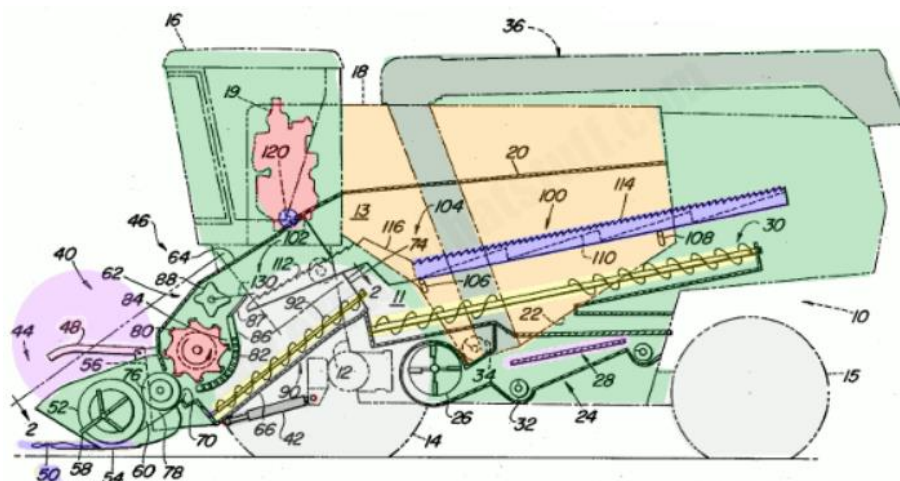
**1.1 pav.** Tvarkingo vidaus degimo variklio virpesių spektras [3]



**1.2 pav.** Sugedusio variklio virpesių spektras [3]

Vidaus degimo variklio virpesių signalai yra ypač sudėtingi, nes variklyje yra daug virpesių šaltinių, taip pat sukimosi dažnis yra nepastovus, todėl atliekant šį tyrimą svarbu eliminuoti veiksnius, kurie gali paveikti rezultatų tikslumą. Šiuo atveju mokslininkai atliko vadinamą „šaltąjį“ vidaus degimo variklio tyrimą, kurio metu vidaus degimo variklį suko elektros variklis, kurio sukimosi dažnis yra pastovus.

Javų kombainuose papildomus virpesius sukelia visi judantys pjaunamosios, kūlimo ir separavimo aparato mazgai, kurių vidutiniškai yra apie 150, priklausomai nuo javų kombaino konstrukcijos jų gali būti ir daugiau (žr. 1.3 pav.).



**1.3 pav.** Javų kombaino schema. Pagrindiniai mazgai: kūlimo būgnas 84, variklis 19, klavišai 100. [30]

Judančių kombaino mazgų sukeliama virpesiai yra gamintojo numatyti ir technikai nekenkia, kol šie mazgai veikia tvarkingai. Pagrindinė javų kombaino detalė, kuri sugeria važiuoklės, javų pjaunamosios ir kitų mazgų virpesius yra kombaino rėmas, nuo kurio priklauso mašinos patikimumas ir operatoriaus komfortas [5]. Besisukantys javų kombainų mazgai turi riedėjimo guolius, kurių defektai yra nustatinėjami vibracinės analizės būdu [6].

Javų kombaino kūlimo būgno tyrimas buvo atliktas 2018 metais, mokslininkas, tyręs javų kombaino kūlimo būgno virpesius, aprašė reiškinį, susijusį su būgno apkrovimu. Jo eksperimentiniai tyrimai parodė, kad apkrauto kūlimo būgno virpesių amplitudės padidėja 22–25 kartus lyginant su neapkrautu kūlimo būgno. Ši išvada yra reikšminga siekiant paaiškinti, kaip apkrova veikia kuliamojo aparato virpesius ir jo veikimo efektyvumą, bei kaip apkrova gali iškreipti tiriamuosius virpesių signalus [6].

### 1.1.2. Matavimo prietaisai žemės ūkio technikoje

Matuojant virpesius žemės ūkio technikoje, naudojama tokia įranga kaip akselerometrai ir inerciniai jutikliai kartu su programine įranga. Šie prietaisai gali būti sumontuoti prie technikos skirtinguose taškuose arba tiesiogiai integruoti į jos konstrukciją, taip kaip 2022 metais padarė Eugenio Brusa, sukonstravęs išmanųjį riedėjimo guolį su integruota virpesių monitoringo sistema [7]. Šioje guolio virpesių monitoringo sistemos konstrukcijoje energijos konversiją atlieka nuolatinio magneto nekontaktinis atplėšimas nuo lanksčios konstrukcijos antgalio masės, kurios paviršius padengtas pjezoelektriniais sluoksniais. Šios sistemos dinaminis sužadinimas veikia vibruojančią konstrukciją, nuolatinio magnetu pritvirtintą prie fiksuoto žiedo. Kitas būdas matuoti virpesius žemės ūkio technikoje yra naudoti specializuotą virpesių analizatorių „Adash A4900 Vibrio M“, kurio jutiklis yra akselerometras su magnetiniu pagrindu. Tokių analizatorių naudojo smulkintuvo guolių ir kūlimo aparatų virpesių tyrimuose. Vidaus degimo variklio virpesiams tirti naudojami „DLI 3-axes“ virpesių jutikliai ir „B&K type 4958“ precizinis mikrofonas. Šių jutiklių kombinavimas padeda iširti mechaninius ir akustinius virpesius. Toks matavimo prietaisų naudojimas leidžia tiksliai nustatyti intensyvumą, kuris gali skirtis priklausomai nuo technikos tipo ir veikimo sąlygų.

### 1.1.3. Duomenų surinkimas ir analizė

Surinkti duomenys iš matavimo prietaisų yra analizuojami kompiuterinėje aplinkoje, naudojant įvairias technologijas, tokias kaip spektro analizė ar dažnių analizė. Virpesių spektras vaizduojamas

1.1 pav. ir 1.2 pav., kur vaizduojami vidaus degimo variklio virpesių tyrimo rezultatai. Pagal virpesių spektrą mokslininkas padarė išvadą, apie vidaus degimo variklio mazgų gedimus, kurie detaliau aprašomi straipsnyje. Dažnių analizė atliekama E. Jotautienės ir kitų mokslininkų tyrime, kuriame buvo nagrinėjami javų kombaino smulkintuvo guolių defektų dažniai. Šiame tyrime nustatytas guolio defekto dažnis, ir prieita išvados dėl guolio tinkamumo tolimesniam naudojimui. Kituose apžvelgtuose tyrimuose vyrauja šie du duomenų analizės metodai. Ši duomenų analizė leidžia išskirti svarbiausius virpesių parametrus ir identifikuoti, kaip skirtingi veiksniai ar sąlygos gali keisti virpesių pobūdį ir intensyvumą. Standartų ir rekomendacijų laikymasis užtikrina matavimų tikslumą bei palyginamumą, suteikiant aiškų pagrindą tolimesniems tyrimams ir techniniam tobulinimui.

#### **1.1.4. Technologinės priežiūros įtaka virpesiams**

Svarbu atkreipti dėmesį, kad virpesių intensyvumas ir pobūdis gali kisti priklausomai nuo techninės priežiūros ir įrangos būklės. Nuolatinis techninės priežiūros nebuvimas ar neatitikimas gamintojo rekomendacijų gali lemti įrangos ar mašinos nesubalansavimą, trinties jėgų padidėjimą ir, dėl to pasireiškiantį didesnę nei numatytas virpesių intensyvumą. Atvirkščiai, reguliariai atliekamos techninės priežiūros procedūros gali sumažinti dėl dilimo atsiradusius virpesius ir optimizuoti įrangos veikimą [8]. Siekiant supaprastinti žemės ūkio technikos techninės priežiūros procedūras gamintojai matomose vietose įrengia tepimo taškus ir įspėjamuosius ženklus su nurodytu tepimo laiko intervalu. Vis dažniau į sudėtingas sistemas pradedama montuoti automatinė centrinio tepimo sistema. Tačiau tepimas išsprendžia ne visas problemas, susijusias su dilimu. Javų kombainuose yra tokios dylančios detalės kaip pjovimo arba smulkinimo peiliai, kurių nudilimą prognozuoti sunku dėl dinaminių darbo sąlygų. Pjaunant arba smulkinant tinkamo drėgnumo šiaudus [5], peiliai dyla lėčiau, tačiau dažnai praktikoje pasitaiko, jog šiaudai pjaunami ar smulkinami drėgnesni, taip pat peilių darbinėje terpėje papuola abrazyvinių dalelių ar net akmenų, dėl to peiliai praranda savo funkcionalumą žymiai greičiau ir neprognozuojamai, todėl gamintojai nenurodo intervalų kada reikia keisti peilius, o tai paliekama spręsti inžinieriams arba patiems operatoriams. Atšipę peiliai didina pjovimo jėgos pasipriešinimą kombaino pjaunamojoje, dėl to būna perkraunamas dalgio pavaros reduktorius ir didėja virpesiai, perduodami į pjaunamosios rėmą ties reduktoriumi. Praktikoje nagrinėjant smulkintuvo peilius matoma tendencija, jog atšipę ar kitaip nudilę peiliai praranda dalį savo masės, todėl ant besisukančio smulkintuvo rotorius atsiranda disbalansas, kuris sukuria nepageidaujamus virpesius.

#### **1.1.5. Standartų įtaka virpesių matavimams**

ISO standartai turi didelę įtaką virpesių matavimams žemės ūkyje, nes jie nustato tarptautines gaires ir reikalavimus, kurie užtikrina matavimų tikslumą, patikimumą ir palyginamumą, taip pat nurodo matavimų prietaisų kalibravimus. Žemės ūkio mašinų, įskaitant traktorius, kombainus ir kitus įrenginius, naudojimo metu gali kilti virpesių, kurie turi įvairių pasekmių, tokių kaip: dirvos struktūros pažeidimai, nuimamo derliaus pažeidimai, žemės ūkio mašinų konstrukcijos pažeidimai, žala operatoriaus sveikatai.

Vienas iš svarbiausių ISO standartų šioje srityje yra ISO 2631, kuris apibrėžia bendruosius virpesių matavimo metodus ir nustato ribinius vertinimo kriterijus, susijusius su žmonių sąveika su virpesiais. Šis standartas svarbus ne tik pramonės, bet ir žemės ūkio sektoriuje, nes žemės ūkio mašinų operatoriai dažnai dirba ilgas darbo valandas, vidutiniškai po 15 darbo valandų sezono metu ir tą laiką

praleidžia kombainuose, traktoriuose ar kitose mašinos, kurios generuoja virpesius, darančius poveikį operatoriui [9].

ISO 5008 yra dar vienas svarbus standartas, skirtas nustatyti traktorių virpesių lygį ir jų poveikį operatoriui [10]. Šis standartas padeda įvertinti traktoriaus virpesių lygį pagal kelis kriterijus, įskaitant virpesių pagreitį, kurio poveikis gali būti vertinamas pagal ISO 2631.

Be to, ISO standartai apima ir kitus aspektus, tokius kaip virpesių mažinimo metodai, technologijų įdiegimą, kurios sumažintų virpesių lygį žemės ūkio mašinos. ISO 2631-1 nustato gaires ir reikalavimus, kaip vertinti virpesių poveikį žmonėms, esant įvairioms sąlygoms ir aplinkybėms. Tai apima ne tik vertinimo metodus, bet ir rekomendacijas dėl virpesių mažinimo. Šis standartas nagrinėja daugelį aspektų, susijusių su virpesių poveikiu, ir siūlo priemones jį sumažinti:

- mašinų konstrukcijos pokyčiai: standartas rekomenduoja tam tikrus konstrukcinius pokyčius, kurie sumažina virpesių lygį mašinoje ar įrenginyje, apima specialių amortizatorių arba virpesius slopinančių sistemų įdiegimą;
- inžinerinės kontrolės priemonės: tai gali būti technologijų arba procesų pakeitimai, kurie sumažina virpesių generavimą ar jų poveikį operatoriui;
- izoliacinės ir virpesių slopinimo priemonės: apima izoliacinių sistemų įdiegimą, kurios sumažina virpesių perdavimą iš mašinos į žmogų arba virpesių slopinimo priemones, kurios mažina virpesių lygį tam tikrose mašinos ar įrenginio dalyse.

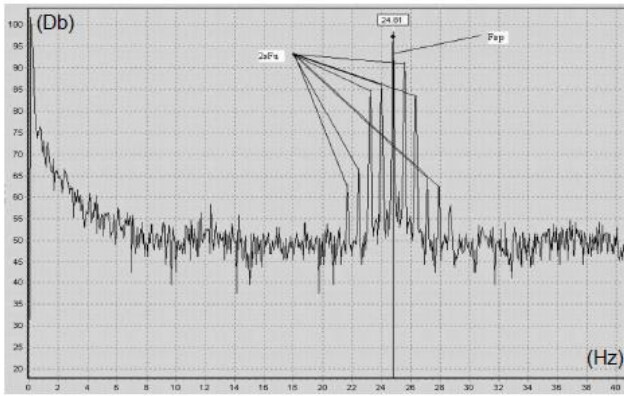
Taigi, ISO standartai yra esminiai žemės ūkio sektoriuje, nes jie užtikrina, kad virpesiai būtų vertinami ir valdomi taip, kad būtų sumažintas neigiamas jų poveikis darbuotojams ir žemės ūkiui apskritai.

#### **1.1.6. Integruota virpesių valdymo sistema**

Visų apžvelgtų mokslinių straipsnių vienas iš vienijančių tikslų yra kurti integruotas virpesių valdymo sistemas žemės ūkio technikai. Šios sistemos, naudodamos išsamią jutiklių informaciją ir duomenų analizę, galėtų automatiškai reguliuoti įrangos veikimą, siekiant minimalizuoti virpesių poveikį. Tai galėtų ne tik pagerinti technikos efektyvumą, bet ir užtikrintų sklandų jos veikimą sezono metu, taip pat šie duomenys padėtų techniką prižiūrinčiam personalui spręsti apie tam tikrų mazgų būklę.

Kol kas žemės ūkio technikoje tokios sistemos nėra taikomos, tačiau didžiausiose metalurgijos pramonės gamyklose jau yra diegiamos tokios sistemos [11]. Sistema susideda iš įrangoje integruotų jutiklių, kurie perduoda duomenis į centrinį kompiuterį, kuriame yra stebimi diagnostiniai parametrai, ir panaudojant vibracinės diagnostikos metodus yra nustatinėjami įrangos defektai. Pasiekus nurodytas ribas, įranga yra stabdoma ir apžiūrima.

Atliekant rotorinio elektros variklio („DAZO4-560- 4“ 1000 kW, 1500 aps/min, 10 kV) vibracinę diagnostiką nustatytas elektromagnetinio pobūdžio defektas, nors elektros variklio guolių virpesiai lygis neviršijo 3 mm/s. Virpesių spektras (žr. 1.4 pav., a) aiškiai rodo, kad šoniniai komponentai  $\pm 2ksf$  į abi puses nuo sukimosi dažnio. Išmontavus ir išardžius elektros variklį, rasti 5 įtrūkimai rotoriaus paviršiuje (žr. 1.4 pav., b). Laiku nustačius defektą, buvo išvengta didesnio įrangos sugadinimo, dėl kurio galėjo įvykti gamybos linijos prastova.

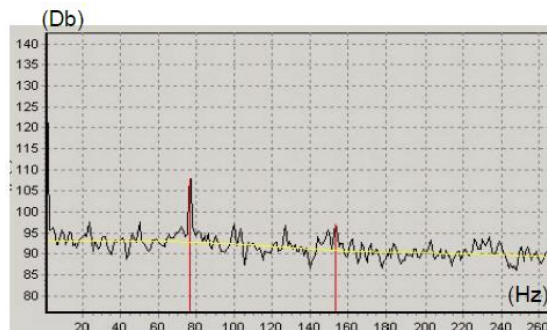


a)

b)

**1.4 pav.** Variklio defektas ir jo virpesių spektras. 50 Hz 1600 linijų tiesioginis spektras (a) ir rotoriaus strypų įtrūkimai (b) elektros variklyje DAZO4-560-4 1000 kW [10]

Kitas straipsnyje aprašytas įprastinis gedimas rotorinėje įrangoje susijęs su riedėjimo ir slydimo guolių defektais. Diagnostika apima virpesių spektro analizę, naudojant juostinį filtrą aukšto dažnio srityje. Tai padeda anksti aptikti guolio defektą, prognozuoti likusį įrangos naudojimo laiką ir ateityje išvengti avarinių situacijų. Virpesių diagnostika buvo atlikta elektros varikliui AO225S4 37 kW, 1500 aps/min, 600 V (ASI „Robicon“) įpusėjus numatyta laiką iki kito kapitalinio remonto, kuris atliekamas variklių bandymo stotyje. Nustatytas virpesių spektras pateiktas 1.5 paveiksle. Lyginant su įprastais virpesių spektrais, buvo nustatytas trinties paviršiaus defektas. Išmontavus elektros variklį, buvo aptiktas guolio išorinio žiedo darbinio paviršiaus defektas (žr. 1.5 pav., b).



a)



b)

**1.5 pav.** Guolio virpesių spektras (a) ir trinties paviršiaus defektas (b) [10]

Ši sistema yra perspektyvi tobulinant ir atliekant matavimus žemės ūkio technikoje, siekiant optimalaus veikimo ir minimalaus poveikio žemės ūkio gamybai. Integravus tokio tipo sistemą į žemės ūkio mašinas, galima tobulinti jau esamas diagnostines įrangas.

