



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

# **Elektrinio variklio aušinimo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Justas Meškuotis**  
Projekto autorius

**Doc. Darius Juodvalkis**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2023**



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

## **Elektrinio variklio aušinimo tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

---

**Justas Meškuotis**

Projekto autorius

**Doc. Darius Juodvalkis**

Vadovas

**Prof. Laurencas Raslavičius**

Recenzentas

---

**Kaunas, 2023**



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

## **Elektrinio variklio aušinimo 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.

Justas Meškuotis

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



Kaunas technologijos universitetas  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## Baigiamojo magistro projekto užduotis

Išduota studentui (-ei) – Justas Meškuotis

### 1. Projekto tema

Elektrinio variklio aušinimo tyrimas

*(Lietuvių kalba)*

Electric Motor Cooling Study

*(Anglų kalba)*

### 2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Tyrimo tikslas - nustatyti elektromobilio variklio skirtingų konstrukcijų įtaką jo naudingumui ir aušinimo efektyvumui.

Uždaviniai:

1. atlikti literatūros analizę apie skirtingus elektrinių variklių aušinimo būdus, išnagrinėti kaip skirtingos variklio konstrukcijos medžiagos įtakoja variklio aušinimą ir naudingumą;
2. nustatyti aušinimo sistemos efektyvumą;
3. ištirti variklio rotoriaus medžiagos įtaką variklio aušinimui;
4. ištirti variklio apvijų saugančios epoksidinės dervos įtaką variklio aušinimui;
5. išnagrinėti skirtingų konstrukcijų variklių naudingumus;
6. parengti išvadas ir pasiūlymus elektrinio variklio aušinimo tobulinimui.

### 3. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos

Tyrimas atliekamas esant skirtingoms apkrovoms, visi variklio aušinimo tyrimo variantai atliekami naudojant tą patį ciklą.

### 4. Papildomi reikalavimai projektui, ataskaitai ir jos priedams

Netaikoma

Projekto autorius

Justas Meškuotis

*(Vardas, Pavardė)*

2023-02-14

*(Data)*

Projekto vadovas

Doc. Darius Juodvalkis

*(Vardas, Pavardė)*

2023-02-14

*(Data)*

Krypties studijų programų  
vadovas

Doc. Saulius Japertas

*(Vardas, Pavardė)*

2023-02-14

*(Data)*

Meškuotis, Justas. Elektrinio variklio aušinimo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Darius Juodvalkis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: elektrinis variklis, statorius, rotorius, epoksidinė derva, aušinimas, aušinimo sistema.

Kaunas, 2023. 59 p.

## Santrauka

Šiame darbe aprašomas elektrinio variklio aušinimo tyrimas. Populiarėjant elektromobiliams vis dažniau kyla įvairios su jais susijusios problemos, viena iš jų – elektrinio variklio perkaitimas. Perkaitęs elektrinis variklis yra mažiau efektyvus, sumažėja jo galia, variklis gali sugadinti ir kitus brangius bei ypač svarbius komponentus elektromobilyje, o svarbiausia – perkaitintas variklis gali kelti grėsmę vairuotojui, keleiviams ir aplinkiniams, todėl užtikrinti tinkamą variklio aušinimą yra ypatingai svarbu. Tyrimo tikslas yra išnagrinėti kaip skirtingos variklio konstrukcijos įtakoja elektrinio variklio naudingumą bei aušinimą. Išsikeliami tyrimo tikslai, tokie kaip: atlikti literatūros analizę apie skirtingus elektrinių variklių aušinimo būdus bei naudojamas aušinimo priemones, išnagrinėti aušinimo priklausomybes nuo variklio konstrukcijos, medžiagų, ištirti variklio rotoriaus medžiagos įtaką variklio aušinimui, ištirti variklio apvijų saugančios epoksidinės dervos įtaką variklio aušinimui, išnagrinėti skirtingų konstrukcijų variklių naudingumus, parengti išvadas ir pasiūlymus elektrinio variklio aušinimo tobulinimui. Bandymai atliekami nustatant maksimalią srovę varančiajam varikliui ir keičiant srovę stabdančiajam varikliui, siekiant susimuliuoti kintančią varančiojo variklio apkrovą nuo minimalios iki maksimalios apkrovos. Bandymų metu keičiamos variklio sudedamosios dalys – rotorius ir epoksidinė derva. Tiek rotoriaus, tiek epoksidinių dervų medžiagos pasižymi skirtingomis charakteristikomis, todėl tyrimo metu bus siekiama nustatyti, kaip skirtingos medžiagos variklio konstrukcijoje įtakoja elektrinio variklio aušinimą. Tyrimas atliekamas siekiant nustatyti geriausią variklio aušinimo būdą, kuomet jie yra eksploatuojami viešojo susisiekimo arba krovinių išvežimo tikslais. Variklių eksploatavimo ciklai yra miesto ciklai, jiems nereikalingas didelis maksimalus greitis, tačiau, būtinas didelis sukimo momentas ir galia. Varikliai yra gaminami serijiniu būdu, todėl variklio kaina turi būti sąlyginai maža, variklio konstrukcija turi būti nesudėtinga, lengvai ir greitai surenkama. Remiantis rezultatais identifikuojamos aušinimo sistemos arba variklio konstrukcijos problemos, formuluojamos išvados, pateikiami pasiūlymai nustatytoms problemoms spręsti. Iš gautų rezultatų identifikuotos problemos: nepakankamai efektyvi aušinimo sistema, blogai parinkti statoriaus aušinimo kanalai, variklio gamyboje naudojamos medžiagos turi per mažą šiluminį laidumą, blogai parinkti variklio valdymo parametrai. Tyrimo metu nustatyta, jog keičiant variklio konstrukcijos sudedamąsias dalis, kurios pasižymi geresnėmis šilumos laidumo savybėmis, galima išgauti apie 3 °C skirtumą tarp geriausiai ir prasčiausiai aušinamų konstrukcijų. Nustatyta, jog variklis su variniu rotoriumi visais atvejais dirba apie 4 % naudingiau už variklį su aliuminiu rotoriumi. Remiantis gautais rezultatais suformuluojamos rekomendacijos: atlikti variklio generuojamos šilumos skaičiavimus įvertinant visų naudojamų medžiagų charakteristikas. Pagal gautus rezultatus nustatyti statoriui reikalingos formos aušinimo kanalus bei aušinimo sistemai reikalingą srautą, kad aušinimo sistema būtų efektyvi. Atlikti tyrimą naudojant aušinimo skysčio ir alyvos aušinimo sistemos derinį ir įvertinti

kaip alyva įtakoja variklio aušinimą. Sprendžiant iš teorinių sprendimų analizės galima daryti prielaidą, jog alyva, aušinanti variklio rotorių, ženkliai sumažintų variklio terminę inerciją. Padaryti reikiamas korekcijas variklio valdymo parametrų. Teisingai sureguliuoti parametrai sumažins variklio apkrovą, kuri įtakoja variklio naudingumą bei šilumos generavimą.

Meškuotis, Justas. Electric Motor Cooling Study. Masters's Final Degree Project / supervisor Assoc. Prof. Darius Juodvalkis; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering Science.

Keywords: electric motor, stator, rotor, epoxy resin, cooling, cooling system.

Kaunas, 2023. 59 pages.

### **Summary**

This paper describes the study of electric motor cooling. As the popularity of electric cars increases, various problems related to them arise, one of them is overheating of the electric motor. An overheated engine is less efficient with its electrical power, the engine can damage other expensive and extremely important components in the electric car, and most importantly, an overheated engine can pose a threat to the driver, passengers, and others, so proper engine cooling is extremely important. The purpose of the study is to examine how the engine design affects the efficiency and cooling of the electric motor. To examine the objectives of the study: to conduct a literature analysis on such methods of cooling electric motors and the cooling means used, to examine the dependence of cooling on the motor design, material, motor rotor material for motor cooling, motor winding, protective epoxy resin for motor cooling, to examine the usefulness of structural motors, to draw conclusions and proposals for the improvement of electric motor cooling. The tests are performed by setting the maximum current to the driving motor and varying the current to the braking motor to simulate the varying load on the driving motor from minimum to maximum load. During the tests, the components of the motor are changed - rotor and epoxy resin. Both rotor and epoxy resin materials have distinct characteristics, so the research will aim to determine how different materials in the motor structure affect the cooling of the electric motor. The study is conducted to determine the best way to cool the engine when they are used for public transportation or cargo transportation purposes. The operating cycles of the engines are urban cycles, they do not require high top speed, but high torque and power are required. Engines are produced in series, so the price of the engine must be low, the engine design must be simple, easy and quick to assemble. Based on the results, the problems of the cooling system or engine design are identified, conclusions are formulated, and proposals are made to solve the identified problems. Problems identified from the obtained results: insufficiently effective cooling system, poorly selected stator cooling channels, materials used in motor production have too low thermal conductivity, poorly selected motor control parameters. During the study, it was found that by changing the components of the engine structure, which are characterized by better thermal conductivity properties, it is possible to obtain a difference of about 3 °C between the best and worst cooled structures. A motor with a copper rotor has been found to perform about 4% more efficiently than a motor with an aluminum rotor in all cases. Recommendations are formulated based on the obtained results: perform calculations of the heat generated by the engine by evaluating the characteristics of all materials used. According to the obtained results, determine the cooling channels of the shape required for the stator and the flow required for the cooling system, so that the cooling system is efficient. Conduct a study using a combination of coolant and oil cooling system and evaluate how the oil affects engine cooling. Judging from the analysis of theoretical solutions, it can be assumed that the oil cooling the motor rotor would significantly reduce the thermal inertia of the motor. Make the necessary corrections to

the engine control parameters. Correctly adjusted parameters will reduce the engine load, which affects the engine's efficiency and heat generation.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>10</b>
<b>Santrumpų ir terminų sąrašas .....</b>	<b>12</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>13</b>
<b>1. Situacijos analizė .....</b>	<b>14</b>
1.1. Problema.....	14
1.2. Problemos priežastys .....	14
1.3. Problemos pasekmės .....	15
1.4. Problemos sprendimas.....	17
<b>2. Teorinis sprendimų pagrindimas.....</b>	<b>20</b>
2.1. Elektrinio variklio tipo parinkimas.....	20
2.2. Variklio aušinimo parinkimas .....	22
2.3. Rotoriaus medžiagos įtaka.....	26
2.4. Statoriaus apvijų izoliavimas.....	26
<b>3. Tyrimo rezultatai.....</b>	<b>29</b>
3.1. Tyrimo metodika, pradinės tyrimo sąlygos .....	29
3.2. Pirmas bandymas. 17,5 kW apkrova .....	35
3.3. Antras tyrimas. 35 kW apkrova.....	37
3.4. Trečias bandymas. 52,5 kW apkrova .....	39
3.5. Ketvirtas bandymas. 70 kW apkrova.....	41
3.6. Penktas bandymas. 87,5 kW apkrova.....	43
3.7. Šeštas bandymas. 105 kW apkrova .....	45
3.8. Septintas bandymas. 122,5 kW apkrova.....	47
3.9. Aštuntas bandymas. 140 kW apkrova .....	49
3.10. Devintas bandymas. 157,5 kW apkrova .....	51
<b>4. Rezultatų apibendrinimas.....</b>	<b>54</b>
<b>Išvados .....</b>	<b>56</b>
<b>Literatūros sąrašas .....</b>	<b>57</b>
<b>Priedai.....</b>	<b>60</b>
1 priedas. MC 622 epoksidinės dervos charakteristikos .....	60
2 priedas. XE 663 epoksidinės dervos charakteristikos .....	61

## Lentelių sąrašas

<b>1 lentelė.</b> Skirtingų tipų variklių privalumai ir trūkumai [33].....	21
<b>2 lentelė.</b> Variklio apvijų izoliacinių medžiagų privalumai ir trūkumai [40] .....	27
<b>3 lentelė.</b> Tyrimui atlikti naudojami parametrai.....	30
<b>4 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos pirmojo bandymo metu.....	37
<b>5 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos pirmojo bandymo metu.....	37
<b>6 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos antrojo bandymo metu .....	39
<b>7 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos antrojo bandymo metu .....	39
<b>8 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos trečiojo bandymo metu .....	41
<b>9 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos trečiojo bandymo metu .....	41
<b>10 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos ketvirtojo bandymo metu.....	43
<b>11 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos ketvirtojo bandymo metu.....	43
<b>12 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos penktojo bandymo metu.....	45
<b>13 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos penktojo bandymo metu.....	45
<b>14 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos šeštojo bandymo metu .....	47
<b>15 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos šeštojo bandymo metu .....	47
<b>16 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos septintojo bandymo metu.....	49
<b>17 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos septintojo bandymo metu.....	49
<b>18 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos aštuntojo bandymo metu.....	51
<b>19 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos aštuntojo bandymo metu.....	51
<b>20 lentelė.</b> Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos devintojo bandymo metu .....	53
<b>21 lentelė.</b> Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos devintojo bandymo metu .....	53
<b>22 lentelė.</b> Aliuminio ir varinio rotoriaus konstrukcijų nuostoliai, naudingumas .....	54
<b>23 lentelė.</b> Iš variklio perduodamų ir aušinimo sistemos nuaušinamų temperatūrų skirtumai .....	54