## **1.2. Virpesių tyrimo metodai žemės ūkio technikoje**

### **1.2.1. Eksperimentiniai metodai**

Jutikliai ir matavimo įranga:

Eksperimentiniams metodams yra naudojami jutikliai ir speciali matavimo įranga skirta tiesioginiam virpesių matavimui. Jutikliai tvirtinami prie įrenginio arba operatoriaus kūno, kad būtų tiesiogiai matuojami virpesių parametrai, tokie kaip amplitudė, dažnis ir kryptis. Šiuo metu didžiausias dėmesys skiriamas operatorių veikiančių virpesių tyrimui, nes virpesiai ilgainiui iššaukia vibracinę ligą. Matavimo įrangoje vyrauja laidinės sistemos, tačiau jos yra nepatogios montuoti, dėl šios priežasties virpesių matavimas nėra plačiai paplitęs žemės ūkyje. Šiuo metu kuriamos ir pritaikomos belaidės virpesių matavimo sistemos, kurios sąveikauja „Wi fi“ ryšiu [12]. Tokios sistemos, kaip teigia jų autoriai, yra ekonomiškos ir ergonomiškos, todėl tikslinga jas naudoti tiriant operatorių veikiančius virpesius, ir technikos mazgų virpesius atliekant jų diagnostiką.

Inžineriniai eksperimentai:

Tai apima eksperimentinius tyrimus, kurie yra atliekami su realiomis žemės ūkio mašinomis, tokiomis kaip kombainai, traktoriai, savaeigiai pašarų smulkintuvai ar kita žemės ūkio technika veikiant įvairiomis sąlygomis. Tokių eksperimentų metu stebima technikos elgsena ir jos sukeliama virpesiai.

### **1.2.2. Teoriniai metodai**

Matematiniai modeliai:

Teoriniai metodai gali būti grindžiami matematine modeliavimo technika, kurioje sudaromos diferencialinės lygtys, atspindinčios žemės ūkio technikos ir su ja susijusių virpesių sąveiką. Tokių modelių sudarymas leidžia prognozuoti virpesių poveikį ir jų sąlytį su operatoriumi arba technika [13]. Praktikoje dažnai naudojami matematiniai modeliai [14]:

Vienmatis virpesių modelis: Paprasčiausias modelis, kuriam galioja vienmatės virpesių lygtis. Tai pagrindinis modelis, naudojamas tiriant virpesius vienpriešingosios masės ir spyruoklės sistemoje arba vienmatis svyravimas taškiniame kūne.

Dvimatis virpesių modelis: Plačiau naudojamas modelis, kuriame virpesiai apibūdinami dvimate virpesių lygtimi. Tai leidžia aprašyti virpesius sudėtingesnėse sistemose, kuriose objektai gali judėti ne tik tiesiai, bet ir horizontaliai ar vertikaliai.

Daugiakampių kūnų modeliai: Šie modeliai leidžia aprašyti virpesius kūnuose, kuriuose yra daugiau nei vienas laisvės laipsnis. Tai galėtų būti naudinga, pavyzdžiui, modeliuojant sudėtingas mašinas arba mechaninius įrenginius, kuriuose yra daugiau nei vienas laisvės laipsnis.

Baigtinių elementų metodas: Šis metodas naudojamas, kai reikia modeliuoti sudėtingas struktūras su daugybe sąveikaujančių dalių. Baigtinių elementų metodas leidžia modeliuoti objektus juos

suskaidant į tinklę su mazgais (baigtiniais elementais), kurie sąveikauja vienas su kitu ir kurie gali būti taikomi tiek statiniams, tiek dinaminiam analizės uždaviniams, įskaitant virpesių analizę.

Kompiuterinė simuliacija:

Šiuolaikinės kompiuterinės simuliacijos gali būti naudojamos modeliuoti virpesių elgseną. Tai apima skaitines simuliacijas, tokias kaip baigtinių elementų analizę (BEA), kurios leidžia tiriantiems modeliuoti virpesių plitimą ir sąveiką su žemės ūkio technika, naudojant skirtingas sąlygas ir parametrus. Dažnai naudojamos programos yra Matlab, SolidWorks, ANSYS [15].

Šie metodai yra svarbūs žemės ūkio technikos virpesių tyrimams, leidžiantys įvertinti jų įtaką operatoriui, technikos ilgaamžiškumui ir bendram technikos veikimo efektyvumui. Eksperimentiniai metodai teikia tiesioginę informaciją apie realią virpesių elgseną, o teoriniai metodai leidžia prognozuoti ir modeliuoti šią elgseną.

### **1.3. Virpesių žala žemės ūkio technikai**

Virpesiai žemės ūkio technikai yra žalingi dėl įvairių priežasčių. Virpesiai gali sukelti nepataisomas deformacijas įrangos konstrukcijoje ir jos dalyse, padidinti trintį, bei sumažinti ilgaamžiškumą. Atliktame moksliniame tyrime rašoma, jog 80 % konstrukcinių gedimų įvyksta dėl konstrukcijos nuovargio, 75 % mechaninių gedimų priežastis yra nepageidaujami virpesiai [13]. Ypač svarbu išskirti, kad skirtingi virpesių šaltiniai, tokie kaip traktoriaus judėjimas su padargu dirvos paviršiumi arba agregavimas su rotacine mašina, gali turėti specifinį poveikį skirtingoms žemės ūkio technikos dalims.

Giliau nagrinėjant javų kombainus pabrėžiamas jų pažeidžiamumas nuo virpesių sukeliamų reiškinių. Kombainų pjaunamosios ir kūlimo – separavimo sistemos turi tokius mazgus kaip dalgis, sietai, kratomoji lenta, kratikliai, kurie juda ne tik sukamuoju, bet švytuojamuoju judesiu, kuris sukuria stiprius virpesius ir juos perduoda kombaino rėmui, taip papildomai jį apkraunant. Kombaino virpesiai taip pat kenkia operatoriui, greitina jo nuovargį [16]. Kombainų vikšrinė važiuoklė (žr. 1.6 pav.) rėmui perduoda stipresnius virpesius lyginant su ratine važiuokle [17]. 2021 metais publikuotame straipsnyje rašoma, jog darbui šlaituose naudojami kombainai su vikšrine važiuokle kuri pagerina pravažumą, tačiau dėl mašinos per didelio virpesių lygio ir paviršiaus nelygumo kombainas gali apvirtti ir taip būti nepataisomai sugadinamas, taip pat apvirtimas yra pagrindinė operatorių mirties priežastis žemės ūkyje.

Vienas iš labiausiai pažeidžiamų javų kombaino mazgų yra šiaudų smulkintuvas. Per dideli virpesiai gali sukelti ne tik mechaninių dalių deformacijas, bet ir sugadinti smulkinimo sistemą, sumažindamos smulkinimo efektyvumą arba visiškai sugadinus smulkintuvą sustabdyti darbą. Tyrime, kuriame tiriami smulkintuvų guolių virpesiai rašoma, jog darbo metu sugedus guoliams patiriami ženklūs nuostoliai dėl prastovų [2]. Dėl derliaus dorojimo mašinų darbo priklausomumo nuo metų laiko ir oro sąlygų svarbu užtikrinti nepertraukiamą šių mašinų darbą, aptikti būsimus gedimus ir skubiai juos pašalinti, jog būtų išvengiama nuostolių dėl nenuimto derliaus. Per dideli virpesiai kenkia ne tik pačiai mašinai, bet ir mechaniškai pažeidžia nuimtą derlių.



**1.6 pav.** Kombainas su vikšrine važiuokle

Toliau nagrinėjant javų kombainų smulkintuvus pastebima, jog virpesiai gali turėti neigiamą poveikį smulkinimo peiliukų efektyvumui. Mechaninė įtampa, kurią sukelia virpesiai, gali sukelti peiliukų nelygumus, dėl kurių smulkintuvas gali prarasti darbingumą ir nebegalėti tolygiai vienodai susmulkinti šiaudus. Javų kombainų konstrukcijos dalys, ypač smulkinimo sistemos guoliai, gali būti pažeidžiami nuo smulkintuvo rotoriaus virpesių. Ilgalaikis eksploatavimas esant per dideliems virpesiams gali sukelti nuolatinį mechaninį nuovargį ir galiausiai lemti konstrukcijos deformacijas ar netgi guolių sugadinimą. Šie pažeidimai ne tik mažina žemės ūkio technikos ilgaamžiškumą, bet ir didina remonto išlaidas [2].

#### **1.4. Šiaudų smulkinimo poreikis**

##### **1.4.1. Šiaudų apdorojimo procesas ir jo svarba žemės ūkio sektoriuje**

Per javų nuėmimo procesą susidaro didelis kiekis augalinių liekanų, vadinamų šiaudais, kurie gali sudaryti iki 6 tonų per hektarą, kas yra apie 50 proc. nuo bendros javų masės [18]. Šie šiaudai gali būti perdirbami ir panaudojami kaip gyvūnų kraikas, kompostas, biodujos ir kt. Tinkamai susmulkintos ir tolygiai paskleistos liekanos yra svarbus organinės trąšos šaltinis, turintis azoto, fosforo ir kalio elementų, taip pat iš šiaudų dirvoje susidaro humusas. Dėl šios priežasties dauguma ūkininkų šiaudus smulkina ir išsklaido laukuose, o po to įterpia į dirvą, siekdami didinti humuso kiekį dirvoje. Javų kombainas, kaip universalus įrenginys, ne tik nupjauna javus ir atskiria grūdus nuo šiaudų, bet ir susmulkiną šiaudus bei išsklaido juos ant dirvos paviršiaus. Tai yra svarbus būdas apdoroti augalines liekanas ir pagerinti organinių trąšų kiekį dirvoje [19]. Dėl netinkamo šiaudų perdirbimo, arba kasmetinio išvežimo iš laukų dirvoje mažėja humuso kiekis, ir dirvožemis tampa nederlingas, nualintas.

Taip pat tinkamas šiaudų susmulkinimas ir paskleidimas tampa vis svarbesnis dėl populiarėjančios tiesioginės sėjos technologijos. Ši sėjos technologija yra naudojama tose šalyse, kur trūksta drėgmės (Australija, Kanada, JAV), taip pat tiesioginei sėjai sunaudojama mažiau energetinių resursų (nereikia arti ar kitaip įdirbti dirvos), sumažinama dirvos CO<sub>2</sub> emisija, todėl Europos Sąjunga remia ir skatina ūkininkus pereiti prie tiesioginės sėjos. Dirbant su šia technologija yra neapverčiamas dirvos paviršius ir neįterpiami šiaudai, todėl būtina, jog visi šiaudai būtų susmulkinti kokybiškai, ir paskleisti tolygiai dirvos paviršiuje, jog sėjamoji nesikimštų ir būtų galima vykdyti sėjos darbus.

Augalinių liekanų pjaustymas žemės ūkio srityje yra sudėtingesnis procesas už daugelio inžinerinių medžiagų, tokių kaip mechaninėse konstrukcijose naudojami aliuminis, plienas ar varis [20]. Taip yra dėl to, kad augalai yra heterogeninės ir anizotropinės medžiagos, o inžinerinės medžiagos dažnai yra homogeninės ir izotropinės. Tai reiškia, kad augalų struktūra ir savybės skiriasi priklausomai nuo krypties, ir šios medžiagos yra nevienalytės. Šiaudų pjaustymo procesas yra sudėtingesnis dėl įvairių augalo dalių, pvz. lapų, stiebų ir įvairių piktžolių priemaišų, kurios gali turėti skirtingas mechanines savybes ir reikalauti skirtingų pjaustymo metodų. Be to, augalų struktūra gali keistis priklausomai nuo esamos augalo augimo stadijos.

Palyginti su inžinerinėmis medžiagomis, kurios yra vienalytės, augalai turi sudėtingesnę struktūrą, dėl kurios reikia atidžiau nagrinėti patį smulkinimo procesą ir nuolatos jį tobulinti. Susmulkintuose šiauduose esančių organinių trąšų perdavimas į dirvožemį priklauso nuo to, kaip yra supjaustomos augalinės liekanos ir kaip jos yra paskirstomos dirvos paviršiuje. Optimalus šiaudų pjaustinių ilgis, užtikrinantis geriausią jų įterpimą ir sumaišymą su dirvožemiu, yra iki 30 mm [21]. Norint pasiekti aukštos kokybės šiaudų susmulkinimą, svarbu tinkamai parinkti javų kombaino smulkintuvo peiliukus, tiek aktyvius ant besisukančio rotoriaus, tiek pasyvius priešpeilius.

Šiaudų pjaustinio ilgis tiesiogiai priklauso nuo smulkintuvo veleno sukimosi dažnio. Mažėjant sukimosi greičiui, didėja pjaustinio ilgis, o atvirkščiai – didinant apsisukimų greitį, mažėja pjaustinio ilgis [20]. Daugumoje javų kombainų smulkintuvo veleno sukimosi greitis turi ribotą reguliavimo diapazoną, todėl galimi tik du skirtingi greičiai – didesnis greitis naudojamas varpiniams augalams, o mažesnis – rapsui ir kukurūzams. Kombainuose pjaustinio ilgio reguliavimui taip pat yra reguliuojamas priešpeilių atakos kampas ir priešpeilių ilgis.

#### **1.4.2. Ekologiniai ir ekonominiai aspektai: šiaudų smulkinimas ir jo įtaka žemės ūkio veiklai**

Šiaudų smulkinimo procesas turi esminę įtaką žemės ūkio veiklai, tiek ekologiniais, tiek ekonominiais aspektais.

##### **Ekologiniai Aspektai:**

Kokybiškai susmulkinus ir tinkamai paskleidus šiaudus dirvos paviršiuje jie tampa lengviau apdorojami sliėkų ir kitų mikroorganizmų, kurie perdirba šiaudus į organines trąšas. Dirvoje esantiems arba papildomai išpurkštiems mikroorganizmams suskaidžius augalines liekanas dirvoje būna apie 20 proc. daugiau azoto lyginant su dirva, kurioje nebuvo susmulkintos ir paskleistos augalinės liekanos. Taigi šiaudų smulkinimas ir paskleidimas ne tik sumažina pridėtinių trąšų naudojimą, bet ir didina derlių [19].

Nesusmulkinti arba netinkamai susmulkinti ir nekokybiškai paskleisti šiaudai įterpti į dirvą esant anaerobinėmis sąlygomis gali joje išbūti ne vienerius metus. Tokiuose šiauduose pradeda daugintis pelėsis, kuris nuodija dirvą ir joje augančius augalus. Pastebima, jog tokioje dirvoje augantys augalai pradeda sirgti, kai jų šaknys pasiekia supelijusius šiaudus, todėl reikia papildomai atlikti fungicidinį purškimą.

##### **Ekonominiai Aspektai:**

Pastarųjų 5 metų laikotarpyje augalų apsaugos produktai (fungicidai, herbicidai) pabrango vidutiniškai 150 proc., trąšos pabrango vidutiniškai 200 proc. o žemės ūkio produkcijos supirkimo kainos svyruoja 10 – 20 proc. brangimo ribose. Tai reiškia, jog produkcijos užauginimo savikaina

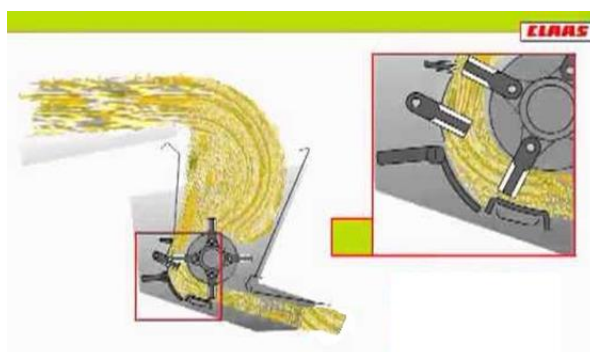
ženkliai pabrango, o pelnas padidėjo ne taip ženkliai, kaip užauginimo savikaina, todėl ieškoma būdų kaip sumažinti užauginimo kaštus [22]. Vienas iš būdų yra tvarkyti augalines liekanas pagal agrotechninius reikalavimus, jog būtų mažinamos trąšų ir augalų apsaugos produktų naudojimo normos taip sumažinant auginimo savikainą [23]. Taip pat vienas iš būdų yra pereiti prie tiesioginės sėjos, kuri padeda sutaupyti vidutiniškai 80 proc. degalų.

## 1.5. Javų kombainų smulkinimo peiliukai

### 1.5.1. Veikimo principas

Javų kombainų smulkinimo peiliukai yra esminis komponentas, naudojamas šių mašinų, skirtų javų derliaus nuėmimui, procese. Šis skyrius aprašo peiliukų veikimo principą ir tai, kaip jie smulkina šiaudus.

Visų rinkoje esančių javų kombainų šiaudų smulkintuvų konstrukcija yra panaši: ant besisukančio rotoriaus keturiomis eilėmis išdėstyti peiliai, kurie prie rotoriaus yra tvirtinami šarnyriniu būdu, o darbinę padėtį jie įgauna dėl išcentrinės jėgos besisukant rotorui (žr. 1.7 pav.). Toks konstrukcinis sprendimas padarytas tam, jog smulkintuve atsiradus kietam kūnui peiliai užsilenktų ir vėliau grįžtų į darbinę poziciją kai nesumulkintas kūnas iškris, taip neužkertant rotoriaus. Ant smulkintuvo sienelės pro kurią krenta šiaudai yra pritvirtinami tokie patys peiliai stacionariai, šie peiliai vadinami priešpeiliais. Šiaudų masė paduodama iš viršaus ir krenta ant besisukančio rotoriaus. Šiaudai krisdami tarp rotoriaus peilių ir priešpeilių yra supjaustomi.



1.7 pav. Smulkintuvo veikimo schema [31]

### 1.5.2. Efektyvumas ir reguliavimas

Smulkinimo peiliukų efektyvumas yra labai svarbus, nes jis turi tiesioginį poveikį visam derliaus apdorojimo procesui. Šie peiliukai turi būti tinkamai prižiūrimi ir reguliuojami, kad būtų pasiektas optimalus smulkinimo rezultatas. Kombainuose galima nustatyti du skirtingus rotoriaus sukimosi greičius, kur didesnis greitis skirtas varpinėms kultūroms, o mažesnis greitis - kukurūzams ir rapsams dėl esančios žaliosios masės. Taip pat reguliuojama priešpeilių padėtis (reguliuojamas jų ilgis smulkinimo kameroje) ir atakos kampas. Kiekvienai kuliamai kultūrai gamintojas nurodo smulkintuvo parametrus, kurių privalu laikytis. Taip pat nuo 2017 metų CLAAS kombainuose galima opcija su automatiniu priešpeilių reguliavimu priklausomai nuo šiaudų masės kiekio. Šios sistemos veikimo principas yra toks, jog kombaino nuožulnioje kameroje per kurią tiekiami nupjauti javai į kūlimo būgną yra įrengtas masės jutiklis, kuris perduoda signalą į valdymo bloką, ir pagal tai

reguluojama priešpeilių padėtis: esant per dideliui masės kiekiui priešpeiliai yra sutraukiami, jog šiaudai būtų prasčiau susmulkinami, tačiau taip apsaugomas smulkintuvas nuo užkimšimo ir kombaino sugadinimo [24].

Efektyvumo sumažėjimas: Per didelės apkrovos gali sukelti perkaitimą ar per didelį mechaninį stresą smulkinimo peiliukams. Tai gali sukelti peiliukų sulūžimą, dėl ko šiaudai tampa prasčiau smulkinami. Taip pat dėl peilių nulūžimo atsiranda masių disbalansas ant rotoriaus veleno.

Ilgaamžiškumo sumažėjimas: Nuolatinis apkrovos poveikis gali sumažinti smulkinimo peiliukų ilgaamžiškumą. Per didelė apkrova sukelia greitesnį peiliukų nusidėvėjimą, ar netgi sulūžimus. Greitesnį peilių nusidėvėjimą ypač skatina ant šiaudų esančios abrazyvinės dalelės, kurios atsiranda nuo dirvos kuliant išgulsius javus, kai į pjaunamąją patenka žemių.

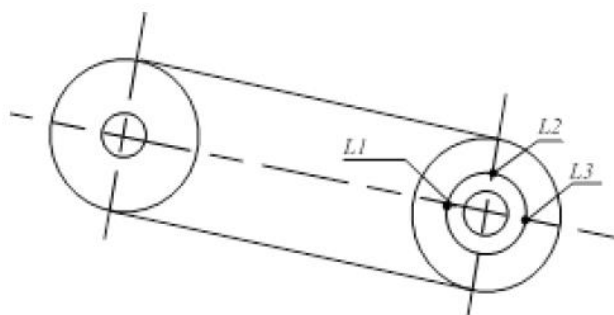
Būtiniosios priemonės: Norint sumažinti apkrovos poveikį smulkinimo peiliukams, svarbu imtis tinkamų priemonių. Tai gali apimti reguliarius kombaino techninės priežiūros procesus, reguliavimą pagal derliaus sąlygas, taip pat apsauginių technologijų diegimą, pvz., akmenų aptikimo sistemas, ir operatorių mokymąsi tinkamai naudoti ir prižiūrėti javų kombainą.

## 1.6. Atlikti javų kombainų šiaudų smulkintuvų tyrimai

Javų kombainų šiaudų smulkintuvai yra tyrinėjami visame pasaulyje. Vyraujančios tyrimų kryptys yra rotoriaus guolių virpesių tyrimai ir smulkinimo peiliukų nudilimo tyrimai. Šios dvi tyrimų kryptis apžvelgiamos šiame skyriuje.

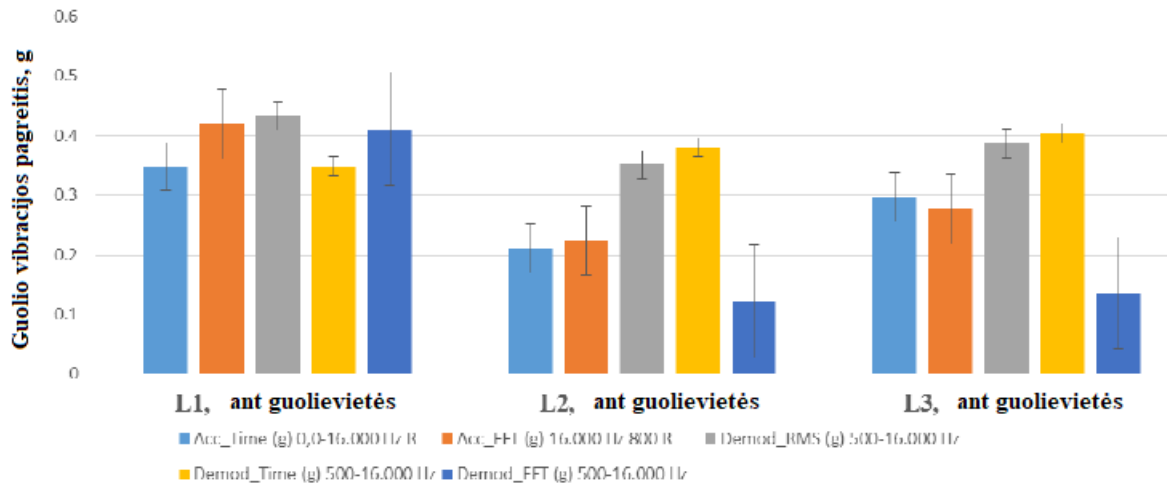
### 1.6.1. Smulkintuvo guolių virpesių tyrimai

Šiaudų smulkintuvo guolių virpesių tyrimas buvo atliktas 2019 metais Vytauto Didžiojo Universiteto ir Latvijos Žemės Ūkio Universiteto mokslininkų. Tyrimo metu buvo matuojami trijų skirtingą valandų skaičių (10 mth; 1200 mth; 3500 mth.) išdirbusių kombainų smulkintuvų guolių virpesiai. Tyrimo metu virpesiai buvo matuojami trijuose taškuose prie riedėjimo guolio guoliavietės. Buvo pasirinkta matuoti guolį toje pusėje, kurioje yra smulkintuvo diržinė pavarą (žr. 1.8 pav.). [2]



1.8 pav. Jutiklio jungimo taškai [2]

Vibroanalizės metu gauti duomenys parodė, jog guolio virpesiai stipriausi taške L1, o tarp taškų L2 ir L3 esminių skirtumų nėra (žr. 1.9 pav.). Taip yra todėl, nes taške L1 guolis yra daugiausiai apkraunamas dėl diržinės pavaros įtempimo jėgos.



1.9 pav. Duomenų palyginimas [2]

Tyrimo rezultatuose nustatyta, jog virpesių pagreičiai kombainuose su 1200 ir 3500 darbo valandų padidėja atitinkamai 12 % ir 30 % lyginant su nauju javų kombainu. Taip pat šis tyrimas parodė, jog spektrinės virpesių analizės būdu galima aptikti guolių defektus neišardant guolio bloko, kas palengvina ir pagreitina techninę priežiūrą.

### 1.6.2. Javų kombaino smulkintuvo peilių nudilimo tyrimas

Javų kombaino smulkintuvo peiliukų nudilimo tyrimas buvo atliktas 2022 metais. Tyrimui buvo naudojamas *Claas* firmos savaeigis javų kombainas *Tucano 450*. Tyrimo tikslas yra identifikuoti faktorius, kurie įtakoja peiliukų dilimą. Analizuojama peiliukų konstrukcijos parametrai, cheminės sudėties ir darbo pozicijos įtaka dilimui. Tyrimas atliekamas realiose darbo sąlygose naudojant šešių skirtingų gamintojų smulkinimo peiliukus, kurie sumontuojami į javų kombaino šiaudų smulkintuvą. Peiliukų nudilimas išmatuotas pagal masių pokytį, kietumas matuotas su kietmačiu. Atlikus cheminės sudėties analizę nustatyta, jog nei vieno iš tirtų peilių sudėtis nėra artima spyruoklinio plieno 65 Mn sudėčiai, kuri rekomenduojama naudoti tokiomis darbo sąlygomis [25]. Tyrimo metu nustatyta, jog mažiausiai dilo peiliai, kurių pjovimo briaunos kietumas yra didžiausias ( $568 \pm 11$  HV), ir tai buvo ne originalus peilis, o alternatyvus gamintojo. Originalūs *Claas* peiliai yra trečioje vietoje, pagal nudilimą. Taip pat tyrimas atskleidė, jog esamas smulkintuvo rotorius dizainas (peiliukų išdėstymas keturiomis išilginėmis ašimis) neužtikrina vienodo dilimo ir, atitinkamai, peiliai nepasiekia kritinės būklės vienodai. Nudilimo netolygumas vienoje ašyje išdėstytų peilių atveju yra dydis, kuris kinta sinusoidės formos dėningumu. Tikėtina, kad šio netolygumo priežastis yra susijusi su netolygiu šiaudų pasiskirstymu smulkinimo veleno ašine kryptimi, kai šiaudai juda kratikliais [26].

Tyrimo metu atlikus skirtingų gamintojų smulkinimo peiliukų vidutinių nudilimų ir nudilimo sklaidos intervalų vertinimą yra teigiama, jog šie nudilimo skirtumai yra reikšmingi. Po atlikto tyrimo daroma prielaida, kad dėl smulkintuvo konstrukcijos ir tangentinio klavišinio javų kombaino veikimo principo atsirandantis netolygus peilių dilimas sukels smulkintuvo veleno disbalansą. Didėjant smulkintuvo peilių darbo valandų skaičiui, apie 50 % smulkintuvo peiliukų dyla intensyviau už likusius ir pasiekia kritinę būklę greičiau, kai tuo tarpu kiti 50 % peiliukų dar gali būti eksploatuojami toliau [26].

Tiesiogiai šiaudų masės sukeliamas peilių dilimas būtų itin mažas kadangi peilių ir šiaudų mechaninės savybės skiriasi radikaliai, tačiau tokius nudilimo rezultatus galima paaiškinti tribologiniu aspektu [27]. Dilimą sukelia ne šiaudo ir peiliuko tiesioginė sąveika, bet abrazyvinės dalelės (dulkės, smėlis ir kt.) kurios dengia šiaudo paviršių [28]. Šio tyrimo atlikimo metais (2022 m. ) javai buvo stipriai išguldyti, beveik prispausti prie dirvos, todėl lietus ir vėjas padengė javų paviršių abrazyviniu sluoksniu. Taip pat pjaunant tokius išgulčius javus dėl maksimaliai žemo pjovimo aukščio dažnai į pjaunamąją tiesiogiai patenka žemių, todėl kombaino smulkinimo peiliukus, kurie vidutiniškai juda ~92 m/s greičiu veikia mikro abrazyvo dalelių erozija [29].

## 1.7. Apibendrinimas

Atlikta literatūros šaltinių analizė rodo, jog virpesiai žemės ūkio technikoje yra rimta problema, dėl jų mažėja technikos darbingumo resursas, taip pat virpesiai tiesiogiai įtakoja su technika dirbančių operatorių sveikatos būklę, todėl apžvelgtuose straipsniuose pabrėžiamas virpesių valdymo poreikis. Tam tikslui yra kuriamos virpesių stebėjimo ir diagnostikos sistemos. Literatūros analizė apie virpesius žemės ūkio technikoje, ypač apie javų kombainų smulkintuvų guolių virpesius bei smulkintuvo peilių nudilimą, kuris pasiskirsto netolygiai ir iššaukia veleno disbalansą suteikė svarbią įžvalgą į šioje srityje vykstančius procesus. Remiantis šia analize daromos šios išvados:

1. Virpesiai žemės ūkio technikoje yra svarbus klausimas. Tyrimai rodo, kad virpesiai gali turėti įtaką žemės ūkio technikos našumui, efektyvumui ir ilgaamžiškumui. Ypač javų kombainų smulkintuvų guolių virpesiai gali turėti tiesioginį poveikį javų kombainų darbui.
2. Smulkintuvo peilių nudilimai yra netolygūs ir turi poveikį veleno disbalansui.
3. Reikalinga atlikti tyrimą kuriame būtų tirama kaip peilių būklė įtakoja smulkintuvo rėmui tenkančius virpesius. Atsižvelgiant į tai, kad iki šiol nėra atliktas tyrimas apie smulkintuvo virpesius kintant peilių būklei, tai daro prielaidą šiam magistro baigiamojo darbo tyrimui. Šis tyrimas galėtų padėti suprasti, kaip peilių būklė veikia smulkintuvo virpesius ir atvirkščiai, ir padėti identifikuoti būdus, kaip optimizuoti smulkintuvo našumą ir ilgaamžiškumą.

Smulkintuvo virpesių tyrimas gali padėti žemės ūkio technikos vystymuisi: Suprantant smulkintuvo virpesių sąsajas su peilių būkle, galima būtų sukurti būdus, kaip efektyviau valdyti smulkintuvo našumą ir ilgaamžiškumą. Tai gali turėti teigiamą poveikį žemės ūkio technikos efektyvumui ir ilgalaikiams ekonominiams rezultatams.

Taigi, remiantis literatūros analize, daroma prielaidą, jog smulkintuvo virpesių tyrimas kintant peilių būklei yra svarbus žingsnis tolimesniam žemės ūkio technikos vystymuisi. Toks tyrimas gali padėti suprasti esamus šiaudų apdorojimo procesus ir įgyvendinti geriausias praktikas, siekiant optimizuoti žemės ūkio technikos našumą.

## 2. Tyrimo metodika ir tyrimo atlikimas

Šiame skyriuje pateikta išsamiai aprašyta metodika ir tyrimo atlikimo procedūra (kaip buvo vykdomi matavimai, kokios priemonės buvo naudojamos, kaip buvo renkami duomenys ir kaip buvo įvertinti rezultatai), kuri buvo taikoma tiriant šiaudų smulkintuvo rėmo virpesių priklausomybę nuo peiliukų nudilimo būklės. Ši metodika yra esminė, siekiant užtikrinti tyrimo patikimumą ir atitikimą jam iškeltiems tikslams.

### 2.1. Tyrimo tikslas ir hipotezė

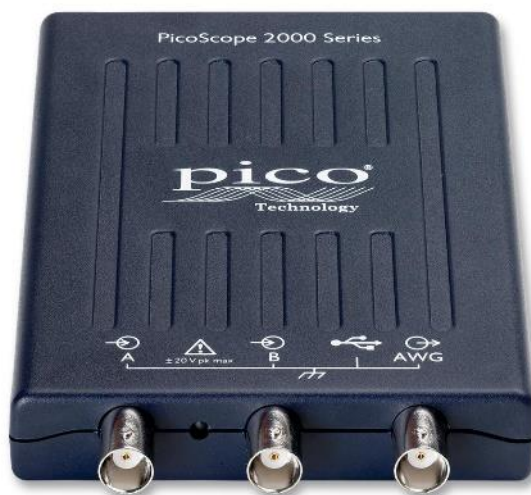
Literatūros analizė parodė, jog dėl tangentinio klavišinio javų kombaino šiaudų masės padavimo į smulkintuvą, ir dėl pačio smulkintuvo konstrukcijos peiliai dyla netolygiai, todėl ant smulkintuvo veleno gali atsirasti pavojingas disbalansas [26]. Mokslininkai tyrė javų kombainų smulkintuvų guolių virpesius [2], kūlimo būgno virpesius [16], taip pat tyrė smulkintuvų peilių nudilimą [26], tačiau nėra atlikto tyrimo kuris nustatytų virpesių priklausomybę nuo peilių išdirbtų valandų skaičiaus ir būklės, todėl pasirinkta tirti būtent šis reiškinys. Atlikti šiaudų smulkintuvų ir javų kombainų virpesių tyrimai rodo, jog virpesiai stiprėja didėjant darbo valandų skaičiui, todėl keliami hipotezė, jog kuo peilių išdirbtų valandų skaičius yra didesnis, tuo didesni bus virpesiai. Šio tyrimo metu gauti duomenys analizuojami ir ieškoma sprendimų kaip patobulinti kombaino šiaudų smulkintuvo konstrukciją.