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Sumažėjusio sukimo momento bei perduodamos srovės pavyzdys [10] .....	15
<b>2 pav.</b> Sumažėjusios galios pavyzdys [10].....	16
<b>3 pav.</b> Nuo trumpo jungimo susidaranti uždara grandinė [12].....	16
<b>4 pav.</b> Išlydyta apvija [12].....	16
<b>5 pav.</b> Skaičiuojamosios skysčio dinamikos (CFD) pavyzdys [23].....	18
<b>6 pav.</b> Šilumos vamzdžių (aušinimo kanalų) pavyzdys [24] .....	18
<b>7 pav.</b> EV variklio su anglies pluošto kompozitais statoriuje bei ašyje pavyzdys [29] .....	19
<b>8 pav.</b> Indukcinio variklio sandara [31] .....	20
<b>9 pav.</b> Perkaitęs variklio korpusas.....	22
<b>10 pav.</b> Indukcinio variklio aušinimo sistemos [36] .....	23
<b>11 pav.</b> a) – lygiagrečiai išdėstyti aušinimo kanalai ; b) – nuosekliai išdėstyti aušinimo kanalai [34] .....	24
<b>12 pav.</b> Apvijų temperatūros priklausomybė nuo kanalų išdėstymo tipo [34] .....	24
<b>13 pav.</b> a) – nuosekliai išdėstytų aušinimo kanalų įtaka statoriaus temperatūrai ; b) – lygiagrečiai išdėstytų aušinimo kanalų įtaka statoriaus temperatūrai [34].....	25
<b>14 pav.</b> Rotoriaus aušinimo sistema [37] .....	25
<b>15 pav.</b> Tyrimams atlikti naudojamas stendas .....	29
<b>16 pav.</b> „Elinta Powertrain Diagnostics“ programinė įranga.....	30
<b>17 pav.</b> Realio laiku įrašinėjami duomenys .....	31
<b>18 pav.</b> Bandymo metu gauta duomenų imtis.....	31
<b>19 pav.</b> Aušinimo sistemos schema .....	32
<b>20 pav.</b> Sukimo momento matavimo prietaiso pavyzdys [43].....	32
<b>21 pav.</b> a) – varinis rotorius ; b) – aliuminis rotorius.....	33
<b>22 pav.</b> a) – XE663 epoksidinė derva ; b) – MC 622 epoksidinė derva .....	33
<b>23 pav.</b> Pirmas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva.....	35
<b>24 pav.</b> Pirmas bandymas - Al rotorius, XE663 derva.....	35
<b>25 pav.</b> Pirmas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva .....	35
<b>26 pav.</b> Pirmas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva .....	36
<b>27 pav.</b> Antras bandymas - Al rotorius, MC 622 derva .....	37
<b>28 pav.</b> Antras bandymas - Al rotorius, XE 663 derva .....	38
<b>29 pav.</b> Antras bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva .....	38
<b>30 pav.</b> Antras bandymas - Cu rotorius, XE 633 derva .....	38
<b>31 pav.</b> Trečias bandymas - Al rotorius, MC 622 derva .....	39
<b>32 pav.</b> Trečias bandymas - Al rotorius, XE 663 derva .....	40
<b>33 pav.</b> Trečias bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva .....	40
<b>34 pav.</b> Trečias bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva .....	40
<b>35 pav.</b> Ketvirtas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva .....	41
<b>36 pav.</b> Ketvirtas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva .....	42
<b>37 pav.</b> Ketvirtas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva .....	42
<b>38 pav.</b> Ketvirtas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva .....	42
<b>39 pav.</b> Penktas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva .....	43
<b>40 pav.</b> Penktas bandymas - Al rotorius, XE 663 dervai .....	44
<b>41 pav.</b> Penktas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva.....	44

<b>42 pav.</b> Penktas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva.....	44
<b>43 pav.</b> Šeštas bandymas - Al rotorius, MC 622 dervai.....	45
<b>44 pav.</b> Šeštas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva.....	46
<b>45 pav.</b> Šeštas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva .....	46
<b>46 pav.</b> Šeštas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva .....	46
<b>47 pav.</b> Septintas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva .....	47
<b>48 pav.</b> Septintas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva .....	48
<b>49 pav.</b> Septintas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva .....	48
<b>50 pav.</b> Septintas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva .....	48
<b>51 pav.</b> Aštuntas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva.....	49
<b>52 pav.</b> Aštuntas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva .....	50
<b>53 pav.</b> Aštuntas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva.....	50
<b>54 pav.</b> Aštuntas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva .....	50
<b>55 pav.</b> Devintas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva.....	51
<b>56 pav.</b> Devintas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva .....	52
<b>57 pav.</b> Devintas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva.....	52
<b>58 pav.</b> Devintas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva.....	52

## Santrumpų ir terminų sąrašas

### Santrumpos:

EV – elektromobilis ;

CFD – skaičiuojamoji skysčio dinamika ;

Al – aliuminis (rotorius);

Cu – varinis (rotorius);

## Ivadas

Elektromobiliai (EV) įgauna vis didesnę populiarumą dėl savo energijos vartojimo efektyvumo ir mažesnio išmetamųjų teršalų kiekio. EV yra varomas elektrinio variklio, kuris elektros energiją paverčia mechanine energija. Vienas iš pagrindinių EV iššūkių yra valdyti elektros variklio veikimo metu generuojamą šilumą. Dėl šilumos atsiradimo pakyla temperatūra, o tai gali sugadinti variklio komponentus ar netgi sugadinti variklį. Todėl norint efektyviai ir patikimai eksploatuoti elektromobilius, būtinas tinkamas variklio aušinimas.

EV elektros varikliuose naudojami keli aušinimo būdai, tokie kaip aušinimas skysčiu, aušinimas oru, aušinimas alyva ar šių būdų derinys. Praktika parodė, kad aušinimo skysčio ir alyvos aušinimo derinys yra geriausias aušinimo efektyvumo požiūriu, tačiau, tiek aušinimo skysčio sistemai, tiek alyvos aušinimo sistemai reikalingi papildomi komponentai, tokie kaip radiatorius, siurblys ir aušinimo skystis arba alyva, o tai padidina bendrą EV svorį ir konstrukcijų sudėtingumą.

Šiame darbe atliekamas tyrimas apie elektrinio variklio aušinimą EV naudojant skirtingas variklio konstrukcijas. Tyrimo metu keičiamos variklio sudedamosios dalys – rotorius, epoksidinė derva. Medžiagos pasižymi skirtingomis charakteristikomis, todėl tyrimo metu bus siekiama nustatyti, kaip skirtingos medžiagos variklio konstrukcijoje įtakoja elektrinio variklio aušinimą.

Tyrimas atliekamas siekiant nustatyti geriausią variklio aušinimo būdą, kuomet jie yra eksploatuojami viešojo susisiekimo arba krovinių išvežiojimo tikslais. Variklių eksploatavimo ciklai yra miesto ciklai, jiems nereikalingas didelis maksimalus greitis, tačiau, būtinas didelis sukimo momentas ir galia. Varikliai yra gaminami serijiniu būdu, todėl variklio kaina turi būti sąlyginai maža, variklio konstrukcija turi būti nesudėtinga, lengvai ir greitai surenkama.

Iš gautų rezultatų identifikuojamos aušinimo sistemos arba variklio konstrukcijos problemos, formuluojamos išvados, pateikiami pasiūlymai nustatytoms problemoms spręsti.

**Tyrimo tikslas** - nustatyti elektromobilio variklio skirtingų konstrukcijų įtaką jo naudingumui ir aušinimo efektyvumui.

### **Tyrimo uždaviniai:**

1. atlikti literatūros analizę apie skirtingus elektrinių variklių aušinimo būdus, išnagrinėti kaip skirtingos variklio konstrukcijos medžiagos įtakoja variklio aušinimą ir naudingumą;
2. nustatyti aušinimo sistemos efektyvumą;
3. ištirti variklio rotoriaus medžiagos įtaką variklio aušinimui;
4. ištirti variklio apvijų saugančios epoksidinės dervos įtaką variklio aušinimui;
5. išnagrinėti skirtingų konstrukcijų variklių naudingumus;
6. parengti išvadas ir pasiūlymus elektrinio variklio aušinimo tobulinimui.

## **1. Situacijos analizė**

### **1.1. Problema**

Elektrinės transporto priemonės (EV) naudoja elektros variklius, kad elektros energiją paverstų mechanine energija, kuri varo transporto priemonės ratus. Tačiau, šis procesas generuoja šilumą, o jei variklis tampa per karštas, gali kilti įvairių problemų, įskaitant sumažėjusią galią, sutrumpėjusį tarnavimo laiką ir galimus pavojus saugai.

Žurnale „Energies“ paskelbtame tyrime pažymima, kad perkaitimas yra dažna elektromobilių variklių problema, kurią sukelia keli veiksniai. Vienas iš pagrindinių veiksnių yra didelis elektros variklių galios tankis, o tai reiškia, kad jie sukuria didelį šilumos kiekį mažame plote. Kitas veiksnys yra ribotas variklio aušinimo pajėgumas, kurį gali pabloginti aukšta aplinkos temperatūra, didelės apkrovos ir ilgesnis veikimas dideliu greičiu [1].

Siekdami išvengti variklio perkaitimo, elektromobilių gamintojai paprastai naudoja aušinimo sistemas variklio generuojamai šilumai išsklaidyti. Šiose aušinimo sistemose gali būti naudojami oro arba skysčio aušinimo metodai, atsižvelgiant į variklio konstrukciją ir transporto priemonės veikimo sąlygas. Tačiau, šios sistemos taip pat gali padidinti transporto priemonės svorį, sudėtingumą ir kainą, be to, jos ne visada gali būti veiksmingos siekiant išvengti perkaitimo ekstremaliomis sąlygomis [1].

Straipsnyje, paskelbtame tarptautiniame energijos tyrimų žurnale, teigiama, kad EV variklių šilumos valdymo tobulinimas gali padėti sumažinti perkaitimo riziką. Tai gali apimti variklio konstrukcijos optimizavimą, pažangių aušinimo metodų naudojimą ir šiluminių jutiklių bei valdiklių integravimą, kad būtų galima stebėti ir reguliuoti variklio temperatūrą [3].

Kitame tyrime, paskelbtame žurnale „Journal of Power Sources“, siūlomas naujas požiūris į variklio perkaitimą EV. Tyrėjai sukūrė naują šilumos vamzdžio aušinimo sistemą, kuri naudoja skysčio ir garų derinį, kad efektyviai pašalintų šilumą iš variklio. Buvo įrodyta, kad sistema žymiai pagerina variklio šiluminės charakteristikas ir gali sumažinti papildomų aušinimo komponentų poreikį [2].

Apskritai EV variklio perkaitimas yra sudėtinga problema, dėl kurios reikia atidžiai apsvarstyti variklio konstrukciją, veikimo sąlygas ir aušinimo sistemą. Tobulindami šilumos valdymą ir kurdami naujoviškas aušinimo technologijas, elektromobilių gamintojai gali sumažinti variklio perkaitimo riziką ir pagerinti savo transporto priemonių našumą bei ilgaamžiškumą [1].

### **1.2. Problemos priežastys**

Didelis galios tankis: EV elektriniai varikliai suprojektuoti taip, kad būtų mažesni ir efektyvesni nei tradiciniai vidaus degimo varikliai, o tai reiškia, kad jie turi generuoti daug galios mažoje erdvėje. Dėl didelio galios tankio gali padidėti šilumos gamyba, o jei šiluma nėra tinkamai išsklaidoma, variklis gali perkaisti. Siekdami išspręsti šią problemą, mokslininkai tiria būdus, kaip pagerinti elektros variklių aušinimo pajėgumą, pavyzdžiui, naudoti geresnius aušinimo skysčius, optimizuoti aušinimo kanalų dizainą ir pagerinti variklio komponentų šilumos perdavimo koeficientą [4].

Aukšta aplinkos temperatūra: EV elektrinius variklius dažnai veikia aukšta aplinkos temperatūra, ypač karšto klimato sąlygomis arba vairuojant, kai reikia daug pastangų. Kai aplinkos temperatūra yra aukšta, gali sumažėti variklio aušinimo galia ir sunkiau išsklaidyti šilumą. Siekdami išvengti variklio perkaitimo aukštos temperatūros aplinkoje, mokslininkai tiria būdus, kaip pagerinti elektrinių variklių aušinimo sistemų šilumos išsklaidymo galimybes, pavyzdžiui, naudojant aušinimo skysčiu arba aktyvaus aušinimo sistemas [5].

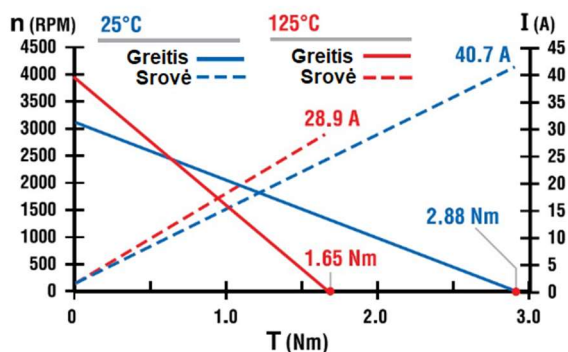
Netinkama aušinimo sistema: Kai kuriais atvejais elektros variklio aušinimo sistema gali būti netinkamai suprojektuota arba netinkamai parinkta, todėl gali sumažėti aušinimo efektyvumas ir nepakankamas šilumos išsklaidymas. Pavyzdžiui, jei aušinimo sistemoje teka per mažas aušinimo skysčio srautas arba jei aušinimo skystis negali efektyviai tekėti per variklio komponentus, tai gali sukelti perkaitimą. Siekdami užkirsti kelią šiai problemai, mokslininkai tiria būdus, kaip optimizuoti aušinimo sistemų dizainą, pvz., naudoja skaičiavimo skysčio dinamikos (CFD) modeliavimą, kad pagerintų aušinimo kanalų ir šilumokaičių dizainą [6].

Perkrova: perkrovus elektros variklį, jis gali generuoti daugiau šilumos, nei gali išsklaidyti, o tai gali sukelti perkaitimą. Taip gali nutikti, kai varikliui reikia suteikti didesnę sukimo momentą ar galią, nei yra numatyta, arba kai variklis ilgą laiką veikia didelės paklausos sąlygomis. Siekiant išvengti variklio perkaitimo dėl perkrovos, svarbu užtikrinti, kad variklis būtų tinkamai įvertintas pagal numatytą paskirtį ir kad jis nebūtų naudojamas viršijant didžiausią galią [7].