### 2.2. Naudojama įranga ir priemonės

Straipsniuose, kuriuose analizuojami javų kombainų virpesiai, dažnai naudojamas vibroanalizatorius [2]. Šis įrenginys yra sudarytas iš magnetu tvirtinamo akselerometro, kuris yra naudojamas kaip virpesių jutiklis, ir specialaus analizatoriaus, turinčio įrašytą programinę įrangą bei ekraną, kuriame pateikiami matavimo duomenys. Remiantis ankstesniais tyrimais ir metodikomis, buvo priimtas sprendimas rasti analogišką arba panašią įrangą, skirtą šiam tyrimui atlikti. Kauno technologijos universiteto mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas šiam tyrimui suteikė osciloskopą „PicoScope 2204A“ ir akselerometrą su magnetiniu tvirtinimu „KD35a“ (žr. 2.1 pav.).



a)



b)

2.1 pav. Tyrimo įranga – a) akselerometras „KD35a“, b) osciloskopas „PicoScope 2204A“

## **2.3. Tyrimo metodika**

### **2.3.1. Pašalinių veiksnių eliminavimas**

Atlikti tyrimai rodo, jog didėjant darbo valandų skaičiui kinta javų kombaino smulkintuvo guolių virpesiai, todėl šį veiksnių reikia eliminuoti norint gauti patikimus duomenis apie virpesių pokytį didėjant peilių darbo valandų skaičiui, taigi tyrimą reikia planuoti ir atlikti taip, jog būtų tiriama tik peilių darbo valandų įtaka o ne peilių ir guolių kartu. Tam tikslui numatoma pirkti penkis komplektus smulkinimo peilių, su jais atidirbti skirtingą valandų skaičių didėjimo tvarka ir vėliau sumontuoti peilių komplektus vieną po kito ir atlikti virpesių matavimą. Tokiu būdu tyrimas bus atliktas esant tai pačiai guolių būklei, todėl rezultatai nebus iškreipti.

Smulkintuvų peiliai gaminami su dvejomis pjovimo briaunomis, tačiau peiliai dirba tik viena kryptimi, todėl dyla viena peilio briauna. Antra briauna skirta tam, jog nudilus vienai pusei būtų galima peilį apsukti, ir dirbti su aštria briauna. Tačiau toks peilių naudojimas didina peilių nudilimo netolygumą, ir peilių nudilimo tyrime buvo tiriami peiliai su viena nudilusia briauna, todėl priimamas sprendimas neapsukinėti peilių, o visas darbo valandas išdirbti su viena pjovimo briauna. Peiliai naudojami originalūs, to paties gamintojo kaip ir javų kombainas.

Matuojant virpesius smulkintuvo pavaros pusėje yra svarbi jutiklio padėtis, nes tyrimo metu [2] buvo nustatyta, jog virpesiai skiriasi nuo jutiklio tvirtinimo vietos, o didžiausi virpesiai fiksuojami taške, kuris yra ant pavaros diržo ašies (žr. 1.8 pav.). Jutiklio tvirtinimas pavaros pusėje yra pavojingas, nes atstumas tarp pavaros skriemulio ir guoliavietės nėra didelis, todėl tvirtinant toje vietoje laidinį akselerometrą yra pavojus jog besisukantis diržas gali įtraukti laidą ir taip sugadinti įrangą, taip pat bet kokių darbų atlikimas šalia besisukančių atvirų detalių yra pavojingas tyrimo atlikėjui. Dėl šių priežasčių jutiklis bus tvirtinamas kitoje smulkintuvo pusėje, kur nėra smulkintuvo pavaros. Jutiklis bus tvirtinamas ant rotoriaus guoliavietės korpuso, kurioje yra sugeriami rotoriaus perduodami virpesiai. Tyrimui naudojamas jutiklis yra vienos ašies, todėl reikia surasti tinkamą tašką jutiklio tvirtinimui tyrimo atlikimo metu, taigi tam tikslui jutiklis tvirtinamas trijuose skirtinguose taškuose x, y ir z ašimis, taip surandant tašką, kuriame virpesių amplitudė didžiausia. Suradus šį tašką, tolimesnis tyrimas atliekamas tik tame taške.

### **2.3.2. Numatomas tyrimo atlikimo laikas**

Lietuvoje javų kombainai intensyviausiai dirba liepos ir rugpjūčio mėnesiais, kai yra nuimamas javų ir ankštinių kultūrų derlius. Derliaus nuėmimo sezonas gali užsitęsti priklausomai nuo klimato sąlygų. Ūkiuose, kur auginami kukurūzai javų kombainai dirba ir lapkričio mėnesį. Atsižvelgiant į žemės ūkio darbų atlikimo specifiką, visi tyrimai turi būti planuojami iš anksto, jog jiems būtų tinkamai pasiruošiama. Norint atlikti tyrimus lauko sąlygomis, juos reikia planuoti vasaros metu, liepos ir rugpjūčio mėnesiais. Tiriamasis javų kombainas per vieną sezoną vidutiniškai išdirba 490 valandų, su juo būna kuliami žieminiai miežiai, žieminiai rapsai, žieminiai kviečiai ir ankštinės kultūros (žirniai, pupos). Tyrimui peiliai pradami ruošti 2022 metų sezono metu, kai prieš kūlimo sezoną pakeičiami nauji smulkintuvo guoliai, sudedamas naujas peilių komplektas ir su šiais peiliais kombainas išdirba 80 valandų, su sekančiu komplektu dar 160 valandų, su sekančiu 240 valandos. Visi peiliai išimami ir sudedami eilės tvarka, jog vėliau būtų galima sudėti į tas pačias vietas. Paskutinis peilių komplektas ruošiamas 2023 metų sezono metu, kai prieš sezoną sudedamas naujas peilių komplektas ir kombainas su šiais peiliais išdirba visą sezoną, taip gaunamas peilių komplektas su 490 darbo valandomis. Visi peiliai eilės tvarka išimami ir ta pačia tvarka sudedami į dėžę, jog būtų

galima sudėti atgal į tas pačias vietas tuos pačius peilius. Įskaitant visiškai naujų peilių komplektą gaunami penki peilių komplektai atidirbę skirtingus valandų intervalus.

Atliekant peilių paruošimą tyrimui 2022 metų sezono metu pastebėtas akivaizdus peilių nudilimas ir netolygus masės praradimas, todėl ruošiant paskutinį peilių rinkinį 2023 metais buvo nuspręsta prieš kiekvieną darbo dieną esant tuščiam kombainui papildomai išmatuoti smulkintuvo virpesius, jog nustatyti virpesių signalo RMS (*angl. Root Mean Square*. Tai yra matematinis rodiklis – šaknis iš skaičių kvadratų sumos ir šis rodiklis naudojamas signalų analizėje nustatant vidutinį signalo stiprumą) kitimo dėsningumą ir nustatyti apytikslių ribą, nuo kurios virpesių pagreitis pradeda didėti sparčiau nei įprastai, kas signalizuoja jog reikia planuoti smulkintuvo remontą. Tokiu būdu nebus išvengiama kintančios guolio būklės įtakos, tačiau kitaip atlikti tokio tyrimo nėra galimybės.

### 2.3.3. Duomenų analizės metodai

Tyrimo metu gauti duomenys apdorojami kompiuterine programa „Pico Scope 7 T&M“ su kuria buvo matuojamas signalo stiprumas, analizuojamas signalo pikų dažnis. Signalo stiprumo reikšmės konvertuojamos į virpesių pagreitį naudojant programą „MATLAB“. Taip pat naudojamas duomenų palyginimo metodas, kurio metu lyginami dviejų matavimų rezultatai ir aprašomi jų skirtumai. Duomenų palyginimo grafikui sudaryti naudojama programa „MS Excel“.

## 2.4. Tyrimo vykdymo eiga

### 2.4.1. Tiriamasis objektas

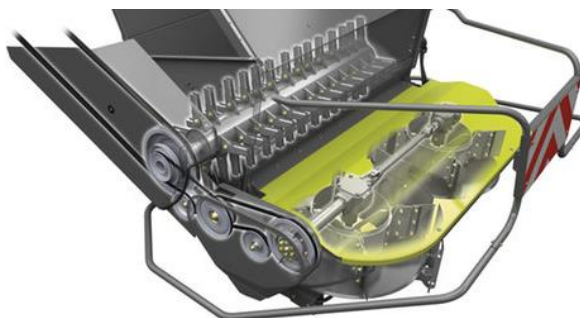
Tyrimo objektu pasirenkamas Širvintų rajone įsikūrusiame augalininkystės ūkyje dirbantis savaeigis javų kombainas *Claas Lexion 560* (žr. 2.2 pav.). Kombaine sumontuotas gamintojo „Caterpillar“ 266 kW galios dyzelinis variklis, kombaino grūdų bunkerio talpa 10,5 m<sup>3</sup>, pjaunamoji komplektuojama *Claas V750* (7,5m darbinio pločio pjaunamoji, turinti kintamo ilgio pjovimo stalą). Šio javų kombainas yra tangentinio tipo, jame javų masė separuojama šešiais klavišais.



2.2 pav. Savaeigis javų kombainas *CLAAS Lexion 560*

Tiriamas konkrečiai šio kombaino šiaudų smulkintuvas (žr. 2.3 pav.). Smulkintuvo veleno konstrukcijoje yra keturios eilės po 10 peiliukų tvirtinimo kilpų kurios yra privirtintos prie smulkintuvo veleno. Kiekviena peilių tvirtinimo kilpų eilė išdėstyta kas 90 laipsnių. Ant vienos kilpos tvirtinasi du peiliai. Tiriamieji smulkinimo peiliukai yra pagaminti iš plieno, jų briaunos yra grūdintos

aukšto dažnio srovėmis [29], o paties peilio matmenys yra 173×50×4 mm. Smulkintuvo priešpeiliams naudojami tokie patys peiliai, jų montuojama 80, taigi vienas peilių komplektas yra 160 peilių. Peiliai naudojami originalūs *Claas* firmos, pirkti oficialioje atstovybėje Lietuvoje.



2.3 pav. *CLAAS Lexion* šiaudų smulkintuvo vaizdas [32]

#### 2.4.2. Kombaino paruošimas tyrimui

Tyrimas atliekamas dviem etapais, kai 2023 metų vasaros sezono metu kasdiena matuojami smulkintuvo virpesiai ir išsaugomi duomenys ir antras etapas ne sezono metu, 2023 metų spalio mėnesį, su visais smulkinimo peilių rinkiniais esant vienodai guolių būklei. Siekiant išvengti matavimo paklaidų, kurios atsirastų į smulkintuvą patekus šiaudams ar kitoms augalinėms liekanoms, kombaino kuliамasis aparatas turi būti visiškai tuščias. Kombaino kuliамasis aparatas išvalomas nuo augalinių liekanų, taip kombainas paruošiamas tyrimo atlikimui.

Kombaino smulkintuvo rotorius virpesius esant tuščiam kombainui įtakoja tik ant jo esantys peiliai, ir nepriklauso nuo priešpeilių būklės, kadangi kombaine nėra šiaudų, taigi tyrimo metu šie peiliai tarpusavyje nesąveikauja, todėl tyrimo eigoje bus permontuojami tik rotorius peilių komplektai, kurie buvo paruošti 2022 ir 2023 sezonų metu. Iš pradžių nuimamas nuo smulkintuvo šiaudų skleistuvas (žr. 2.4 pav.), kadangi jis trukdo pakeisti smulkintuvo peilius.



2.4 pav. Šiaudų skleistuvas

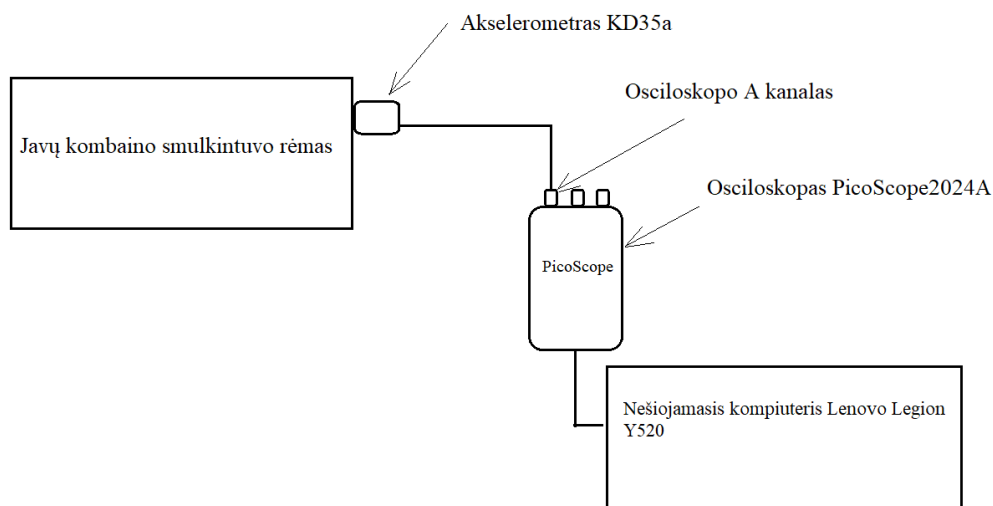
Ant smulkintuvo veleno sumontuojami nauji peiliai (žr. 2.7 pav.). Prieš pradėdant dėti peilius svarbu įsitikinti jog kombaino kuliamoji yra išjungta, ir kombaino variklis yra išjungtas, ir tik įsitikinus galima saugiai pradėti darbą. Peilių briaunos yra aštrios, todėl juos montuojant privaloma mūvėti apsauginius darbo rūbus ir pirštines. Sumontavus peilius pereinama prie pasiruošimo užvesti kombaino variklį ir įjungti kuliamąjį aparatą, kuris sujungtas su smulkintuvu. Patikrinamas aušinimo skysčio ir variklio alyvos lygis, o įsitikinus, kad darbinių skysčių normos yra tinkamos kombaino variklis yra užvedamas. Javų kombaino kuliamosios įjungimas sukelia jo varikliui didelę apkrovą, todėl prieš įjungiant kuliamąją palaukiama kol variklis pasieks darbinę temperatūrą, taip siekiant išvengti variklio sugadinimo. Varikliui pasiekus darbinę temperatūrą įjungiami kombaino kuliamasis aparatas ir kai visi kuliamojo aparato mazgai įsisuka, paspaudžiamas kombaino akseleratoriaus mygtukas, kuris variklio apsisukimus nustato į kombaino darbinį lygį. Palaukiama apie 10 sekundžių, kol visi kombaino mechanizmai pasieks savo darbinį apsisukimų dažnį, ir nusistovės stabilus kombaino darbas.

### 2.4.3. Tyrimo priemonės

- Osciloskopas „PicoScope 2204A“;
- Akselerometras „KD35a“, jautrumas 5 mV 1g;
- Nešiojamasis kompiuteris „Lenovo Legion Y520“ su įdiegta „Pico Scope 7 T&M“ programine įranga;
- Naujų smulkintuvo peiliukų rinkinys;
- Smulkintuvo peilių rinkinys po 80 darbo valandų;
- Smulkintuvo peilių rinkinys po 160 darbo valandų;
- Smulkintuvo peilių rinkinys po 240 darbo valandų;
- Smulkintuvo peilių rinkinys po 490 darbo valandų;

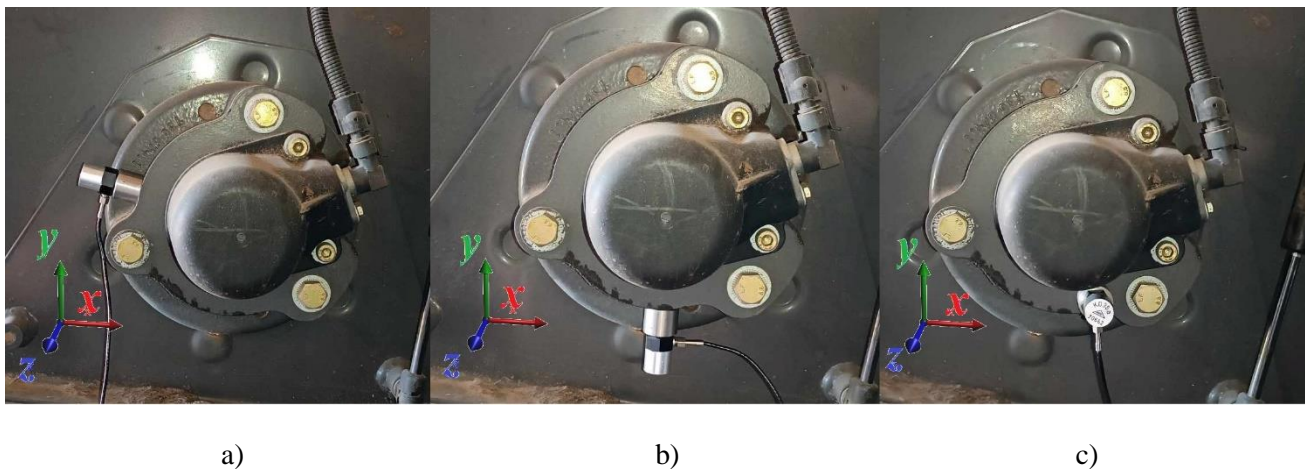
### 2.4.4. Virpesių matavimas

Atlikus kombaino paruošimą virpesių tyrimui su pirmuoju iš penkių peilių komplektu pradėdama virpesių matavimas. Kombaino smulkintuvas šiuo momentu yra paruoštas prijungti akselerometrą ir atlikti matavimą. Įranga tarpusavyje sujungiama pagal nurodymus, o jungimo schema nurodoma 2.5 pav.