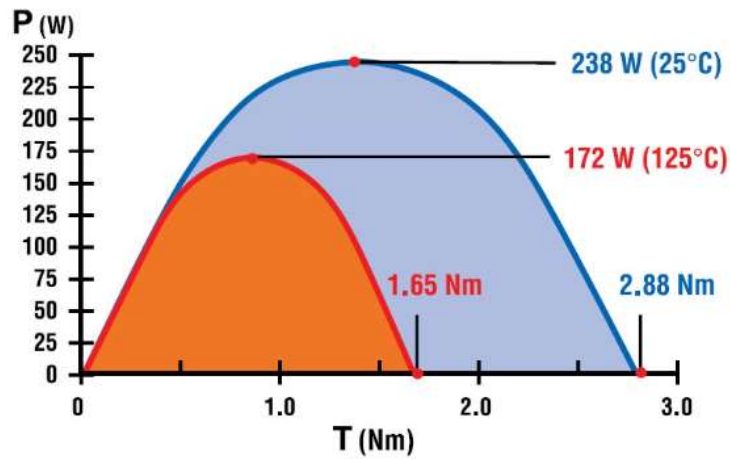
Senėjimas arba degradacija: laikui bėgant elektros variklio izoliacinė medžiaga gali susidėvėti arba senti, todėl gali padidėti šilumos gamyba ir sumažėti šilumos išsklaidymas. Tai gali sukelti įvairūs veiksniai, pvz., aukšta darbo temperatūra, drėgmės poveikis arba cheminis skilimas. Siekiant išvengti variklio perkaitimo dėl senėjimo ar gedimo, svarbu reguliariai tikrinti ir prižiūrėti variklį bei pakeisti visus komponentus, kurie turi susidėvėjimo ar pažeidimo požymių [8].

### 1.3. Problemos pasekmės

Sumažėjęs našumas: Kai elektros variklis perkaista, jo veikimas gali sumažėti dėl kelių veiksnių. Pirma, variklio efektyvumas gali sumažėti kylant temperatūrai. Tai reiškia, kad variklis gali generuoti mažiau galios tiekdamas tą patį energijos kiekį, todėl sumažėja pagreitis ir sumažėja didžiausias greitis, perduodama srovė (1 pav.). Antra, variklio aušinimo sistema gali būti priversta sumažinti galią (2 pav.), kad variklis dar labiau neperkaistų. Dėl to gali sumažėti galia ir bendras transporto priemonės veikimas [9].



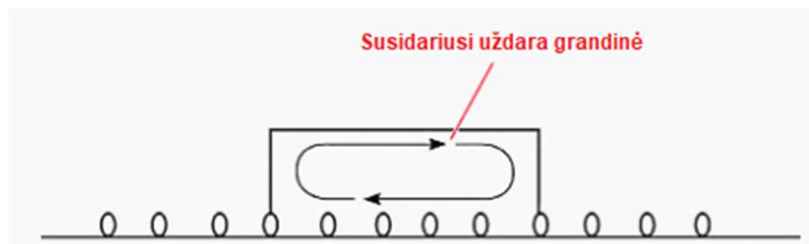
1 pav. Sumažėjusio sukimo momento bei perduodamos srovės pavyzdys [10]



2 pav. Sumažėjusios galios pavyzdys [10]

Variklio gedimas: dėl perkaitimo gali ištirpti variklio laidų izoliacija, o tai gali sukelti trumpąjį jungimą arba visišką variklio gedimą. Taip yra todėl, kad laidai gali būti pažeisti ir netekti elektros srovės, todėl variklis gali išsijungti. Kai kuriais atvejais variklį gali reikėti brangiai remontuoti arba pakeisti, o iš to gali atsirasti transporto priemonės prastovos [11], kurios yra itin didelis trukdis viešajam sektoriui.

Trumpasis jungimas susidaro tuomet, kai vienas ar keli ritės apsisukimai apeinami dėl izoliacijos gedimo tarp laidų. Varža, kurią sukuria sutrumpinti posūkiai, pašalinama iš jos fazės apvijos, todėl padidėja srovė. Kai vienoje iš trijų fazių yra keli sutrumpinti posūkiai, trumpojo posūkio viduje susidaro uždara grandinė (3 pav.). Kai variklis veikia, jėgos linijos (nuo kintamosios srovės srauto) išlydo laidus uždaros grandinės grandinėje (4 pav.) [12].



3 pav. Nuo trumpo jungimo susidaranti uždara grandinė [12]



4 pav. Išlydyta apvija [12]

Akumulatoriaus pažeidimas: Kai elektros variklis perkaista, jis gali perduoti šilumą į akumuliatorių ir gali sugadinti. Baterijos gali būti jautrios aukštai temperatūrai, o perkaitimas gali sumažinti jų veikimo laiką ir našumą. Kai kuriais atvejais perkaitusi baterija taip pat gali kelti pavojų saugai, pvz., gaisro ar sprogimo pavojų [13].

Pavojai saugai: elektros variklio perkaitimas gali sukelti pavojų keleiviams ir vairuotojui. Ypatingais atvejais perkaitęs variklis gali sukelti gaisrą arba sprogimą transporto priemonėje, o tai gali būti pavojinga keleiviams ir kitiems kelyje esantiems žmonėms. Net jei nėra tiesioginio gaisro ar sprogimo pavojaus, perkaitęs variklis gali sustabdyti transporto priemonę arba variklyje gali dingti galia, o tai gali sukelti nelaimingus atsitikimus ar kitus pavojus [14, 15].

#### **1.4. Problemos sprendimas**

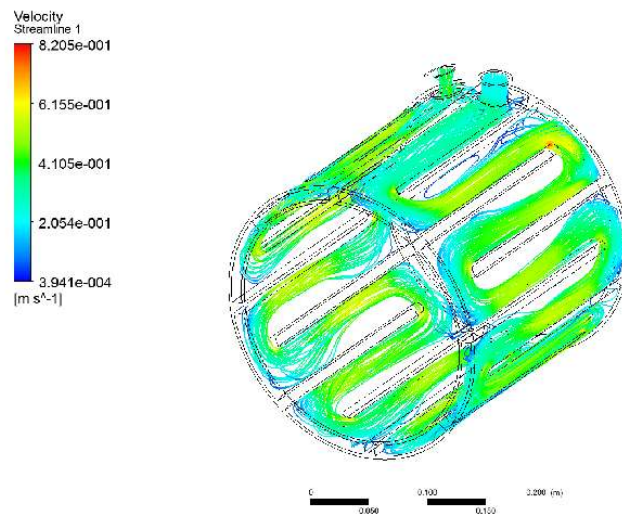
Šilumos valdymo sistemų tobulinimas: EV šiluminio valdymo sistema atlieka svarbų vaidmenį reguliuojant variklio ir kitų komponentų temperatūrą. Tyrimai parodė, kad tobulinant aušinimo sistemos dizainą ir išdėstymą galima žymiai pagerinti jos efektyvumą ir gebėjimą išsklaidyti šilumą [16]. Be to, naudojant pažangias aušinimo technologijas, tokias kaip aušinimas skysčiu arba šilumos vamzdžiai, taip pat galima pagerinti šilumos valdymą ir sumažinti perkaitimo riziką [17].

Variklio valdymo algoritmų optimizavimas: elektros variklio valdymo būdas gali turėti įtakos jo temperatūrai ir efektyvumui. Tyrimai parodė, kad optimizavus variklio valdymo algoritmą galima sumažinti perkaitimo riziką ir pagerinti variklio veikimą [18]. Pavyzdžiui, varikliui tiekiamos srovės ir įtampos reguliavimas gali padėti sumažinti šilumos gamybą ir pagerinti efektyvumą.

Pažangių medžiagų naudojimas: elektros variklių konstrukcijoje naudojamos medžiagos gali paveikti jų šiluminį elgesį. Tyrimai parodė, kad naudojant pažangias medžiagas, tokias kaip anglies pluošto kompozitai, galima pagerinti variklio šilumos išsklaidymo savybes ir sumažinti perkaitimo riziką [19]. Be to, naudojant didelio šilumos laidumo medžiagas, tokias kaip varis ar aliuminis, galima pagerinti šilumos perdavimą ir sumažinti perkaitimo riziką [20].

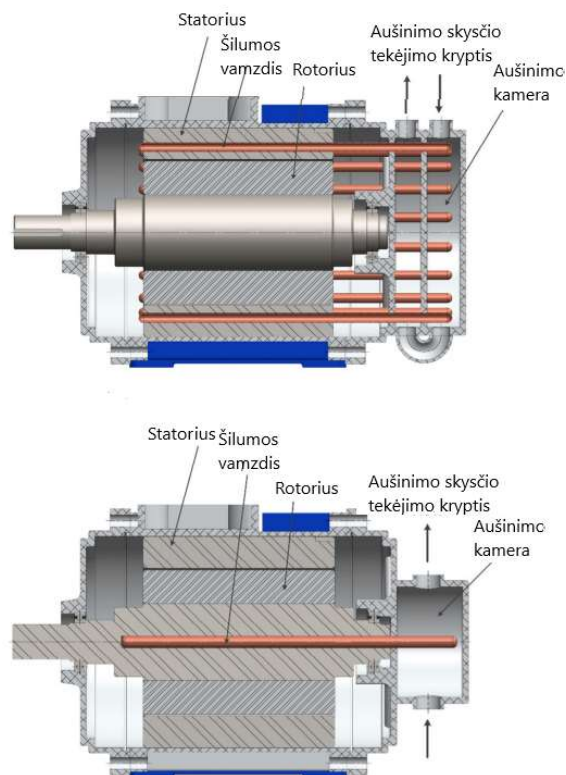
Variklio dydžio ir svorio sumažinimas: elektros variklio dydis ir svoris taip pat gali turėti įtakos jo šiluminiam elgesiui. Tyrimai parodė, kad sumažinus variklio dydį ir svorį galima pagerinti jo šiluminį efektyvumą ir sumažinti perkaitimo riziką [21]. Pavyzdžiui, naudojant mažesnę variklį su didesniu galios tankiu, galima pagerinti šilumos išsklaidymą ir sumažinti perkaitimo riziką.

Aušinimo sistemos konstrukcijos ir išdėstymo tobulinimas: siekiant pagerinti aušinimo sistemos efektyvumą elektromobilyje, sistemos konstrukciją ir išdėstymą galima optimizuoti, kad būtų užtikrintas tinkamas oro srautas ir šilumos išsklaidymas. Tai gali apimti pažangių metodų, tokių kaip skaičiavimo skysčio dinamika (CFD), naudojimą oro srautui per sistemą modeliuoti ir imituoti (5 pav.). Analizuodami CFD rezultatus, inžinieriai gali nustatyti didelės šiluminės varžos sritis ir atlikti aušinimo sistemos pakeitimus, kad pagerintų jos veikimą. Kitos aušinimo sistemos tobulinimo strategijos apima didelio našumo ventiliatorių naudojimą, aušinimo kanalų išdėstymo ir dydžio optimizavimą bei pažangių šilumokaičių naudojimą [22,23].



5 pav. Skaičiuojamosios skysčio dinamikos (CFD) pavyzdys [23]

Naudojant pažangias aušinimo technologijas, tokias kaip aušinimą skysčiu naudojantis šilumos vamzdžiais, galima pagerinti elektromobilio variklio šilumos sklaidą. Aušinimas skysčiu apima aušinimo skysčio cirkuliavimą per daugybę vamzdžių arba kanalų, kurie liečiasi su akumuliatoriumi arba varikliu (6 pav.). Tai gali užtikrinti efektyvesnę šilumos perdavimą nei tradicinės oru aušinamos sistemos. Šilumos vamzdžiai yra dar viena pažangi aušinimo technologija, kurią galima naudoti šilumai perduoti nuo akumuliatoriaus ar variklio. Šilumos vamzdis yra sandarus vamzdis, kurio viename gale išgaruoja skystis, o kitame galas kondensuojasi, perduodamas šilumą nuo šilumos šaltinio. Naudojant šias pažangias aušinimo technologijas galima sumažinti perkaitimo riziką ir pagerinti bendrą transporto priemonės efektyvumą [24].

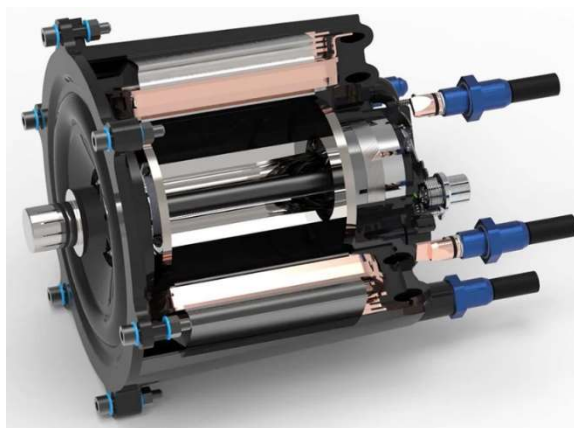


6 pav. Šilumos vamzdžių (aušinimo kanalų) pavyzdys [24]

Aušinimas alyva taip pat yra perspektyvus sprendimas valdant elektrinių transporto priemonių elektros variklių temperatūrą. Pasak [25], įrodyta, kad alyvos aušinimas yra efektyvus didelio galingumo elektrinių variklių aušinimo būdas elektromobiliuose dėl didelio specifinio šiluminio pajėgumo ir kompaktiškos konstrukcijos. Autoriai siūlo, kad alyvos aušinimo sistema gali būti sukurta taip, kad alyva cirkuliuotų per variklio statorių ir rotorių, o tai gali padėti išsklaidyti šilumą ir sumažinti variklio temperatūrą. Nustatyta, kad alyva aušinamas variklis turi stabilesnę temperatūrą ir geresnes šilumos valdymo savybes nei oru aušinamas variklis. Alyvos aušinimo sistemos naudojimas gali žymiai pagerinti elektrinių transporto priemonių variklių aušinimo efektyvumą ir stabilumą [26].