2.5 pav. Tyrimo schema

Akselerometras jungiamas ant smulkintuvo guoliavietės  $x$  kryptimi, atlikus matavimą pakeičiama jutiklio vieta ir jis jungiamas taške  $y$  kryptimi, ir trečiam matavimui jutiklis jungiamas taške  $z$  kryptimi (žr. 2.6 pav.)



**2.6 pav.** Matavimo įrangos jungimas prie tiriamojo objekto. Akselerometro jungimas  $x$  ašies kryptimi a);  $y$  ašies kryptimi b) ir  $z$  ašies kryptimi c)

Per nešiojamąjį kompiuterį paleidžiamas *Pico Scope 7 T&M* programos langas ir jame yra rodomi realiu laiku fiksuojami virpesiai esant naujiems peiliams (naujo peilio nuotrauka 2.7 pav.). Ekrane rodomas virpesių spektras nuolat kinta, todėl palaukiama kol virpesiai nusistovės. Kai virpesiai nusistovi, programoje rodomas vaizdas yra stabdomas ir duomenys išsaugomi tolimesniam apdorojimui. Matavimų duomenys surašomi į lentelę palyginimui, kuria ašimi amplitudės gaunamos didžiausios (žr. 3.1 lentelė). Gaunama amplitudžių dydžio diagrama visomis kryptimis (žr. 3.1 pav.), kuris parodo, jog didžiausios amplitudės yra matuojant  $x$  ašimi, todėl tolimesni matavimai atliekami tik šiame taške. Akselerometras atjungiamas nuo kombaino, šio peilių rinkinio tyrimas baigtas ir ruošiamasi sekančio rinkinio tyrimui.



**2.7 pav.** Naujas smulkinimo peilis

Atlikus pirmąjį matavimą kombaino kuliamoji yra išjungiamas ir kombaino variklis išjungiamas, tada laukiama kol visi iš inercijos besisukantys kombaino mazgai nustos suktis, jog būtų galima išimti naujus smulkintuvo peilius ir sudėti sekantį peilių rinkinį su 80 darbo valandomis. Sudedamas peilių komplektas, kuris yra pradirbęs 80 moto valandų (žr. 2.8 pav.). Kartojamas kombaino užkūrimo, kuliamosios paleidimo procesas, kaip ir pirmu atveju. Analogiškai nustatomas akseleratorius į darbinį režimą, tada palaukiama kol kombaino darbas nusistovės tolygus ir toje pačioje vietoje kaip numatyta yra prijungiamas akselerometras. Visos šios procedūros analogiškai pakartojamos su peiliais kurie dirbo 160 (žr. 2.9 pav.), 240 (žr. 2.10 pav.) ir 490 moto valandų (žr. 2.11 pav.). Duomenys išsaugomi tolimesniam jų apdorojimui.



**2.8 pav.** Smulkintuvo peilis išdirbęs 80 darbo valandų

Smulkintuvo peilis išdirbęs 80 darbo valandų esminių pastebimų skirtumų nuo naujo peilio neturi. Peilio geometrija išlikusi vizualiai ta pati, tik dėl smulkintos drėgnos šiaudų masės ant plieno atsirado korozijos židiniai. Smulkintuvo virpesiams šie pakitimai turi sąlyginai nedidelę įtaką (žr. 3.8 ir 3.9 pav.).



**2.9 pav.** Smulkintuvo peilis išdirbęs 160 darbo valandų

Atsitiktine tvarka iš 160 darbo valandų išdirbusių peilių rinkinio paimamas vienas smulkintuvo peilis vizualinei apžiūrai ir jis turi pastebimus vizualinius pokyčius – peilio ašmenys prarado savo pirminę geometriją ir masę, matomas nusidėvėjimas. Nusidėvėjimo įtaka smulkintuvo virpesių amplitudei nurodoma (žr. 3.8 ir 3.9 pav.).



**2.10 pav.** Smulkintuvo peilis išdirbęs 240 darbo valandų

Atsitiktine tvarka imamas vienas peilis iš 240 valandų pradirbusių peilių rinkinio ir atliekama vizualinė apžiūra. Vizualiai matomas dar didesnis nudilimas masės praradimas lyginant su 160 valandas pradirbusiu peiliu. Šis peilis ilgesnį laiką sąveikavo su drėgna šiaudų mase, todėl matomi didesni korozijos židiniai. Nudilimo įtaka virpesių amplitudei parodoma grafikuose (žr. 3.8 ir 3.9 pav.).



**2.11 pav.** Smulkintuvo peilis išdirbęs 490 darbo valandų

Po 40 darbo valandų smulkintuvo peilis turi vizualiai akivaizdžius nusidėvėjimo požymius, ašmenys yra praradę geometrinę formą, metalas nudilęs. Nudilimo įtaka virpesių amplitudei parodoma grafike (žr. 3.8 ir 3.9 pav.).

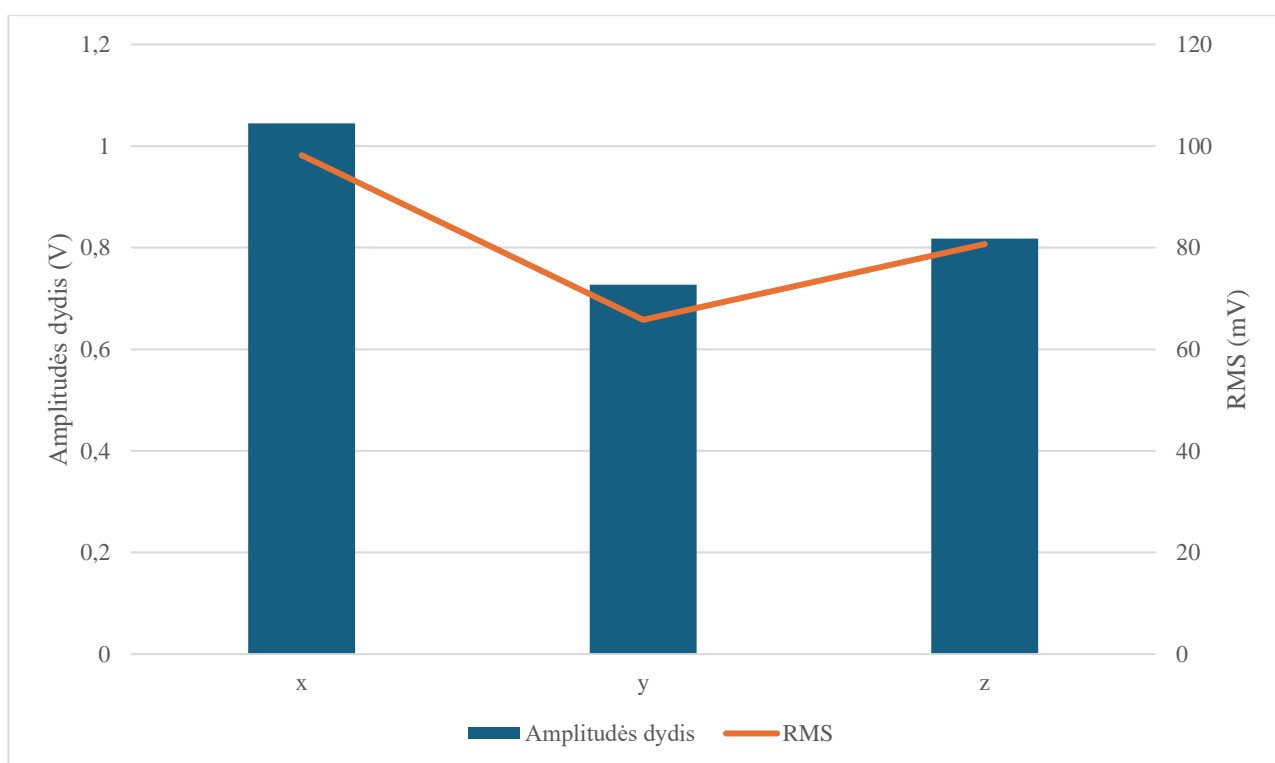
### 3. Tyrimo rezultatai ir duomenų analizė

Pirminis tyrimo rezultatų apdorojimas vyksta *PicoScope7* programoje. Pasirinkus opciją *Measurements* parenkamas matavimo įrankis *Peak to peak* kuris matuoja signalo pikų amplitudės dydį, taip pat su matavimo įrankiu RMS apskaičiuojamas signalo vidutinis stiprumas. Duomenys surašomi į lenteles ir braižomi grafikai. Pirmiausia pateikiami duomenys atlikto matavimo trimis skirtingomis ašimis:

3.1 lentelė: Virpesių signalo reikšmės  $x$   $y$   $z$  ašimis

Ašis	Signalų pikų amplitudės dydis (V)	RMS (mV)
x	1,045	98,2
y	0,727	65,8
Z	0,818	80,7

Pagal šiuos gautus duomenis braižoma diagrama duomenų palyginimui:



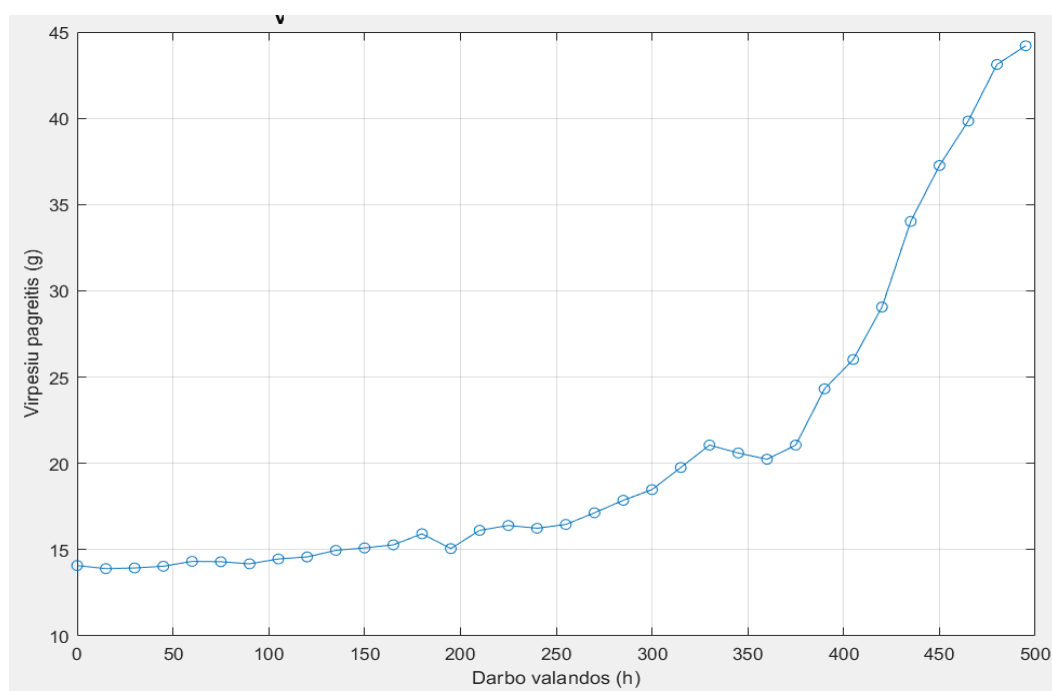
3.1 pav. Virpesių amplitudės trimis skirtingomis ašimis palyginimo diagrama

Į antrą lentelę pildomi 2023 metų sezono metu kiekvieną darbo dieną vykdytų virpesių matavimų RMS duomenys. Per darbo dieną kombainas pradirba vidutiniškai 15 moto valandų, taigi matavimo intervalai yra kas 15 darbo valandų. Pagal gautus duomenis braižomas RMS kitimo grafikas.

### 3.2 lentelė: Matavimų duomenys esant kintančiai techninei būklei

Darbo valandų skaičius	RMS (mV)	Darbo valandų skaičius	RMS (mV)	Darbo valandų skaičius	RMS (mV)	Darbo valandų skaičius	RMS (mV)
0	70,4	120	72,9	240	81,2	375	105,3
15	69,5	135	74,8	255	82,3	390	121,6
30	69,7	150	75,5	270	85,7	405	130,1
45	70,2	165	76,4	285	89,3	420	145,3
60	71,6	180	79,6	315	98,8	435	170,1
75	71,5	195	75,3	330	105,3	450	186,3
90	70,9	210	80,6	345	103	465	199,2
105	72,3	225	82	360	101,2	495	221

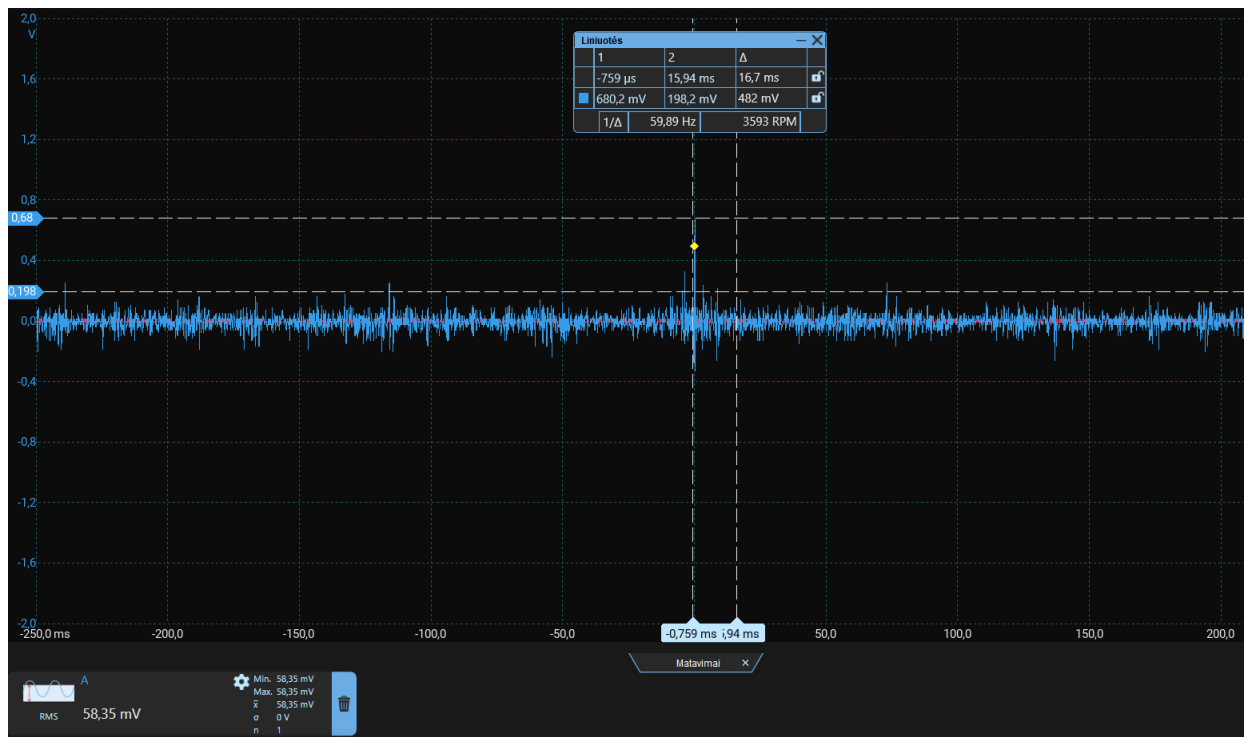
Naudojant programą *Matlab* RMS reikšmės konvertuojamos į virpesių pagreitį. Konvertuojant reikšmes įvedama tyrimui naudoto akcelerometro jautrumo vertė kuri yra 5 mV 1g. Virpesių pagreičio kitimo grafikas rodomas 3.2 paveiksle.