Variklio valdymo algoritmo optimizavimas: siekiant sumažinti elektros variklio perkaitimo riziką, variklio valdymo algoritmą galima optimizuoti, kad būtų užtikrinta, jog variklis veiktų esant saugioms temperatūros riboms. Tai gali apimti variklio sukimo momento, greičio arba galios reguliavimą, atsižvelgiant į įvairias veikimo sąlygas, pvz., aplinkos temperatūrą, važiavimo sąlygas ir akumuliatoriaus įkrovimo būseną. Optimizavimas gali būti pasiektas naudojant mašininio mokymosi algoritmus ar kitus pažangius valdymo metodus. Optimizavus variklio valdymo algoritmą, variklis gali veikti efektyviau ir sumažinti perkaitimo riziką [27].

Pažangių medžiagų naudojimas: variklio šilumos valdymui pagerinti gali būti naudojamos pažangios medžiagos, pvz., anglies pluošto kompozitai (7 pav.). Šios medžiagos pasižymi dideliu šilumos laidumu, leidžiančiomis efektyviau perduoti šilumą nuo variklio. Anglies pluošto kompozitai taip pat gali sumažinti variklio svorį ir pagerinti bendrą transporto priemonės efektyvumą. Kitos pažangios medžiagos, kurias galima naudoti, yra aukštos kokybės keramika ir šiluminės sąsajos medžiagos [28].



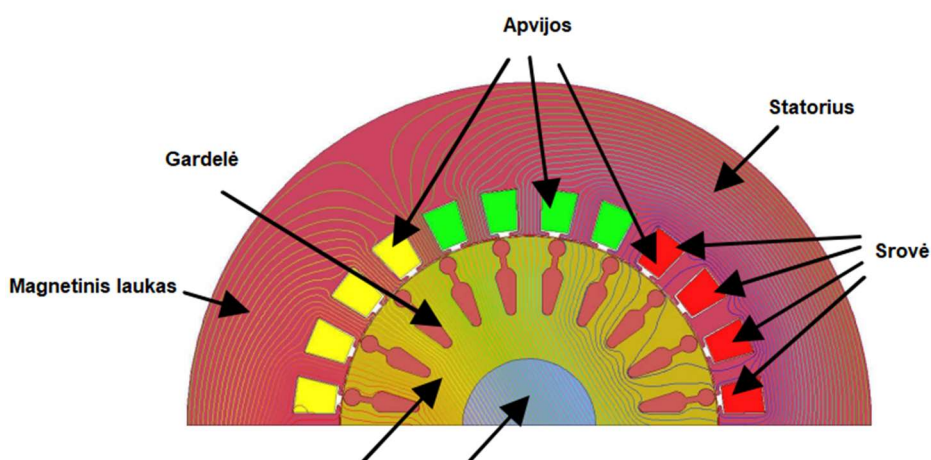
**7 pav.** EV variklio su anglies pluošto kompozitais statoriuje bei ašyje pavyzdys [29]

Variklio dydžio ir svorio sumažinimas: siekiant pagerinti variklio šilumos valdymą, jį galima suprojektuoti su mažesniais ir lengvesniais komponentais, kurie gali efektyviau išsklaidyti šilumą. Tai galima pasiekti naudojant pažangias gamybos technologijas, tokias kaip 3D spausdinimas, kuriant sudėtingos geometrijos komponentus, kurie pagerina šilumos išsklaidymą. Sumažinus variklio dydį ir svorį, galima pagerinti bendrą transporto priemonės efektyvumą ir sumažinti perkaitimo riziką [30].

## 2. Teorinis sprendimų pagrindimas

### 2.1. Elektrinio variklio tipo parinkimas

Indukciniai varikliai veikia elektromagnetinės indukcijos principu, kuris pagrįstas magnetinio lauko ir elektros laidininko sąveika. Kai laidininkas veikia magnetiniu lauku, jis indukuoja elektros srovę laidininke. Indukcinio variklio atveju magnetinis laukas sukuriama statoriaus, o elektros srovė indukuojama rotoriuje. Indukcinio variklio statorius yra sudarytas iš apvijų, išdėstytų tam tikru būdu. Apvijų išdėstymas sukuria magnetinį lauką, kuris sukasi aplink statorių. Statoriaus sukamasis laukas sukelia įtampą, nukreiptą į rotorius gardelę. Kai magnetinis laukas sukasi, jis indukuoja elektros srovę rotoriuje. Rotoriuje esanti elektros srovė sukuria magnetinį lauką, kuris sąveikauja su statoriaus magnetiniu lauku, todėl rotorius sukasi [31]. Indukcinio variklio komponentai pavaizduoti 8 pav.



8 pav. Indukcinio variklio sandara [31]

Indukcinių variklių naudojimas elektrinėse transporto priemonėse turi keletą pranašumų, palyginti su kitų tipų varikliais, pvz., nuolatinio magneto varikliais. Vienas reikšmingiausių privalumų – didelis indukcinio variklio galios tankis. Nustatyta, kad indukciniai varikliai gali pasiekti iki 10 kW/kg galios tankį, todėl jie tinka elektrinėms transporto priemonėms, kurioms reikalinga didelė galia [32].

Kitas indukcinio variklio privalumas yra maža kaina. Indukciniai varikliai yra pigesni nei kitų tipų varikliai, pvz., nuolatinio magneto varikliai, todėl jie yra patrauklūs gamintojams. Be to, indukcinio variklius gana lengva gaminti, o tai dar labiau sumažina jų kainą. Prie šio variklio didelių privalumų prisideda ir tai, jog srovės keitiklio gedimo atveju indukcinis variklis natūraliai išsijungia ir savaime sustoja, tai yra labai sveikintinas automobilių gamintojų pasirinkimas, siekiant saugumo [32].

Vienas galimas indukcinio variklio trūkumas yra mažesnis jų efektyvumas, palyginti su kitų tipų varikliais, pavyzdžiui, nuolatiniais magnetais varomais varikliais. Tačiau, naujaisi variklių projektavimo pasiekimai pagerino indukcinio variklio efektyvumą, todėl jie tapo konkurencingesni su kitų tipų varikliais. Nustatyta, kad naudojant didelio efektyvumo indukcinį variklį elektromobiliuje galima sutaupyti iki 7 proc. energijos. Kitas galimas indukcinio variklio trūkumas yra jų dydis ir svoris. Indukciniai varikliai paprastai yra didesni ir sunkesni nei kitų tipų varikliai, o

tai gali turėti įtakos elektrinių transporto priemonių veikimui ir diapazonui. Tačiau, naujausi variklio dizaino pasiekimai padėjo sumažinti indukcinį variklių dydį ir svorį, todėl jie labiau tinka elektrinėms transporto priemonėms [32].

Toliau pateiktoje lentelėje apžvelgiami skirtingų tipų varikliai, naudojami EV.

**1 lentelė.** Skirtingų tipų variklių privalumai ir trūkumai [33]

Variklio tipas	Privalumai	Trūkumai	EV, kuriuose naudojami varikliai
Šepetėlinis nuolatinės srovės variklis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maksimalus sukimo momentas esant mažam greičiui</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Didelė variklio konstrukcija</li> <li>• Mažas efektyvumas</li> <li>• Šiluma, susidaranti prie šepetėlių</li> </ul>	Fiat Panda Elettra, Conceptor G-Van
Nuolatinį magnetų bešepetėlis variklis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nėra vario nuostolių</li> <li>• Didesnis efektyvumas už indukcinį variklį</li> <li>• Lengvesnė ir mažesnė konstrukcija</li> <li>• Geresnis šilumos išsklaidymas</li> <li>• Didesnis sukimo momento tankis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trumpas nuolatinės galios diapazonas</li> <li>• Mažėjantis sukimo momentas didėjant greičiui</li> <li>• Aukšta gamybos kaina</li> </ul>	Toyota Prius (2005)
Nuolatinį magnetų sinchroninis variklis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Galima naudoti įvairiais greičio diapazonais be papildomų perdavos sistemų</li> <li>• Efektyvus</li> <li>• Kompaktiškas</li> <li>• Tinkamas naudoti ratuose</li> <li>• Didelis sukimo momentas važiuojant labai mažu greičiu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dideli nuostoliai</li> </ul>	Toyota Prius, Nissan Leaf, Soul EV
Indukcinis variklis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Labiausiai laiko patikrintas variklis</li> <li>• Didelis galios tankis</li> <li>• Maža kaina</li> <li>• Saugus</li> <li>• Patikimas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mažesnis efektyvumas</li> <li>• Sąlyginai didelė konstrukcija</li> <li>• Svoris</li> <li>• Dideli galios nuostoliai dėl susidarancios šilumos rotoruje</li> </ul>	Tesla Model S, Tesla Model X, Toyota RAV4, GM EV1

Apibendrinant galima teigti, kad indukciniai varikliai yra geriausias pasirinkimas serijinės gamybos elektromobiliams dėl didelio efektyvumo, patikimumo ir mažos kainos. Tyrimui pasirinktas indukcinis variklis, nes jis gali išvystyti didelę galią ir sukimo momentą, variklio konstrukcija yra paprasta, gamybos procesas yra nesudėtingas ir pigus.

## 2.2. Variklio aušinimo parinkimas

Norint naudoti elektrinį indukcinį variklį automobiliui varyti, susiduriama su variklio generuojamos šilumos problema. Paprastai indukcinis variklis gali veikti esant didelei apkrovai ir ilgais laikotarpiais. Variklio sukurta šiluma gali sugadinti variklio dalis ir sutrumpinti jų ilgaamžiškumą ar net visiškai sugadinti variklį [34].

Norint išnaudoti maksimalią variklio galią, ypač svarbu užtikrinti variklio komponentų aušinimą. Ypatingai svarbu gerai aušinti statoriaus apvijas bei rotorius. Elektrinio variklio tarnavimo laikas labai priklauso nuo apvijų temperatūros, kurią lemia aušinimo sistemos konstrukcija. Elektrinis variklis įkaista, kai yra veikiamas didelės apkrovos dėl greito rotoriaus judėjimo variklio viduje. Temperatūros lygiai tam tikrose variklio vietose, pvz. apvijose, izoliacijoje ar guoliuose apriboja maksimalias elektrinio variklio išnaudojimo galimybes. Aukšta temperatūra padidina elektros varžą, todėl sumažėja variklio efektyvumas. Įvykus variklio perkaitimui, variklio komponentai gali prarasti savo stiprumą, statoriaus apvijos gali išsilydyti, todėl variklis gali būti sugadintas negrįžtamai [35].



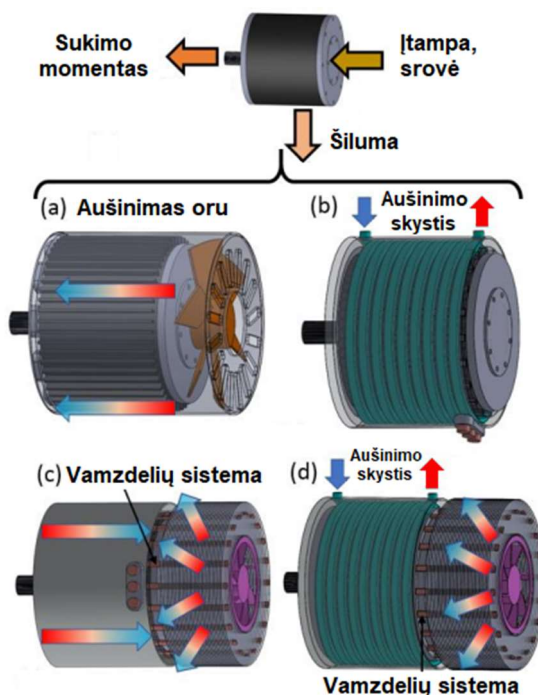
9 pav. Perkaitęs variklio korpusas

9 pav. pateiktas perkaitusio variklio korpuso pavyzdys. Aušinimo sistemai nespėjus tinkamai naušinti variklio, susidariusi šiluma išplėtė rotorius, statoriaus gardeles bei apvijas saugančią epoksidinę dervą, ko pasekoje komponentai pradėjo trintis vienas į kitą. Dėl trinties susidarė dar didesnė šiluma, kuri galimai išlydė statoriaus apvijas. Epoksidinė derva prarado savo pradinę formą ir vidinės variklio ertmės skersmuo sumažėjo - variklyje nebegalima įmontuoti rotoriaus.

Šiluma iš elektros variklio daugiausiai perduodama laidumo būdu išilgine kryptimi iš variklio apvijų vidinės pusės į išorę. Šiluma turi būti efektyviai išsklaidyta tam, kad būtų užtikrinta komponentų optimali darbo temperatūra. Komponentų optimali temperatūra yra svarbi tam, kad variklis veiktų efektyviai [35].

Elektros variklio aušinimo būdas turėtų būti pasirinktas remiantis mašinos klasifikacija, galios reikalavimais ir darbo aplinka. Paprastai elektros variklis yra aušinamas oru per jo paviršiaus

pelekus natūralios konvekcijos (10 pav. a)) arba priverstinės konvekcijos (10 pav. c)) būdu naudojant ventiliatorių, sumontuotą ant veleno. Tokia vėsinimo technika yra tinkama naudoti pramonėje, kai variklis yra pastato viduje. Tačiau, norint vėsinti transporto priemonėje esantį variklį, tokiai vėsinimo technikai gali neužtekti vietos kėbule. Automobilių varikliai turi būti sandarūs, atsparūs vandeniui ir kitiems aplinkos veiksniams, todėl pradėta kurti hibridinė variklio aušinimo sistema, kuri apjungia skysčiu ir priverstinės konvekcijos aušinimo sistemas į vieną sistemą (10 pav. d)) [36]. 10 pav. pateikiami 4 dažniausiai sutinkami indukcinio variklių aušinimo būdai.