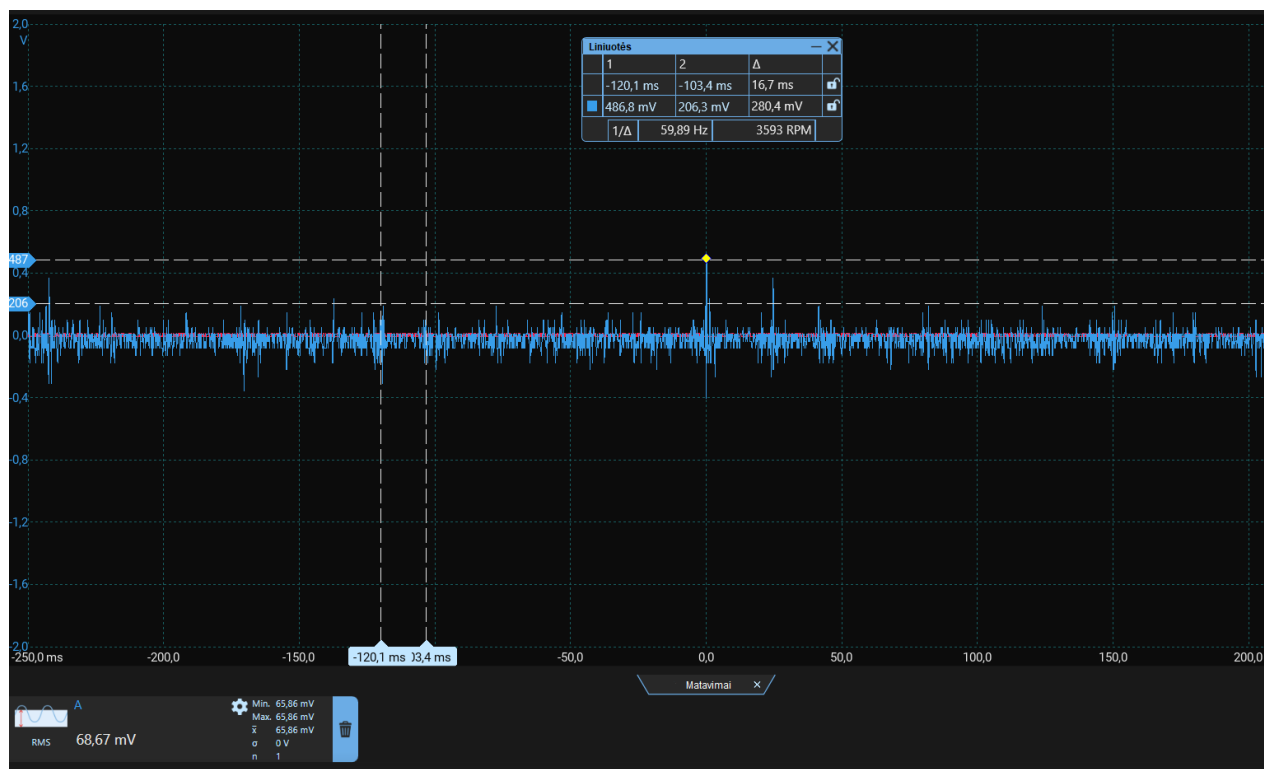
3.2 pav. Virpesių signalo stiprumo kitimo grafikas

Virpesių pagreičio kitimo grafikas rodo, jog nuo 360 darbo valandų atsiranda virpesių pagreičio reikšmės kilimo tendencija, pagal kurią galima spręsti, jog disbalansas pradeda ženkliai didėti, ir laikas remontuoti šį mazgą.

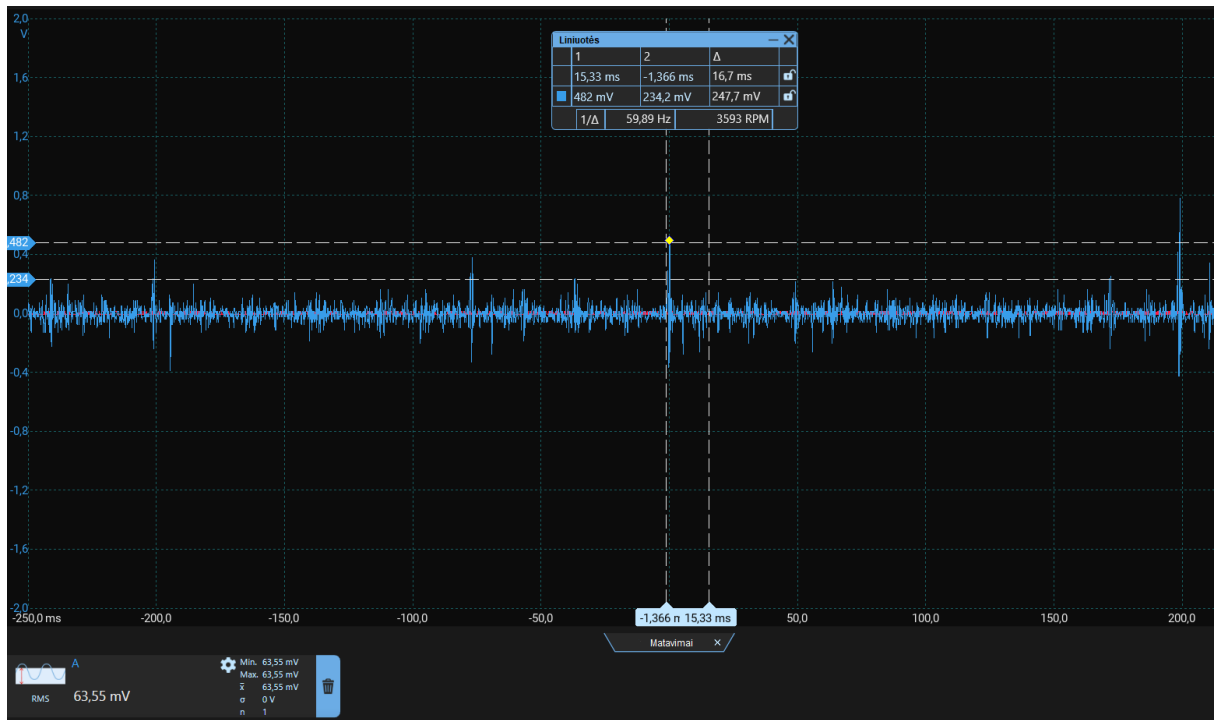
Toliau analizuojami antro tyrimo etapo metu gauti duomenys, kai buvo tiriami virpesiai keičiant peilių komplektus vieną po kito taip eliminuojant signalo trikdžius kurie gali atsirasti dėl kombaino techninės būklės kitimo. Visų peilių komplektų osciloskopu užfiksuoti virpesių matavimai pateikiami paveiksluose 3.3 – 3.7. Paveiksluose apatiniame kairiame kampe nurodoma RMS, taip pat y ašyje pažymėtos programos matavimų liniuotės ant aukščiausio virpesių piko ir ant vidutinių virpesių pikų viršūnių. Dažnis tarp pikų pažymėtas x ašyje.



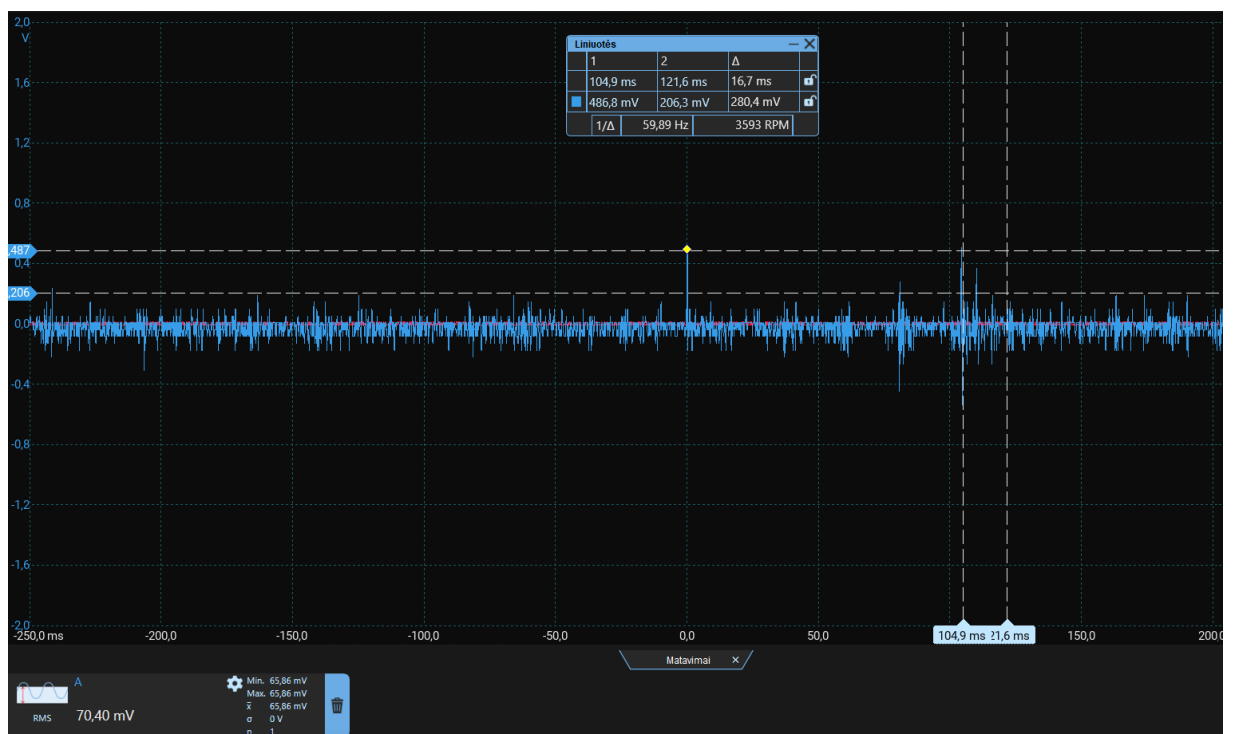
3.3 pav. Akselerometro signalas esant naujiems peiliams



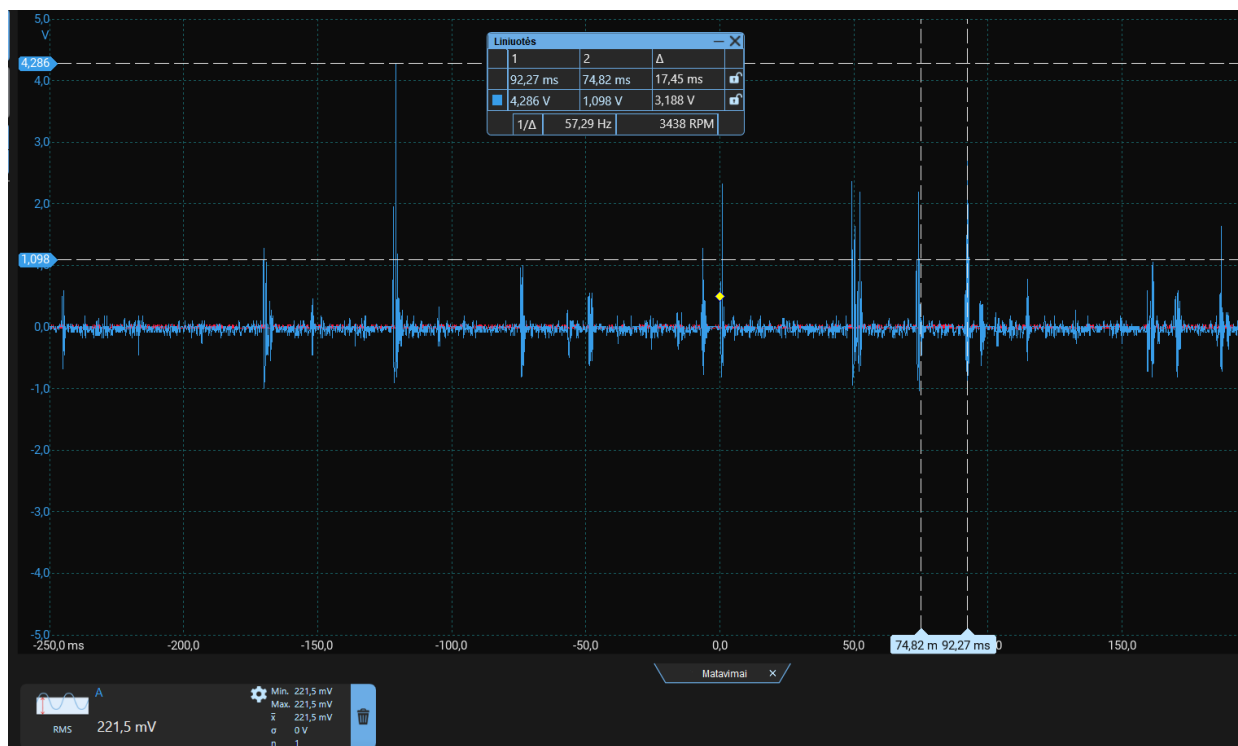
3.4 pav. Akselerometro signalas matuojant 80 valandų dirbusio peilių komplekto virpesius



3.5 pav. Akselerometro signalas matuojant 160 valandų dirbusio peilių komplekto virpesius



3.6 pav. Akselerometro signalas matuojant 240 valandų dirbusio peilių komplekto virpesius



**3.7 pav.** Akselerometro signalas matuojant 490 valandų dirbusio peilių komplekto virpesius

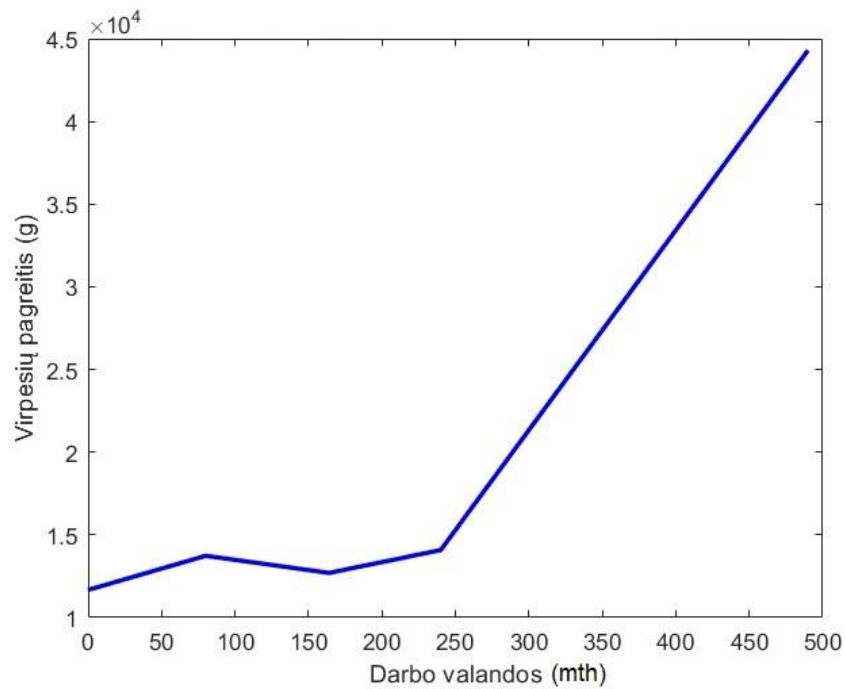
Matavimų metu išmatuotos RMS ir maksimalios pikų reikšmės surašomos į 3.3 lentelę. Šie duomenys naudojant kompiuterinę programą Matlab yra apdorojami, signalo įtampos vertės konvertuojamos į virpesių pagreitį ir išvedami virpesių pagreičio priklausomybės nuo darbo valandų grafikais.

Tiriamąjį smulkintuvo veleno sūkių dažnis yra 59 Hz. Išanalizavus visų matavimų duomenis yra matomas virpesių pikų dažnio sutapimas su smulkintuvo apsisukimo dažnio harmonika. Tai reiškia, jog sistemoje yra masės disbalansas. Didėjant darbo valandų skaičiui ir dylant peiliams matoma signalo stiprumo didėjimo tendencija, kuri reiškia, jog veleno disbalansas didėja dylant peiliams.

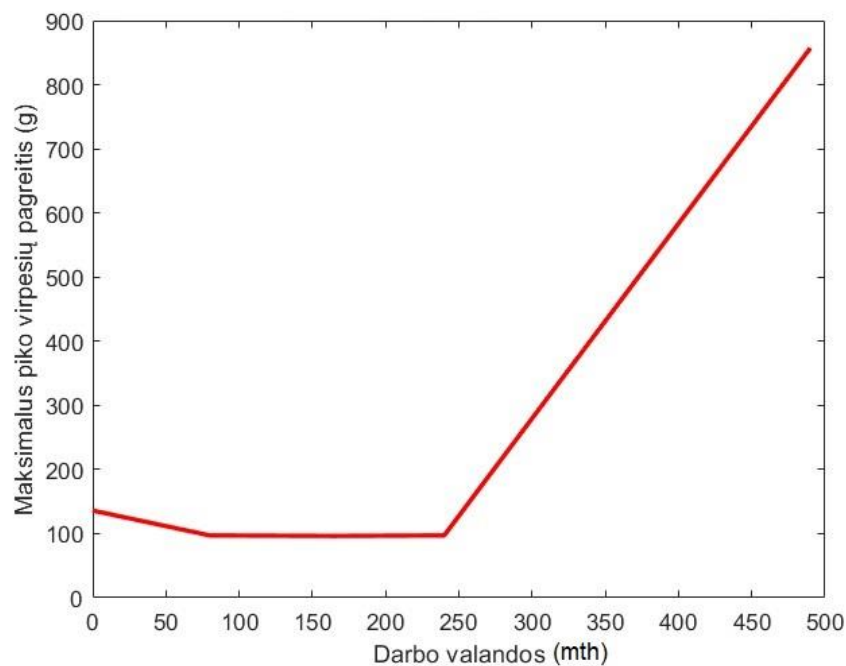
**3.3 lentelė:** Matavimų duomenys eliminavus kintančią kombaino techninę būklę

Darbo valandų skaičius	RMS (mV)	Maksimalaus virpesių piko reikšmė (V)
0	58,35	0,68
80	68,67	0,486
164	63,5	0,482
240	70,4	0,486
490	221,5	4,286

Konvertuojant reikšmes įvedama tyrimui naudoto akselerometro jautrumo vertė kuri yra 5 mV 1g. RMS signalo konvertavimas į virpesių pagreitį ir jos priklausomybė nuo darbo valandų nurodoma grafike 3.8 paveiksle. Maksimalaus virpesių piko reikšmės konvertuotos į virpesių pagreitį priklausomybė nuo darbo valandų nurodoma 3.9 paveikslo grafike.

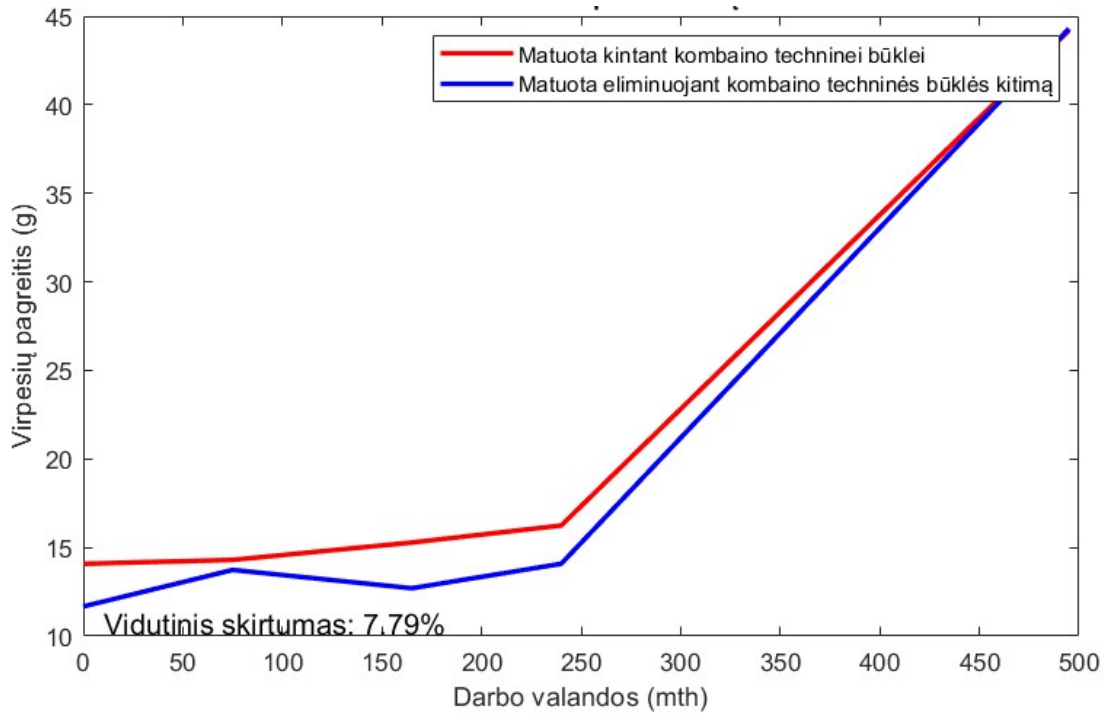


**3.8 pav.** Virpesių pagreičio reikšmės priklausomybės nuo darbo valandų skaičiaus priklausomybės grafikas



**3.9 pav.** Maksimalaus virpesių piko reikšmės konvertuotos į virpesių pagreičio priklausomybės nuo darbo valandų grafikas

Atliekamas matavimo duomenų palyginimas kai buvo matuojami virpesiai kintant kombaino techninei būklei ir atlikus atskirą matavimą kurio metu buvo eliminuotas kombaino techninės būklės kitimas. Tam tikslui naudojama programa *Matlab* su kuria RMS reikšmės konvertuojamos į virpesių pagreitį ir sudaromas bendras grafikas, kuris pateikiamas 3.10 pav. ir apskaičiuojamas vidutinis procentinis skirtumas tarp reikšmių.



**3.10 pav.** Grafikų palyginimas

Iš grafiko matoma jog matuojant virpesius su kintančia kombaino technine būkle gaunamas grafiko pasistūmimas y ašimi aukštyn vidutiniškai 7,79 proc., tai reiškia jog kombaino kintanti techninė būklė daro įtaka matavimo rezultatams, tačiau virpesių pagreičio didėjimo tendencija išlieka ta pati.

### 3.1. Tyrimo rezultatų apibendrinimas

Atlikus visus matavimus ir apdorojus gautus duomenis gaunami rezultatai rodo, jog tyrimo pradžioje keliamo hipotezė pasitvirtina – dėl klavišinio javų kombaino šiaudų separavimo principo į šiaudų smulkintuvą netolygiai paduodama šiaudų masė įtakoja netolygų smulkintuvo peilių nudilimą, dėl kurio atsiranda veleno disbalansas. Matuojamo veleno disbalanso dažnio signalas stiprėja didėjant peilių darbo valandų skaičiui, o signalo pikų dažnis sutampa su veleno sūkių dažniu, iš ko daroma išvada, kad dėl netolygaus peilių nudilimo atsiranda masės disbalansas. Palyginus dviejų matavimų rezultatus kur virpesiai matuojami kintant techninei būklei ir nekintant techninei būklei gaunamas grafikas rodo, jog virpesių pagreičio reikšmės kitimo tendencija išlieka ta pati, o riba nuo kurios prasideda staigus virpesių signalo stiprėjimas yra 360 darbo valandos. Šios ribos negalima taikyti vienodai visiems javų kombainų smulkintuvams, nes peilių dilimas yra individualus ir priklauso nuo darbo sąlygų. Tirtu javų kombaino kulių kultūrų didžiąją dalį (50 proc.) sudaro žieminiai kviečiai, kurių išgulimas siekė apie 3 procentus, žieminiai rapsai sudarė 40 procentų nuimamo derliaus, ir 10 procentų nuimamo derliaus sudarė žirniai. Sparčiausiai peiliai dyla kuliant išgulusius javus ir žirnius dėl jų stiebų užterštumo abrazyvinėmis dalelėmis, todėl ūkiuose kur išgulusių javų ir žirnių nuimamo derliaus dalies pasiskirstymas yra didesnis, peiliai tą patį nudilimą ir disbalansą pasieks per mažesnę darbo valandų skaičių, todėl smulkintuvo konstrukcijos stiprinimas neduos naudos ūkininkams, todėl siūloma įdiegti į kombainą virpesių monitoringo sistemą.

## 4. Smulkintuvo virpesių monitoringo sistema

### 4.1. Virpesių monitoringo sistemos naudojimo pagrindimas

Literatūros analizė parodė, kad tradiciniai metodai, skirti nustatyti peilių nudilimą ir veleno disbalansą, ne visada yra patikimi ir efektyvūs. Peilių nudilimas yra netolygus, o jo nudilimą sunku prognozuoti, dėl to atsiranda veleno disbalansas. Atlikus smulkintuvo virpesių tyrimą, nustatyta, kad veleno virpesiai tiesiogiai priklauso nuo smulkintuvo peilių nudilimo būklės. Apibendrinus literatūros analizės ir atliktų tyrimų rezultatus, išryškėjo būtinybė įdiegti integruotą virpesių diagnostinę sistemą, skirtą stebėti smulkintuvo veleno disbalansą ir riedėjimo guolių būklę.

Remiantis šiais duomenimis, siūloma įdiegti integruotą diagnostinę sistemą, kuri nuolat stebės smulkintuvo rėmo virpesius, pagal kuriuos galima spręsti apie riedėjimo guolių ir peilių būklę. Šią sistemą sudarys virpesių jutikliai ir programinė įranga, kuri apdoros gaunamus jutiklių signalus, juos perskaičiuos į virpesių pagreičio reikšmę, kuriai pasiekus 20 g ribą (tyrimo metu nustatyta virpesių pagreičio vertė po 360 darbo valandų) kombaino valdymo ekrane bus įjungiamas perspėjimas operatoriui apie smulkintuvo techninės būklės

### 4.2. Diagnostinės sistemos sandara

Diagnostinę sistemą sudarys du FATRI firmos jutikliai AYDC04, kurie virpesius matuoja viena ašimi (žr. 4.1 pav.). Jutikliai parenkami vienos ašies o ne trijų ašių todėl, nes vienos ašies jutikliai yra pigesni, ir tyrimo metu buvo naudojamas vienos ašies jutiklis su kuriuo buvo surasta ašis, kurioje virpesiai dominuoja, todėl vienos ašies jutiklio naudojimas šioje situacijoje yra priimtinas. Jutikliai tvirtinami abejose smulkintuvo pusėse ties guoliavietėmis. Smulkintuvo pavaros pusėje jutiklis tvirtinamas pagal literatūros analizėje apžvelgto tyrimo rekomendacijas taške L1 (žr. 1.8 pav.). Kitoje pusėje jutiklis tvirtinamas tame taške, kuris buvo pasirinktas magistro tyrimo metu  $x$  ašyje (žr. 2.6 pav.). Sistemos schema nurodoma 4.3 paveiksle.



4.1 pav. Virpesių jutiklis [33]

Jutikliai prijungiami prie kombaino esančio elektroninio valdymo bloko (žr. 4.2 pav. a)), kuriame apdorojami signalai iš kombaino sumontuotų apsisukimų jutiklių. Šis blokas perduoda duomenis į kombaino centrinį valdymo terminalą, kurio ekrane rodomi pranešimai apie kombaino gedimus (žr. 4.2 pav. b)).

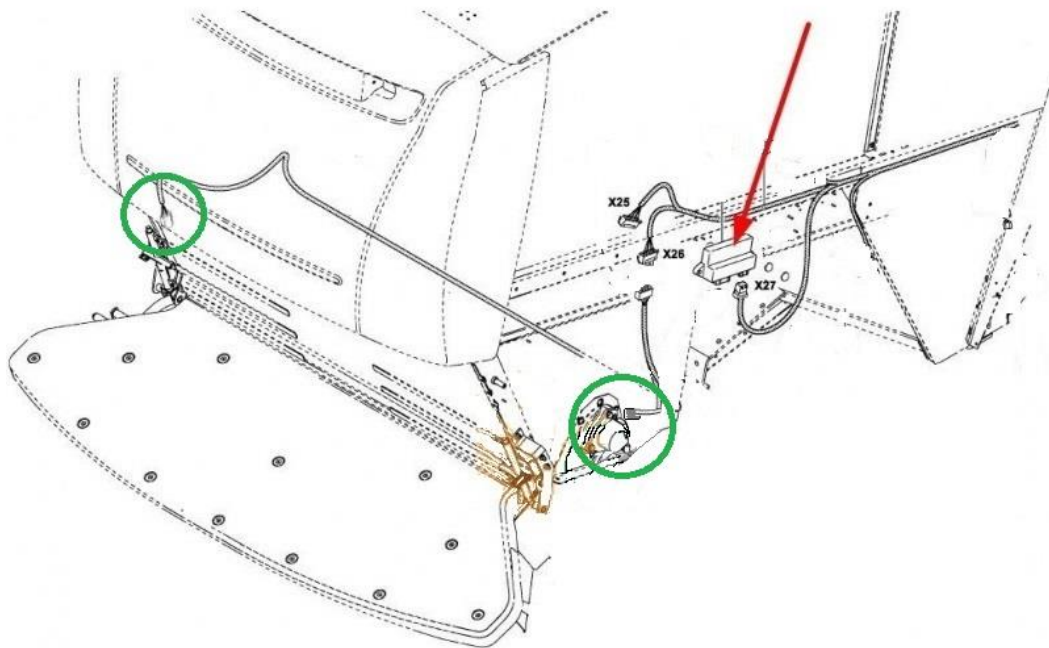


a)



b)

**4.2 pav.** Monitoringo sistemos komponentai. Kombaino elektroninis valdymo blokas a) ir kombaino valdymo terminalas b)



**4.3 pav.** Jutiklių ir valdymo bloko montavimo schema. Jutikliai pažymėti žaliais apskritimais, valdymo blokas pažymėtas raudona rodykle

### 4.3. Sistemos fiksuojami dažniai ir veikimo principas

Diagnosticinė sistema skirta fiksuoti smulkintuvo rėmo virpesius kuriuos sukelia nudilę peiliai ir riedėjimo guolių defektai. Riedėjimo guolių, kurie montuojami javų kombaino šiaudų smulkintuve defekto dažnis yra 66,7 Hz [2]. Sistemos valdymo blokas suprogramuojamas taip, jog užfiksavus guolio defekto dažnį kombaino valdymo terminale atsirastų pranešimas apie gedimą, taip pat sistema skaičiuotų sistemos signalų RMS, šią reikšmę konvertuotų į virpesių pagreitį ir kai virpesių pagreičio reikšmė pasieks 20 g būtų rodomas perspėjamasis ženklas kombaino valdymo terminalo monitoriuje apie rekomenduojamą sistemos remontą.

#### **4.4. Monitoringo sistemos savikainos skaičiavimas**

Atlikus tyrimą ir gavus rezultatus svarbu yra apskaičiuoti kokį ekonominį efektą sukuria šis darbas. Skaičiuojama tyrimui sunaudotų medžiagų kaina, siūlomos monitoringo sistemos kaina ir ekonominė nauda, kurią gali gauti ūkininkas įdiegęs šią sistemą į savo derliaus dorojimo mašinas ir išvengęs nenumatytos technikos prastovos.

##### **4.4.1. Tyrimui sunaudotų medžiagų ekonominės sąnaudos**

Originaliomis Claas kombainų atsarginėmis dalimis Lietuvoje prekiauja vienintelis oficialus atstovas UAB „Baltic agro machinery“. Vieno smulkinimo peilio kaina yra 9,95 Eur. su PVM. Vieną smulkintuvo peilių komplektą sudaro 80 peilių kurie montuojami ant rotorius ir 80 peilių kurie montuojami į priešpeilių vietas, taigi vieną komplektą sudaro 160 peilių, o komplekto kaina 1592 Eur. Tyrimui buvo perkami penki peilių komplektai, kurių bendra kaina yra 7960 Eur.

##### **4.4.2. Monitoringo sistemos kaina**

Norint įdiegti virpesių monitoringo sistemą papildomai pirkti reikia du virpesių jutiklius ir jų prijungimo kabelius. Atskiro valdymo bloko ir monitoriaus pirkti nereikia, nes kombainas juos turi, taigi reikės papildomai suprogramuoti monitoringo sistemos funkcijas. Jutiklių su laidais bendra kaina 238,69 Eur. Jutiklių montavimo darbų valandinis įkainis yra 30 Eur/val. Šis darbas preliminariai gali užtrukti iki 3 valandų. Sistemos perprogramavimo preliminari kaina yra 1500 Eur. Bendra sistemos kaina yra 1828,69 Eur.