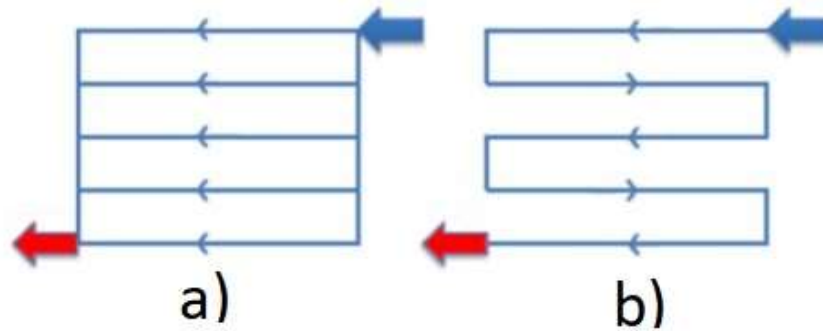


**10 pav.** Indukcinio variklio aušinimo sistemos [36]

Elektromobilių varikliai dažniausiai aušinami skysčiu, kadangi aušinimas skysčiu yra įprastas ir efektyvus šilumos perdavimo metodas, skirtas didelės galios uždariams elektros varikliams. Tradicinės konfigūracijos elektromobilių aušinimo sistemos susideda iš aušinimo skysčio siurblio, radiatoriaus ir šiuos komponentus jungiančių žarnų. Variklio šiluma pašalinama tekančiu aušinimo skysčiu per radiatorių [36].

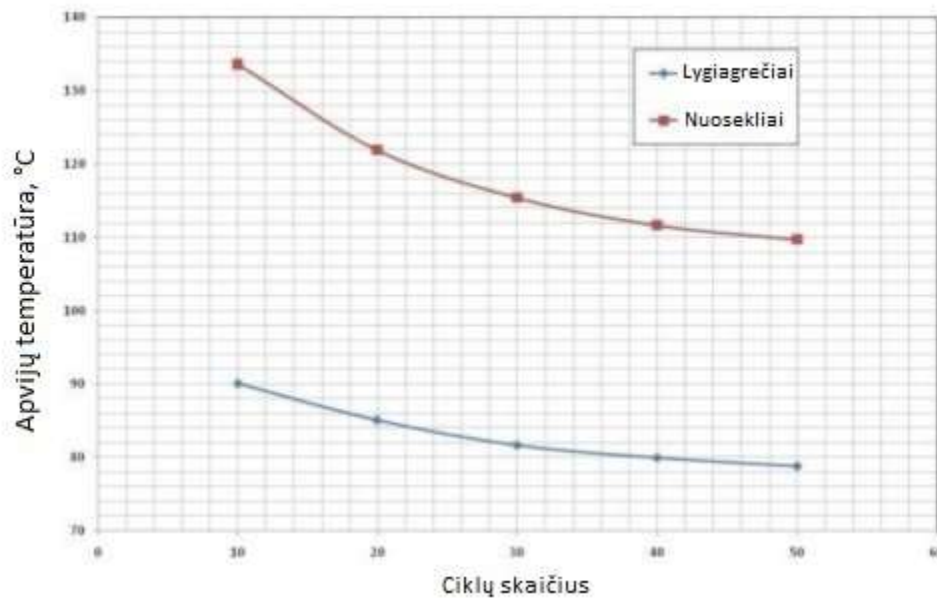
Elektromobilių varikliuose dažniausiai sutinkama „vandens švarko“ (angl. water jacket) sistema (10 pav. b)). Tokio variklio korpuse yra aušinimo kanalai, pro kuriuos tekančio aušinimo skysčio srautas perima šilumą iš korpuso ir patekęs į aušinimo radiatorių atiduoda ją aplinkai. Toks aušinimo būdas yra efektyvesnis nei aušinimas oro srautu [37].

Kitas svarbus elektrinio variklio aušinimo aspektas yra statoriaus aušinimo kanalų išdėstymas. Aušinimo kanalai turi būti išdėstyti taip, kad aušinimo skysčio tėkmė būtų sukonzentruota ir nusineštų kuo daugiau sudarytos variklio šilumos prieš ištekant iš statoriaus. 11 pav. pateikiami du aušinimo kanalų tipai.



**11 pav.** a) – lygiagrečiai išdėstyti aušinimo kanalai ; b) – nuosekliai išdėstyti aušinimo kanalai [34]

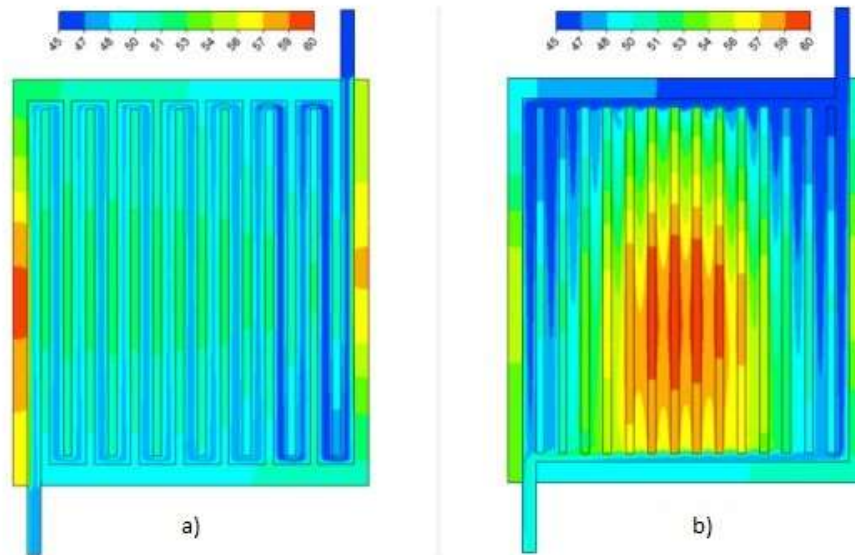
Remiantis [34] sukurtais CFD skaičiavimų modeliais įrodyta, jog nuosekliai išdėstyti kanalų efektyvumas yra gerokai didesnis nei lygiagrečiai išdėstyti aušinimo kanalų.



**12 pav.** Apvijų temperatūros priklausomybė nuo kanalų išdėstymo tipo [34]

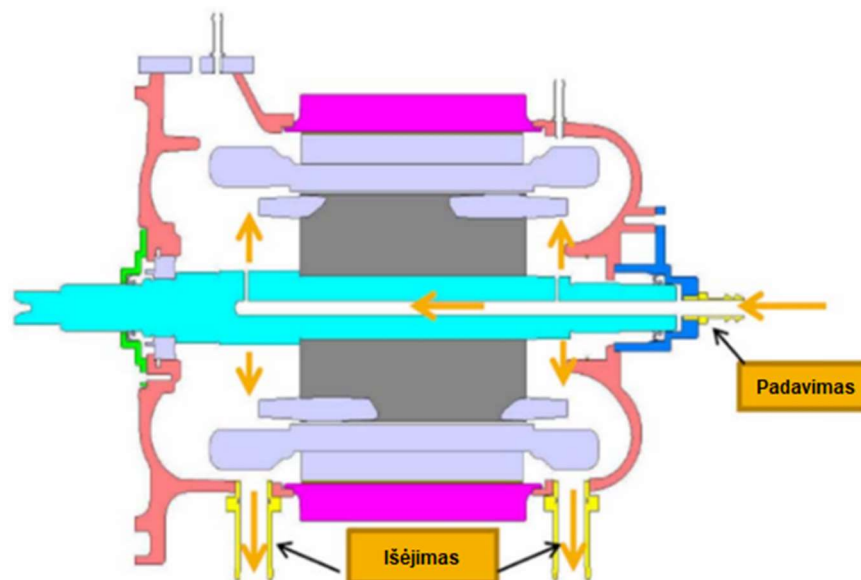
12 pav. pateiktame grafike matomas akivaizdus skirtumas tarp nuosekliai ir lygiagrečiai išdėstyti kanalų įtakos elektrinio variklio apvijų temperatūrai. Atliekant tą patį ciklų skaičių nuosekliai išdėstyti aušinimo kanalai sumažino apvijų temperatūrą apie 2 kartus geriau nei lygiagrečiai išdėstyti kanalai.

Atlikus CFD skaičiavimus (13 pav.) matomas ženklus statoriaus temperatūrų skirtumas tarp nuosekliai ir lygiagrečiai išdėstyti aušinimo kanalų. Statoriuje su lygiagrečiai išdėstytais aušinimo kanalais aušinimo sistema nesugeba nunešti sudarytos šilumos dėl per trumpo aušinimo skysčiui duoto laiko atlikti savo darbą prieš ištekant iš statoriaus.



**13 pav.** a) – nuosekliai išdėstyty aušinimo kanalų įtaka statoriaus temperatūrai ; b) – lygiagrečiai išdėstyty aušinimo kanalų įtaka statoriaus temperatūrai [34]

Galingesni elektriniai varikliai dažnu atveju susiduria su nepakankamu rotoriaus aušinimu, todėl variklyje susidaranti šiluma apriboja variklio išnaudojimo galimybes. Tokiais atvejais naudojami papildomi aušinimo kanalai rotoriuje (14 pav.), pro kuriuos tekantis aušinimo skystis perima didelę dalį šilumos iš variklio vidurio. Tokios aušinimo sistemos sutinkamos retai, kadangi jų įgyvendinimas yra pakankamai sudėtingas [37].



**14 pav.** Rotoriaus aušinimo sistema [37]

Tyrimui atlikti pasirenkamas tik aušinimo skysčiu aušinamas statorius, kurio aušinimo kanalai išdėstyti paeiliui dėl nekomplikuotos ir ne daug vietos užimančios aušinimo sistemos konstrukcijos, dyrančių detalių nebūvimo (ventiliatoriai, guoliai).

### **2.3. Rotoriaus medžiagos įtaka**

Elektrinių variklių efektyvumas ir patikimumas priklauso nuo įvairių veiksnių, tarp jų ir nuo jų gamybai naudojamų medžiagų. Vienas iš svarbiausių elektros variklio komponentų yra rotorius, kuris elektros energiją paverčia mechanine energija. Pastaraisiais metais išaugo susidomėjimas varinių rotorių naudojimu elektros varikliuose dėl geresnių šilumos ir elektros laidumo savybių, palyginti su aliuminio rotoriais.

Varis turi žymiai didesnę šilumos laidumą nei aliuminis, o tai reiškia, kad jis gali efektyviau perduoti šilumą. Ši savybė ypač naudinga elektriniams varikliams, kur dėl per didelio karščio gali sumažėti efektyvumas ir net sugesti variklis. Varinių rotorių naudojimas elektros varikliuose gali sumažinti temperatūros kilimą iki 18%, palyginti su aliuminio rotoriais. Tyrimas parodė, kad variniai rotoriai turi didesnę šilumos perdavimo koeficientą nei aliuminio rotoriai, todėl variklyje šiluma pasiskirsto tolygiau [38].

Kitas varinių rotorių privalumas – didesnis elektrinis laidumas, lyginant su aliuminio rotoriais. Vario laidumas yra maždaug du kartus didesnis nei aliuminio, o tai reiškia, kad jis gali efektyviau perduoti elektros srovę. Ši savybė būtina elektriniuose varikliuose, kur srovės srautas generuoja šilumą. Variniai rotoriai gali sumažinti vario nuostolius elektriniame variklyje iki 35%, lyginant juos su aliuminio rotoriais. Dėl šio vario nuostolių sumažėjimo sumažėja šilumos gamyba ir pagerėja variklio efektyvumas [38].

Be puikių šilumos ir elektros laidumo savybių, variniai rotoriai taip pat yra patvaresni ir ilgaamžiškesni nei aliuminiai rotoriai. Variniai rotoriai turi didesnę atsparumą korozijai ir nusidėvėjimui, palyginti su aliuminiais rotoriais. Tyrimas parodė, kad variniai rotoriai gali atlaikyti atšiauresnes eksploataavimo sąlygas ir turi ilgesnį tarnavimo laiką nei aliuminiai rotoriai [39].

Nepaisant daugybės varinių rotorių privalumų, jų naudojimą riboja didesnė kaina, palyginti su aliuminiais rotoriais. Tačiau, didesnę pradinę varinių rotorių kainą gali kompensuoti geresnis jų efektyvumas ir ilgesnis tarnavimo laikas, dėl ko ilgai gali sumažėti eksploataavimo išlaidos [39].

Apibendrinant galima teigti, kad variniai rotoriai turi keletą pranašumų, palyginti su aliuminio rotoriais elektros varikliuose, įskaitant puikias šilumos ir elektros laidumo savybes, didesnę patvarumą ir ilgesnį tarnavimo laiką. Varinių rotorių naudojimas ilgai gali pagerinti variklio efektyvumą ir sumažinti eksploataavimo išlaidas, todėl tyrime nuspręsta įvertinti kaip variniai rotoriai praktiškai veikia elektrinio variklio aušinimą bei naudingumą, o iš gautų rezultatų bus galima spręsti ar varinių rotorių teikiama nauda yra verta didesnių gamybos išlaidų.

### **2.4. Statoriaus apvijų izoliavimas**

Vienas iš svarbių elektros variklio projektavimo, eksploataavimo ir priežiūros aspektų yra variklio apvijų izoliacija.

Variklio apvijos yra vielos ritės, pernešančios elektros srovę ir sukuriančios magnetinį lauką, kuris varo variklio rotorių. Izoliacija tarp šių ričių yra labai svarbi siekiant išvengti elektros trumpų jungimų ir išlaikyti variklio elektros sistemos sklandų darbą. Be tinkamos izoliacijos variklis gali sugesti anksčiau laiko arba net kelti pavojų. Toliau pateikiamos kelių rūšių apvijų izoliacinės medžiagos, jų privalumai ir trūkumai:

Epoksidinės dervos turi didelį mechaninį stiprumą, puikų sukibimą su kitomis medžiagomis ir atsparumą karščiui bei cheminėms medžiagoms. Elektros varikliuose epoksidinės dervos pirmiausia naudojamos kaip izoliacinė medžiaga, apsauganti elektrinius komponentus nuo aplinkos veiksnių, elektros įtempį ir mechaninio susidėvėjimo [41].

Vienas iš pagrindinių epoksidinių dervų, kaip elektros variklių izoliacinės medžiagos, privalumų yra didelis jų dielektrinis stiprumas, kuris reiškia jų gebėjimą atsispirti elektros gedimui esant aukštai įtampai. Ši savybė yra labai svarbi elektros varikliams, kurie veikia esant aukštai įtampai ir reikalauja izoliacinių medžiagų, kurios gali atlaikyti elektros įtampą nesugedamos. Be to, epoksidinės dervos pasižymi maža dielektrine konstanta ir nuostoliais, o tai padeda sumažinti energijos nuostolius ir pagerinti variklio efektyvumą [41].

**2 lentelė.** Variklio apvijų izoliacinių medžiagų privalumai ir trūkumai [40]

Organinės izoliacinės medžiagos (lakas, epoksidinės dervos)		Neorganinės izoliacinės medžiagos (keramika)		Nanokompozitinės izoliacinės medžiagos		Magnetinės izoliacinės medžiagos (geležies, nikelio plėvelės)	
Privalumai	Trūkumai	Privalumai	Trūkumai	Privalumai	Trūkumai	Privalumai	Trūkumai
Atsparumas temperatūroms, svyravimams, drėgmei ;  Didelis mechaninis stiprumas ir cheminis atsparumas ;  Lengvas pritaikymas , nes jas galima purkšti, tepti, jose nardinti	Gali būti linkusios į terminį irimą, dėl ko gali išsiskirti toksiškos dujos	Geras šiluminis stabilumas ;  Mažas toksiškumas;  Geras mechaninis stiprumas ir cheminis atsparumas	Trapios ;  Sunkesnis pritaikymas nei organinių medžiagų	Puikios mechaninės ir elektrinės savybės ;  Didelis terminis stabilumas ;  Atsparumas dilimui ir mechaniniams poveikiams	Medžiagos yra kūrimo stadijoje, todėl jų ilgalaikis poveikis nėra ištirtas ;  Brangi medžiagų gamyba	Gali pagerinti variklio efektyvumą ir sumažinti šilumos susidarymą variklyje	Medžiagos yra kūrimo stadijoje, todėl jų ilgalaikis poveikis nėra ištirtas ;  Brangi medžiagų gamyba

Epoksidinės dervos taip pat pasižymi puikiu terminiu stabilumu, o tai reiškia, kad jos gali atlaikyti aukštą temperatūrą, nepablogindamos ir neprarasdamos savo mechaninių savybių. Ši savybė svarbi elektros varikliuose, kurie eksploatacijos metu generuoja šilumą ir reikalauja izoliacinių medžiagų, kurios gali atlaikyti aukštą temperatūrą, nesilydytų ir nesuirtų. Be to, epoksidines dervas galima sumaišyti su įvairiais priedais, kurie dar labiau pagerintų jų šiluminės savybes, pavyzdžiui, užpildais, kad pagerintų šilumos laidumą, arba antipirenais, kad padidintų atsparumą ugniai [41,42].

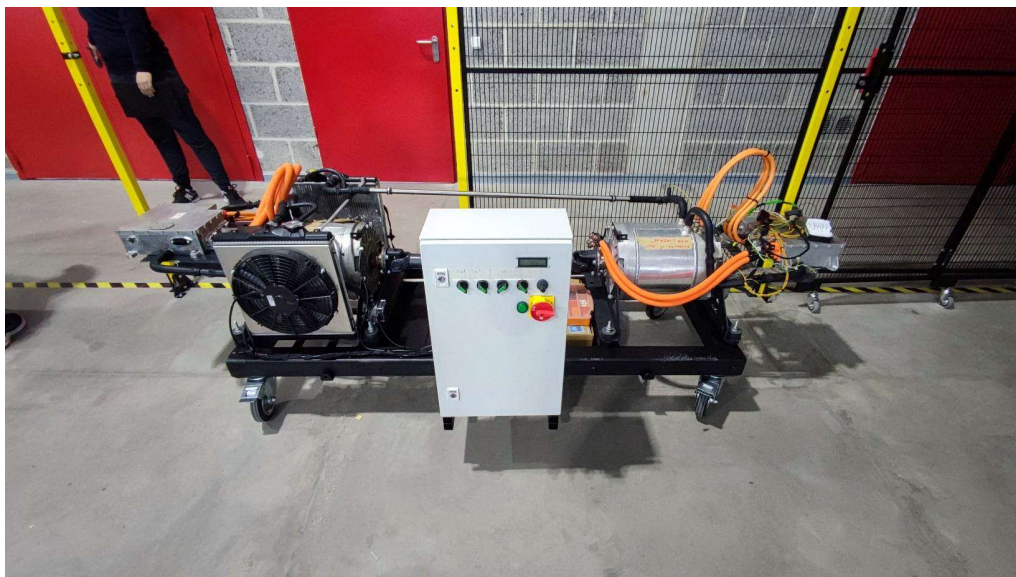
Be to, epoksidinės dervos puikiai sukimba su įvairiais pagrindais, įskaitant metalus, plastikus ir keramiką. Ši savybė yra labai svarbi elektros varikliuose, kur izoliacinė medžiaga turi tvirtai prilipti prie laidžių komponentų, kad nepatektų drėgmė, dulkės ar kiti teršalai, galintys turėti įtakos variklio veikimui. Epoksidinės dervos gali būti dengtos kaip danga arba suformuotos į komponento formą atitinkančias formas, o tai pagerina jų sukibimą ir užtikrina vienodą izoliacijos sluoksnį [42].

Apibendrinant poskyrį galima teigti, jog epoksidinės dervos yra patikima ir efektyvi izoliacinė elektrinių variklių apvijų medžiaga. Epoksidinės dervos yra ilgiausiai naudojama izoliacinė medžiaga, turinti geras mechaninio ir cheminio atsparumo savybes, jų ilgalaikis poveikis yra ištirtas ir paremtas tyrimais. Šią medžiagą lengva pritaikyti gamybos procese ir medžiaga neišbrangina gamybos proceso, todėl tyrimo metu pasirinkta įvertinti epoksidinių dervų įtaką elektrinio variklio aušinimui.

### 3. Tyrimo rezultatai

#### 3.1. Tyrimo metodika, pradinės tyrimo sąlygos

Tyrimai atliekami bandymų stende (15 pav.), kad būtų garantuojamos vienodos tyrimų sąlygos bei ciklai.



15 pav. Tyrimams atlikti naudojamas stendas

Tyrimai atliekami kiekviename bandyme apribojant varančiojo variklio greitį iki 1000 aps./min., varančiojo variklio srovės keitiklyje programiškai nustatoma maksimali 450 A srovė. Siekiant imituoti kintančią varančiojo variklio apkrovą nuo minimalios iki maksimalios apkrovos kiekvieno bandymo metu stabdantysis variklis dirba generatoriaus režimu ir paima dalį srovės, kuri atitinka tam tikrą stabdymo galią. Stabdymo galia apskaičiuojama naudojantis elektrinės galios formule:

$$P = I \cdot U \quad (1)$$

čia:

$P$  – elektrinė galia, kW

$I$  – srovė, A

$U$  – įtampa, V

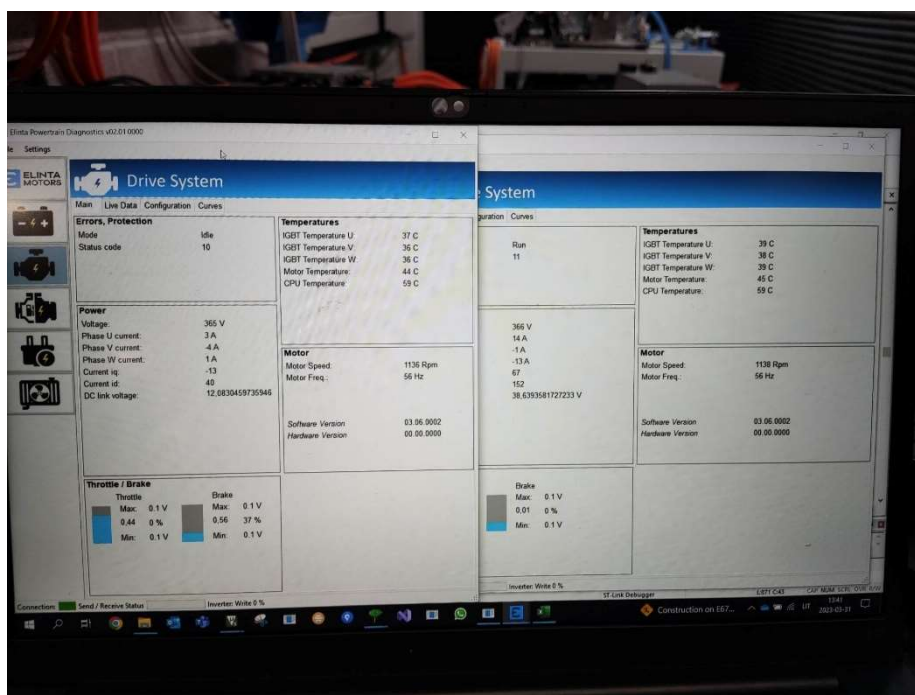
Priimama, jog įtampa visais atvejais yra 350 V (nominali), nes prieš kiekvieną bandymą baterijos yra pilnai pakraunamos, o tyrimas vyksta apie 5 minutes, todėl baterijų iškrova yra per ne lyg maža, kad darytų įtaką variklio apkrovos skaičiavimams.

3 lentelėje pateikiami tyrimui atlikti naudojami parametrai.

### 3 lentelė. Tyrimui atlikti naudojami parametrai

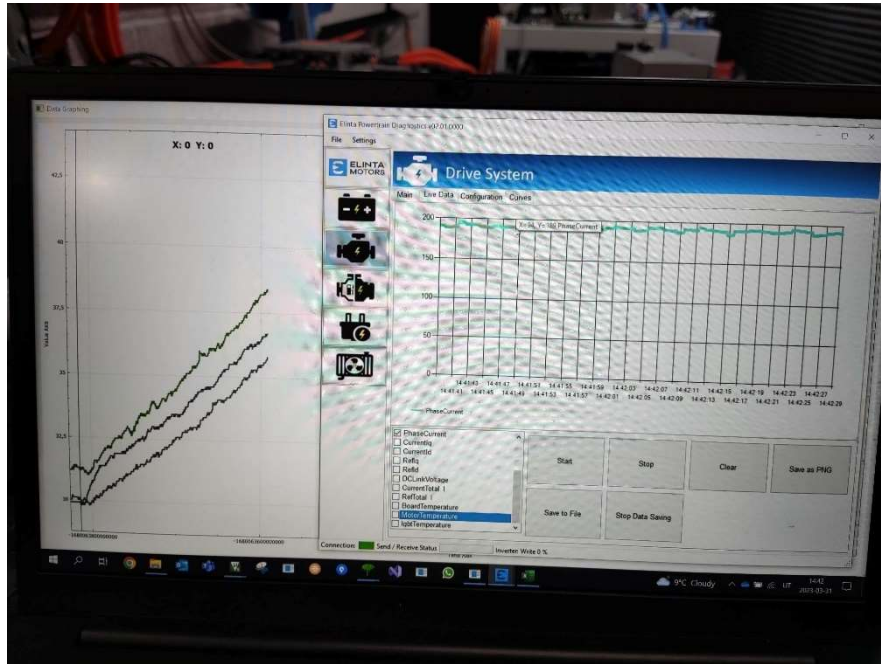
Bandymo Nr.	Stabdantysis variklis; nustatoma srovė, A	Varantysis variklis; nustatoma srovė, A	Varančiajam varikliui tenkanti apkrova, kW	Varančiojo variklio greitis
1	50	450	17,5	1000 aps./min.
2	100	450	35	
3	150	450	52,5	
4	200	450	70	
5	250	450	87,5	
6	300	450	105	
7	350	450	122,5	
8	400	450	140	
9	450	450	157,5	

Rezultatai renkami naudojantis „Elinta Powertrain Diagnostics“ programine įranga (16 pav.).



16 pav. „Elinta Powertrain Diagnostics“ programinė įranga

Naudojantis diagnostika realiu laiku įrašinėjami variklio ir variklio srovės keitiklio duomenys (srovė, temperatūra, sukimo momentas ir kt.), braižomi grafikai, duomenys talpinami .csv formatu (17 pav.). Rezultatai fiksuojami, kai bandymo metu surenkama 40 tūkstančių kadrų. Kadru fiksavimo greitis – 120 kadrų per sekundę. Prieš pradėdant fiksuoti kiekvieno sekancio tyrimo kadrus baigto tyrimo rezultatai yra išsaugomi ir kadrai pradėdami fiksuoti nuo 0.



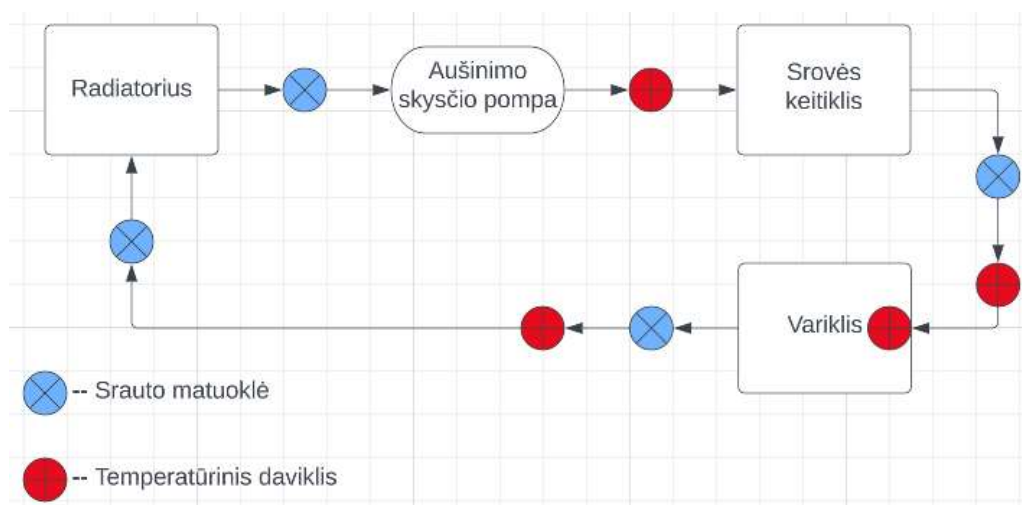
17 pav. Realio laiku įrašinėjami duomenys

Surinkti .csv formato duomenys eksportuojami į MS Excel programą kurioje yra apdorojami, naudojantis duomenų intymi ir formulėmis apskaičiuojamos reikalingos neišmatuotos reikšmės (18 pav.).