##### **4.4.3. Monitoringo sistemos ekonominė nauda**

Dėl žemės ūkyje auginamų augalų derliaus nuėmimo specifikos tiksliai apskaičiuoti nuostolius kurie atsiranda dėl derliaus dorojimo mašinos prastovos yra neįmanoma, tačiau galima įvertinti rizikos faktorius kurie atsiranda dėl laiku nenuimto derliaus:

- Laiku nenuimto derliaus kokybiniai parametrai krenta dėl lietaus daromos žalos. Skirtumas tarp ekstra klasės ir žemiausios klasės kviečių supirkimo kainos yra vidutiniškai 40 Eur. už toną, taigi jei kombainas per vieną darbo dieną nuima 200 tonų kviečių derliaus, tai pardavus suprastėjusios kokybės derlių gaunamas 8000 Eur. nuostolis kiekvieną pavėluotą derliaus dorojimo dieną.
- Atsitikus stichiniams gamtos reiškiniams, tokiems kaip stiprus vėjas, kruša ar liūtis, augalai yra išguldomi, krenta jų derliaus kokybė, ir atsiranda derliaus nuostoliai, kurie gali siekti iki 90 proc. dėl to, jog tampa neįmanoma surinkti ant žemės paguldytų javų derliaus. Taigi jei derliaus dorojimo mašina yra prastovoje, ir nutinka stichinis gamtos reiškinys, dėl kurio nespėjama surinkti derliaus, jis gali būti prarastas.
- Tyrimo metu tirtas javų kombainas per dieną vidutiniškai nukulia 30 hektarų. Esant kombainui prastovoje galima samdyti kūlimo paslaugą, kurios rinkos kaina yra apie 90 Eur/ha, taigi per vieną prastovos dieną galima patirti 2700 Eur. nuostolių.
- Dėl virpesių daromos žalos riedėjimo guoliams šie gali sugesti. Smulkintuvo rotorius guolių keitimo darbo laikas yra 3 valandos, o oficialaus technikos atstovo serviso darbų valandinis įkainis yra 30 Eur/val. papildomai patiriamos išlaidos dėl remontui sunaudojamu atsarginių detalių kainos, papildomai reikia įvertinti prastovos laiką.

Sunku prognozuoti, kuris rizikos faktorius paveiks konkretų ūkininką, tačiau kombaino prastovas dėl šiaudų smulkintuvo gedimų galima išvengti naudojant siūlomą virpesių monitoringo sistemą, kurios pagalba bus galima planuoti remonto darbus patogiu laiku, jog neįvyktų prastova tuomet, kai derliaus dorojimo mašina turi dirbti. Šios sistemos nauda taip pat aktuali įmonėms kurios teikia kūlimo ir kombainų nuomos paslaugas, kadangi šios įmonės turi dešimtis kombainų, kurie dirba skirtingomis sąlygomis, taigi visuose juose dilimai pasireiškia skirtingai, ir virpesių monitoringas leis išnaudoti peilių resursą kiekvienai mašinai maksimaliai ilgai pagal individualias sąlygas, kas leis sutaupyti ekonominius resursus ir užtikrinti tinkamą kiekvienos atskiros derliaus dorojimo mašinos smulkintuvų techninę būklę.

Atsižvelgus į žemės ūkyje egzistuojančius rizikos faktorius matoma akivaizdi šios monitoringo sistemos ekonominė nauda.

## Išvados

1. Atlikta literatūros analizė rodo, jog smulkintuvų peiliai dyla netolygiai dėl klavišinio tipo javų kombaino netolygaus šiaudų masės padavimo į šiaudų smulkintuvą, ir dėl netolygaus nudilimo ant smulkintuvo veleno atsiranda disbalansas, kuris yra žalingas kombaino konstrukcijai. Apžvelgtuose moksliniuose javų kombainų techninės būklės tyrimuose yra pabrėžiama būtinybė kurti neardomosios diagnostikos sistemas, kurios leistų iš anksto diagnozuoti defektus. Moksliniuose javų kombainų tyrimuose naudojamas vibroanalizės metodas, kuris pasirenkamas atliekant magistro darbo tyrimą.
2. Magistro tyrimo metodika sudaroma taip, jog būtų gaunami duomenys esant kintamai javų kombaino techninei būklei ir eliminuojant šį veiksni. Dviem etapais gaunami duomenys yra tarpusavyje palyginami ieškant bendrų duomenų kitimo tendencijų.
3. Atlikto tyrimo metu gauti duomenys rodo, jog skirtumas tarp matavimų esant kintamai kombaino techninei būklei ir eliminavus techninės būklės kitimo įtaką yra vidutiniškai 7,79 proc. tačiau virpesių pagreičio kitimo tendencija išlieka ta pati – didėjant darbo valandų skaičiui peilių sukeliama virpesiai stiprėja, taigi tyrimo hipotezė yra patvirtinama. Atlikus matavimus nustatyta, jog virpesiai pradeda ryškiai didėti kai peiliai išdirba 360 valandų. Intervale nuo 0 iki 360 darbo valandų virpesių pagreičio vertė pakyla 6,16 g, o intervale nuo 360 iki 490 virpesių pagreičio vertė pakyla 23,96 g. Pagal tai sprendžiama, jog šiuo atveju 360 darbo valandų yra ta riba, nuo kurios reikia planuoti techninį smulkintuvo aptarnavimą.
4. Visi javų kombainai apdoroja skirtingą derlių ir jų peilių dilimai yra individualūs, todėl šiame magistro darbe yra siūloma diegti virpesių monitoringo sistemą, kuri signalizuos operatoriui apie smulkintuvo techninės būklės pasikeitimą. Atsižvelgiant į tyrimo metu gautus rezultatus, rekomenduojama, jog monitoringo sistema konvertuotų vidutinę signalo stiprumo vertę RMS į virpesių pagreitį ir smulkintuvo virpesiams pasiekus 20 g (tyrimo metu tai atitinka po 360 valandų pasiektą 101,2 mV vertę) virpesių pagreičio ribą įsijungtų perspėjamasis pranešimas operatoriui. Ši siūloma monitoringo sistema yra neardomosios diagnostikos tipo, kuri padės vertinti smulkintuvo būklę jo neišardžius.

## Literatūra

1. JING-HUI P., QIANG W., YING-DONG Z. 2018. Vibration Problems and Application of Vibration Reduction System in Engineering. International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering.
2. JOTAUTIENĖ E., JUOSTAS A., JANULEVIČIUS A., ABOLTINS A. 2019 Evaluation of bearing reliability of combine harvester straw chopper. Engineering for rural development.
3. BANLAKI P., MAGOSI Z. 2009. Part failure diagnosis for internal combustion engine using noise and vibration analysis. Transportation Engineering.
4. YANCHUN Y., ZHENGHE S., YUEFENG D., XUEYAN Z., ENRONG M., FAN L. Analysis of vibration characteristics and its major influenced factors of header for corn combine harvesting machine. Agricultural Engineering
5. CHEN S., ZHOU Y., TANG Z., LU S. 2020. Modal vibration response of rice combine harvester frame under multi-source excitation. Agricultural Engineering.
6. BRUSA E. 2020. Design of a kinematic vibration energy harvester for a smart bearing with piezoelectric/magnetic coupling. Mechanics of Advanced Materials and Structures.
7. TANG, Z., ZHANG, H., ZHOU, Y. 2018. Unbalanced Vibration Identification of Tangential Threshing Cylinder Induced by Rice Threshing Process. Mechanical engineering.
8. ISO standartas [interaktyvus], [žiūrėta 2024 – 01 – 02]. Prieiga per internetą: <https://www.iso.org/standard/7612.html>
9. ISO standartai [interaktyvus], [žiūrėta 2024 – 01 – 02]. Prieiga per internetą: <https://www.iso.org/standard/1743.html>
10. SHIYAN A. A., DRUZHININ N. N., KARANDAEVA O. I., SARLYBAEV A. A., ANTROPOVA L. I. 2019. Vibration-Based Monitoring of Electrotechnical Systems of an Iron-and-Steel Enterprise. Electrical Power Engineering
11. SHAH H. S., PATEL P. N., SHAH S. P., THAKKER M. T. 2014. Cost Effective Low Power Vibration Monitoring System. Electrical engineering.
12. WANG X., CAO Y., FANG W., SHENG H. 2023. Vibration Test and Analysis of Crawler Pepper Harvester under Multiple Working Conditions. Agricultural engineering.
13. ZHANG J., GUO P., LIN J., WANG K. 2015. A mathematical model for coupled vibration system of road vehicle and coupling effect analysis. Applied Math.
14. HATCH M. R. 2000. Vibration simulation using Matlab and Ansys.
15. BHANDARI S., JOTAUTIENĖ E. 2022. Vibration Analysis of a Roller Bearing Condition Used in a Tangential Threshing Drum of a Combine Harvester for the Smooth and Continuous Performance of Agricultural Crop Harvesting. Agricultural engineering.
16. ALI M., LEE Y. S., CHOWDHURY M., ALI KHAN N., SWE K. M., RASOOL K., KABIR M. S. N., LEE D. H., CHUNG S. O. 2021. Analysis of Driving Stability and Vibration of a 20-kW Self-Propelled 1-Row Chinese Cabbage Harvester. Agricultural engineering.
17. ARLAUSKIENĖ A., MAIKŠTĖNIENĖ S., ŠLEPETIENĖ A. 2009 Tarpinių pasėlių ir šiaudų įtaka vasarinių miežių mitybai azotu bei dirvožemio humuso sudėčiai. Žemdirbystė, t.96, Nr.2, p. 53-70.
18. CHEN L., SUN S., YAO B., PENG Y., GAO C., QIN T., ZHOU Y., SUN C., QUAN W. 2022. Effects of straw return and straw biochar on soil properties and crop growth: A review. Frontiers in Plant Science, Vol. 13. [https://doi: 10.3389/fpls.2022.986763](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.986763)

19. HASHEM F. R., IBRAHIM M. M., NASR G. M. 2022. Modification of a machine for chopping rice straw using circular saw. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, Vol. 24(4), p. 230–243.
20. XU G., XIE Y., MATIN M.A., HE R., DING Q. 2022. Effect of straw length, stubble height and rotary speed on residue incorporation by rotary tillage in intensive rice–wheat rotation system. *Agriculture*, Vol. 12, ID 222.
21. DE BOER I. J. M., VAN ITTERSOM M.K., 2018. Circularity in Agricultural Production [interaktyvus]. Wagenigen University & Research. [Žiūrėta 2024-03-29]. Prieiga per internetą: <[https://www.wur.nl/upload\\_mm/7/5/5/14119893-7258-45e6-b4d0-e514a8b6316a\\_Circularity-in-agricultural-production-20122018.pdf](https://www.wur.nl/upload_mm/7/5/5/14119893-7258-45e6-b4d0-e514a8b6316a_Circularity-in-agricultural-production-20122018.pdf)>.
22. BRAZAITIS G. Trašų rinkos apžvalga. [interaktyvus], [žiūrėta 2024 – 01 – 02]. Prieiga per internetą: <https://www.agrochema.lt/naujienos/trasu-rinka/>
23. ŽIUKAS K. 2022. Šiaudų smulkintuvo parametrų įtaka šiaudų apdorojimo kokybei. *Mechanikos inžinerija*.
24. XU, L., CHE, Y., ZHU, R., ZHU, J., ZHANG, R. 2021. Design and Simulation of Chopping Device of Straw Returning Machine. *In Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1748, No. 6, p. 062066. IOP Publishing.
25. ARBUTIS. R., JANKAUSKAS V. 2023 Javų kombainų šiaudų smulkintuvo peiliukų tyrimas. *Agriculture Engineering*
26. HUTCHINGS I., SHIPWAY P. 2017. Friction and Wear of Engineering Materials. *Wear by hard particles*, p. 165–236.
27. KLEIS I., KULU P. 2007. Solid Particle Erosion: Occurrence, Prediction and Control. London: Springer-Verlag, 215 p. <https://doi.10.1007/978-1-84800-029-2>
28. JANKAUSKAS V., ABRUTIS R., ŽUNDA A., GARGASAS J. 2023 Wear Study of Straw Chopper Knives in Combine Harvesters. *Applied sciences*
29. SAASTAMOINEN A. 2020. Processing and microstructure of direct-quenched and tempered ultra-high strength steels. (Doctoral dissertation, University of Oulu)
30. Kombaino besisukančių mazgų schema [interaktyvus], [žiūrėta 2024 – 01 – 02]. Prieiga per internetą: <https://www.explainthatstuff.com/howcombineharvesterswork.html>
31. Smulkintuvo schema [interaktyvus], [žiūrėta 2024 – 01 – 02]. Prieiga per internetą: [https://www.youtube.com/watch?v=i1nkX\\_S1wNU](https://www.youtube.com/watch?v=i1nkX_S1wNU)
32. Claas lexion smulkintuvo vaizdas. [interaktyvus], [žiūrėta 2024 – 01 – 02]. Prieiga per internetą: <https://agroparts.us/articles/combine-harvesters/claas-lexion-670-650>
33. Virpesiu jutiklis [interaktyvus], [žiūrėta 2024 – 01 – 02]. Prieiga per internetą: <https://www.directindustry.com/prod/fatri-france/product-234740-2360677.html>

## Priedai

### 1 priedas. Matlab kodas RMS konvertavimui į virpesių pagreitį:

```
% Nuskaitome duomenis iš failo
try
    data = xlsread('rms ir pikai.xlsx');
catch ME
    disp('Klaida skaitant duomenis iš Excel failo:');
    disp(ME.message);
    return; % Išėiti iš skripto arba funkcijos
end

% Pasirenkame duomenis iš stulpelių
valandos = data(:, 1); % Darbo valandos
rms_mV = data(:, 2); % RMS itampa mV
max_pikas_V = data(:, 3); % Maksimalus piko itampa V

% Konvertuojame RMS itampą į virpesių pagreitį pagal akselerometro parametrus
sensitivity_mV_g = 5; % Jūsų akselerometro jautrumas mV/g
sensitivity_V_g = sensitivity_mV_g / 1000; % Konvertuojame mV į V
sensitivity_mg_g = 1000; % Jūsų akselerometro jautrumas mg/g
virpesiu_pagreitis_g = rms_mV / sensitivity_V_g; % Virpesių pagreitis g

% Konvertuojame maksimalų piką iš V į g
max_pikas_g = max_pikas_V / sensitivity_V_g; % Maksimalus piko virpesių pagreitis g

% Braižome grafiką: kaip kinta virpesių pagreitis nuo darbo valandų
figure;
plot(valandos, virpesiu_pagreitis_g, '-b', 'LineWidth', 2);
xlabel('Darbo valandos');
ylabel('Virpesių pagreitis (g)');
title('Virpesių pagreitis nuo darbo valandų');

% Braižome grafiką: kaip kinta maksimalus pikas virpesių pagreityje nuo darbo valandų
figure;
plot(valandos, max_pikas_g, '-r', 'LineWidth', 2);
xlabel('Darbo valandos');
ylabel('Maksimalus piko virpesių pagreitis (g)');
title('Maksimalus piko virpesių pagreitis nuo darbo valandų');
```

## 2 priedas. Matlab kodas RMS reikšmių konvertavimui į virpesių pagreitį ir duomenų palyginimui atskiruose matavimuose:

```
% Nuskaityti duomenis iš Excel failo
data = xlsread('palyginimas.xlsx');

% Atskirti duomenis į atskirus stulpelius
hours = data(:, 1); % Laiko momentai
rms_kitimas = data(:, 2); % Matuota kintant kombaino techninei būklei (RMS mV)
rms_eliminojant = data(:, 3); % Matuota eliminuojant kombaino techninės būklės kitimą (RMS mV)

% Akselerometro jautrumas (mV/g)
sensitivity = 5; % 5 mV per g

% Konvertuoti RMS vertes iš mV į virpesių pagreitį (g)
acceleration_kitimas = rms_kitimas / sensitivity;
acceleration_eliminojant = rms_eliminojant / sensitivity;

% Nubrėžti grafikus
figure;
plot(hours, acceleration_kitimas, 'r', 'LineWidth', 2); % Pirmojo signalo grafikas
hold on;
plot(hours, acceleration_eliminojant, 'b', 'LineWidth', 2); % Antrojo signalo grafikas
xlabel('Darbo valandos (mth)');
ylabel('Virpesių pagreitis (g)');
title('Skirtumas tarp matavimų');
legend('Matuota kintant kombaino techninei būklei', 'Matuota eliminuojant kombaino techninės būklės kitimą');

% Pridėti procentinį skirtumą į grafiką
average_difference = mean(abs(acceleration_kitimas - acceleration_eliminojant));
average_percent_difference = (average_difference / mean([acceleration_kitimas;
acceleration_eliminojant])) * 100;
text(0.02, 0.02, sprintf('Vidutinis skirtumas: %.2f%%', average_percent_difference),
'Units', 'normalized', 'FontSize', 12, 'HorizontalAlignment', 'left');

% Užbaigti grafiko piešimą
hold off;

% Išsaugoti grafiką
saveas(gcf, 'matavimu_kitimas.png');
```

### 3 priedas. Matlab kodas RMS reikšmių konvertavimui į virpesių pagreitį ir grafiko sudarymui:

```
% Nuskaitykite duomenis iš Excel failo
data = xlsread('pagreitis.xlsx');

% Pirmas stulpelis - darbo valandos
work_hours = data(:, 1);

% Antras stulpelis - akselerometru fiksuotos virpesiu itampos vertes (mV)
voltage_mV = data(:, 2);

% Akselerometro jautrumas (mV/g)
sensitivity = 5; % 5 mV per g

% Konvertuokite signalo itampas iš mV į virpesių pagreitį g
acceleration_g = voltage_mV / sensitivity;

% Nubrėžkite grafiką
figure;
plot(work_hours, acceleration_g, '-o');
xlabel('Darbo valandos');
ylabel('Virpesiu pagreitis (g)');
title('Virpesiu pagreicio kitimo priklausomybe nuo darbo valandu');
grid on;
```