Time Stamp	ID	Extended	Dir	Bus	LEN	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Column1	TEMP1	TEMP2	TEMP3	temp in	temp ou	temp in (	temp c =	temp in	temp out	rad
6714	-1.68006E+15	335.65	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6715	-1.68006E+15	335.7	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6716	-1.68006E+15	335.75	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6717	-1.68006E+15	335.8	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6718	-1.68006E+15	335.85	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6719	-1.68006E+15	335.9	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6720	-1.68006E+15	335.95	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6721	-1.68006E+15	336	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6722	-1.68006E+15	336.05	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6723	-1.68006E+15	336.1	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6724	-1.68006E+15	336.15	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6725	-1.68006E+15	336.2	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6726	-1.68006E+15	336.25	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6727	-1.68006E+15	336.3	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6728	-1.68006E+15	336.35	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6729	-1.68006E+15	336.4	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6730	-1.68006E+15	336.45	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6731	-1.68006E+15	336.5	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6732	-1.68006E+15	336.55	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AE	02	00	00	27.8	27.7	28.6	29.19	30.03	28.912	29.744	30.302	31.174
6733	-1.68006E+15	336.6	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AD	02	00	00	27.8	27.7	28.5	29.19	29.925	28.912	29.64	30.302	31.065
6734	-1.68006E+15	336.65	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AD	02	00	00	27.8	27.7	28.5	29.19	29.925	28.912	29.64	30.302	31.065
6735	-1.68006E+15	336.7	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AD	02	00	00	27.8	27.7	28.5	29.19	29.925	28.912	29.64	30.302	31.065
6736	-1.68006E+15	336.75	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AD	02	00	00	27.8	27.7	28.5	29.19	29.925	28.912	29.64	30.302	31.065
6737	-1.68006E+15	336.8	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AD	02	00	00	27.8	27.7	28.5	29.19	29.925	28.912	29.64	30.302	31.065
6738	-1.68006E+15	336.85	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AD	02	00	00	27.8	27.7	28.5	29.19	29.925	28.912	29.64	30.302	31.065
6739	-1.68006E+15	336.9	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AD	02	00	00	27.8	27.7	28.5	29.19	29.925	28.912	29.64	30.302	31.065
6740	-1.68006E+15	336.95	10	FALSE	Rx	0	8	A6	02	A5	02	AD	02	00	00	27.8	27.7	28.5	29.19	29.925	28.912	29.64	30.302	31.065

18 pav. Bandymo metu gauta duomenų imtis

Stende atkartojama automobilio aušinimo sistema. Į sistemą įterpiami temperatūriniai davikliai matuoti aušinimo skystį, aušinimo skysčio srauto matuoklės matuoti į variklį įtekančio ir iš variklio ištekančio aušinimo skysčio srauto greitį. Aušinimo sistemos schema pateikiama 19 pav.



**19 pav.** Aušinimo sistemos schema

Siekiant išvengti skaičiavimo paklaidų ir sužinoti tikslų varančiojo variklio sukimo momentą, varančiojo variklio sukimo momentas matuojamas realiu laiku, kuomet prie sukimo momento matavimo prietaiso prijungiamas varantysis ir stabdantysis varikliai. 20 pav. pateikiamas sukimo momento matavimo prietaiso pavyzdys.



**20 pav.** Sukimo momento matavimo prietaiso pavyzdys [43]

Tyrimo metu siekiama ištirti variklio rotoriaus medžiagos įtaką variklio aušinimui, ištirti variklio apvijų saugančios epoksidinės dervos įtaką variklio aušinimui bei išnagrinėti skirtingų konstrukcijų variklių naudingumus. Sąlygų išpildymui tyrimo metu bus keičiama variklio konstrukcija.

Siekiant ištirti variklio rotoriaus medžiagos įtaką variklio aušinimui, tyrimo metu bus keičiamas variklio rotorius. 21 pav. parodyti rotoriai, kurie bus naudojami tyrime.



**21 pav.** a) – varinis rotorius ; b) – aliuminis rotorius

Siekiant ištirti variklio apvijų saugančios epoksidinės dervos įtaką variklio aušinimui, tyrimo metu bus keičiami variklio korpusai, užpildyti skirtingomis dervomis. Dervos pasižymi skirtingomis charakteristikomis, kurios pateiktos prieduose. 22 pav. parodyti korpusai, kurie bus naudojami tyrime.



a)

b)

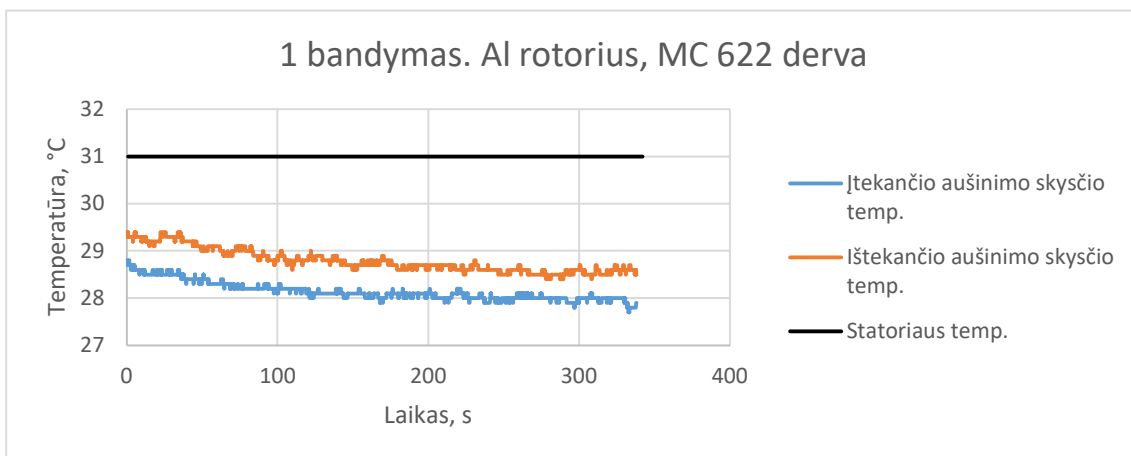
**22 pav.** a) – XE663 epoksidinė derva ; b) – MC 622 epoksidinė derva

Užsiduodamos pradinės tyrimo sąlygos:

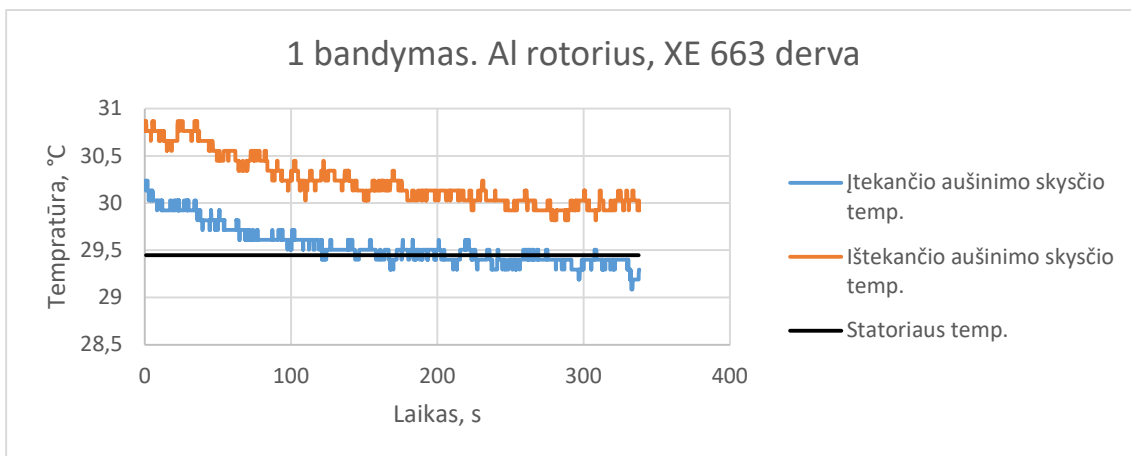
- Visiems tyrimams naudojamas tas pats ciklas.
- Visame aušinimo rate turi būti užtikrintas 13 L/min aušinimo skysčio srautas.
- Kambario temperatūra palaikoma 20 °C.
- Atliekamas pilnas tyrimas su viena variklio konstrukcija. Pvz.: aliuminis rotorius, MC 622 derva, tuomet pakeičiamas vienas variklio konstrukcijos dedamasis (rotorius arba derva), pilnai pakraunamos baterijos, sistema nuaušinama ir tyrimas kartojamas.
- Rezultatai fiksuojami, kai tyrimo metu surenkama 40 tūkstančių kadrų. Kadru fiksavimo greitis – 120 kadrų per sekundę.
- Tyrimai atliekami nustatant maksimalią srovę varančiajam varikliui, keičiant srovę stabdančiajam variklio.
- Aušinimo sistemoje naudojamas G13 aušinimo skystis.

### 3.2. Pirmas bandymas. 17,5 kW apkrova

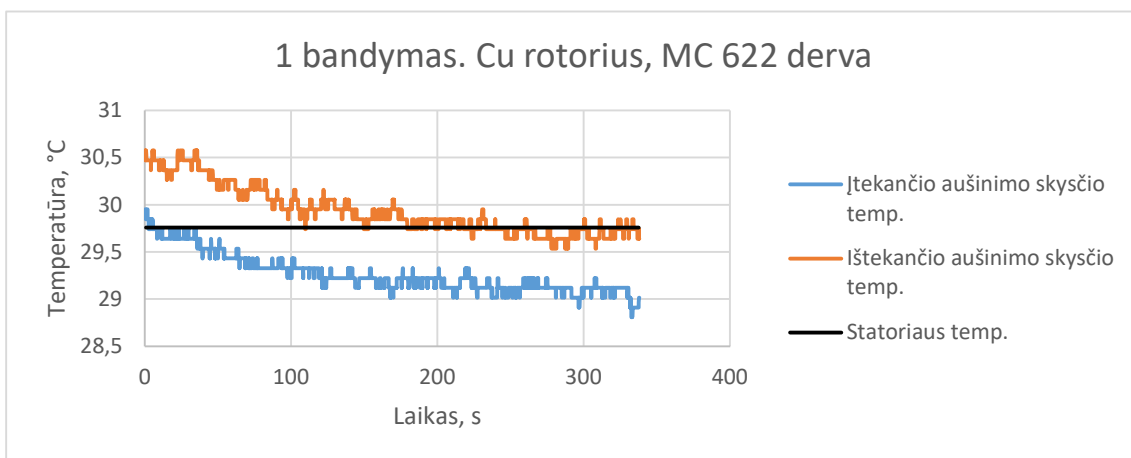
Pirmasis bandymas atliekamas naudojant 17,5 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



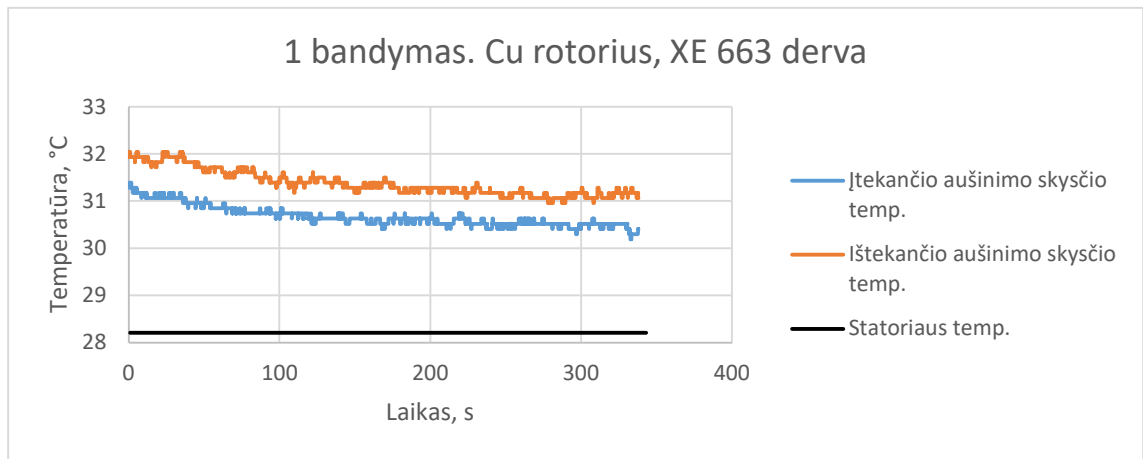
23 pav. Pirmas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva



24 pav. Pirmas bandymas - Al rotorius, XE663 derva



25 pav. Pirmas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**26 pav.** Pirmas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Iš duomenų imties apskaičiuojama faktinė varančiojo variklio el. galia naudojantis šia formule:

$$P_{in} = V \cdot I \quad (2)$$

čia:

$V$  – varančiojo variklio įtampos keitiklio įtampa, V

$I$  – varančiojo variklio srovė, A

Duomenų imtyje žinomi sukiai/min bei sukimo momentas. Naudojantis (3) formule apskaičiuojama variklio mechaninė galia:

$$P_{out} = \frac{T \cdot v_{rpm}}{9,5488} \quad (3)$$

čia:

$T$  – sukimo momentas, Nm

$v_{rpm}$  – varančiojo variklio rotoriaus greitis, aps./min.

Iš gautų elektrinės ir mechaninės galios dydžių apskaičiuojamas variklio naudingumo koeficientas naudojantis šia formule:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4)$$

čia:

$P_{out}$  – variklio mechaninė galia, kW

$P_{in}$  – variklio elektrinė galia, kW

Apskaičiuojama, kiek procentų yra apkraunamas varantysis variklis:

$$L = \frac{P_m}{P_i} \cdot 100 \quad (5)$$

čia:

$P_m$  – varančiojo variklio trifazė galia, kW

$P_i$  – varančiojo variklio maksimali galia, kai variklis yra pilnai apkrautas, kW

Gauti duomenys surašomi į lenteles:

**4 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos pirmojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	22,00	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	14,82	kW
Nuostoliai	7,18	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,67	
Variklio apkrova, $L$	19,01	%

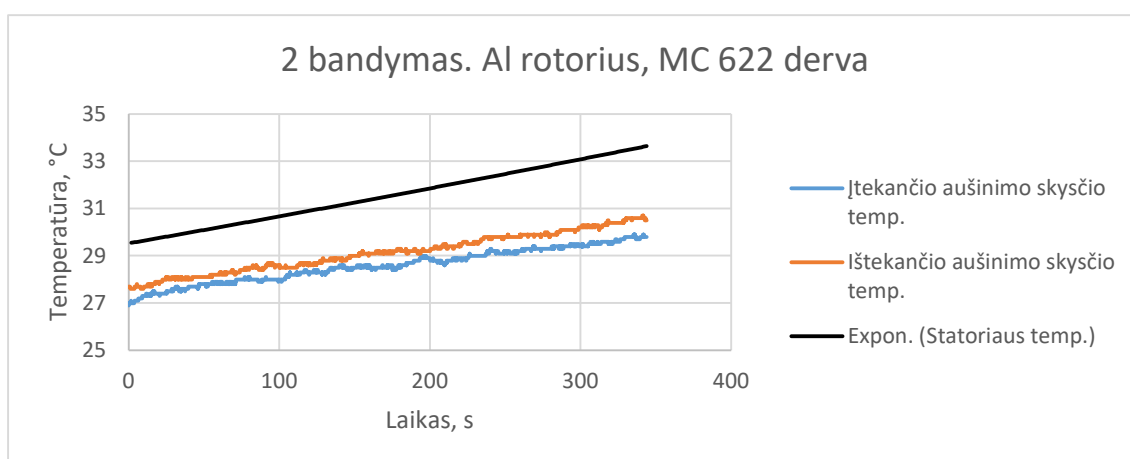
**5 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos pirmojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	22,02	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	15,45	kW
Nuostoliai	6,57	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,70	
Variklio apkrova, $L$	19,01	%

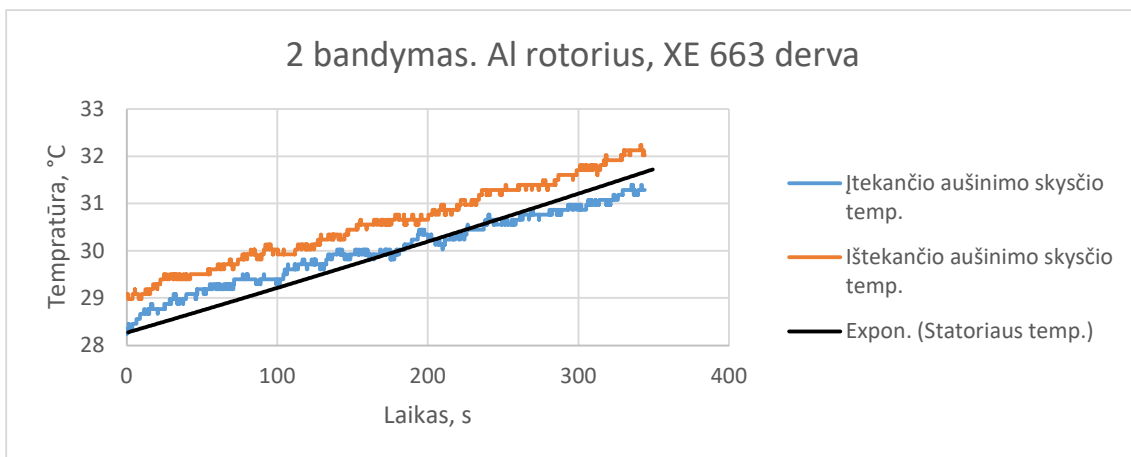
Gauti rezultatai parodo, jog variklio aušinimas, kuomet variklis apkraunamas 20 kW galia yra pakankamas, kad per užsiduotą laiko intervalą pilnai nuaušintų variklį. Epoksidinės dervos įtakos variklio aušinimui įžvelgti negalima. Grafikuose matoma, jog bandymo pradžioje aušinimo skysčio temperatūra buvo aukštesnė, nei matavimo pabaigoje. Tam įtakos turėjo faktas, jog prieš pradėdant duomenų fiksavimą buvo atlikti tikrinamieji važiavimai, kurie užšildė aušinimo skystį. Pirmojo bandymo metu stabdantysis variklis varantįjį variklį apkrovė 19,01 %. Variklis su variniu rotoriumi patyrė 0,61 kW mažesnius nuostolius ir dirbo naudingiau nei variklis su aliuminiu rotoriumi. Apskaičiuotas naudingumų skirtumas yra apie 4,3 %.

### 3.3. Antras tyrimas. 35 kW apkrova

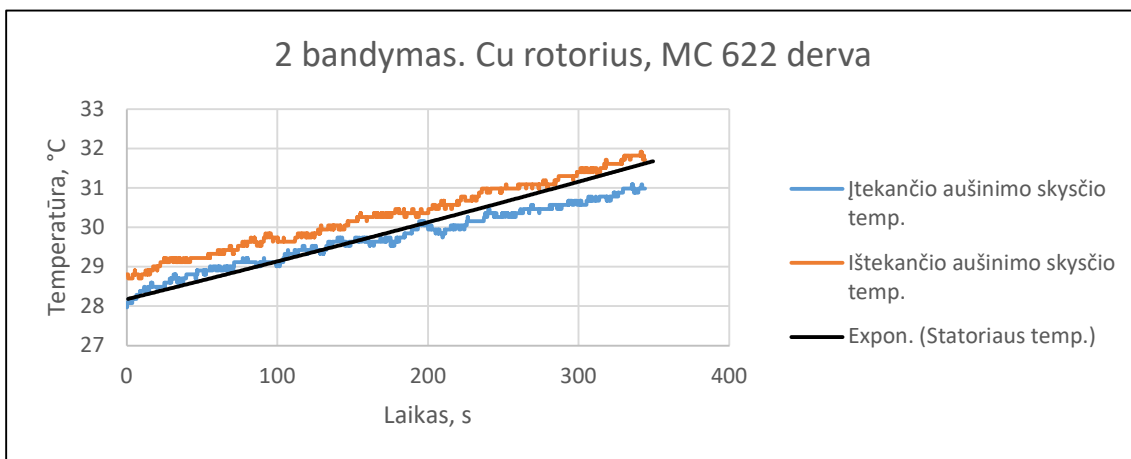
Antrasis tyrimas atliekamas naudojant 35 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



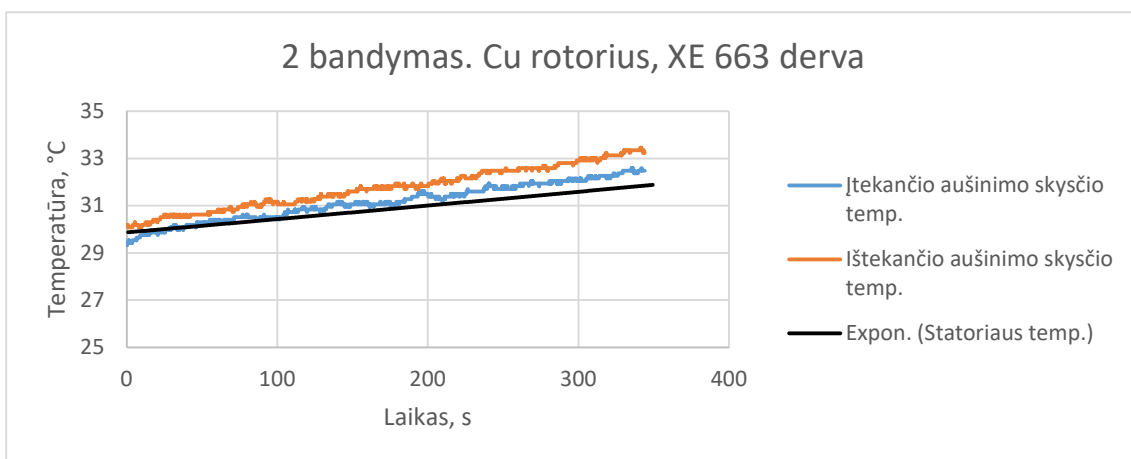
**27 pav.** Antras bandymas - Al rotorius, MC 622 derva



**28 pav.** Antras bandymas - Al rotorius, XE 663 derva



**29 pav.** Antras bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**30 pav.** Antras bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Gauti duomenys surašomi į lenteles:

**6 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos antrojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	35,61	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	23,67	kW
Nuostoliai	11,93	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,66	
Variklio apkrova, $L$	36,56	%

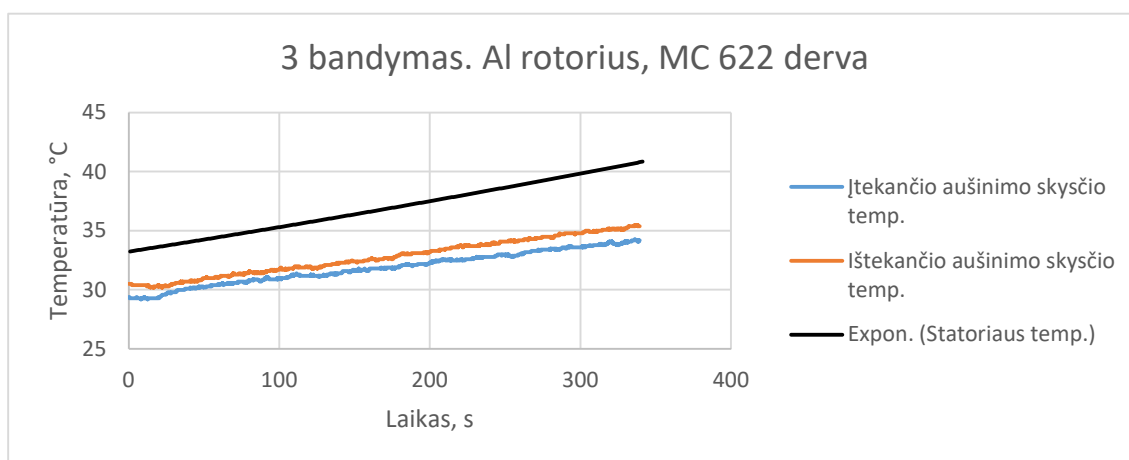
**7 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos antrojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	35,63	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	24,65	kW
Nuostoliai	10,97	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,69	
Variklio apkrova, $L$	36,49	%

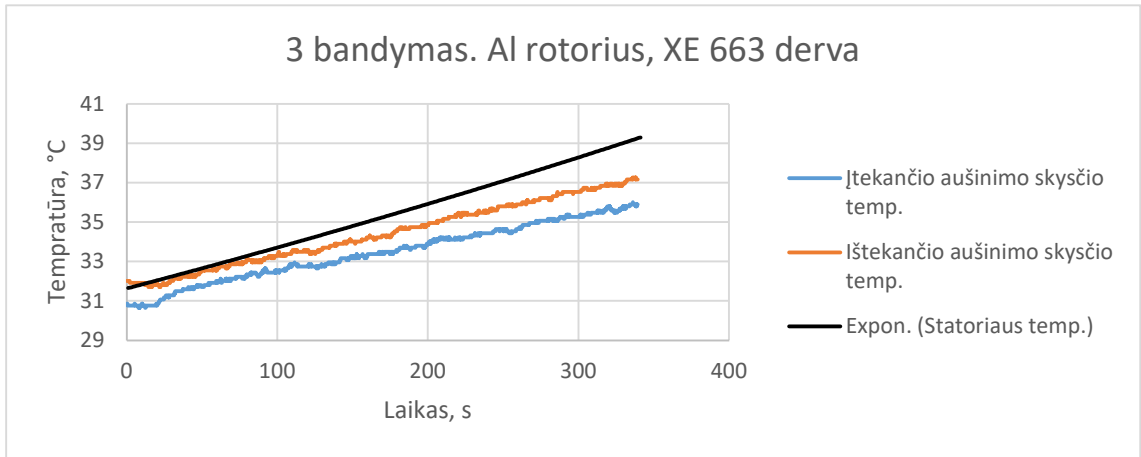
Gauti rezultatai parodo, jog aušinimo sistema antrojo bandymo metu variklio pilnai nebenuaušina. Stabdantysis variklis varantįjį variklį apkrovė apie 36,5 %. Iš rezultatų matoma, jog pakeitus MC 622 dervą į XE 663 dervą naudojant aliuminį rotorių variklio aušinimas pagerėjo. Pagerėjimą įtakojo geresnės XE 663 dervos šiluminės sklaidos savybės. Pakeitus rotorių iš aliuminio į varinį taip pat pastebimas geresnis variklio aušinimas dėl geresnių vario šilumos sklaidos savybių. Sukomplektavus varinį rotorių bei XE 663 dervą matomas ženkliai geresnis aušinimo sistemos veikimas. Variklis su variniu rotoriumi patyrė 0,96 kW mažesnius nuostolius ir dirbo 4,4 % naudingiau.

### 3.4. Trečias bandymas. 52,5 kW apkrova

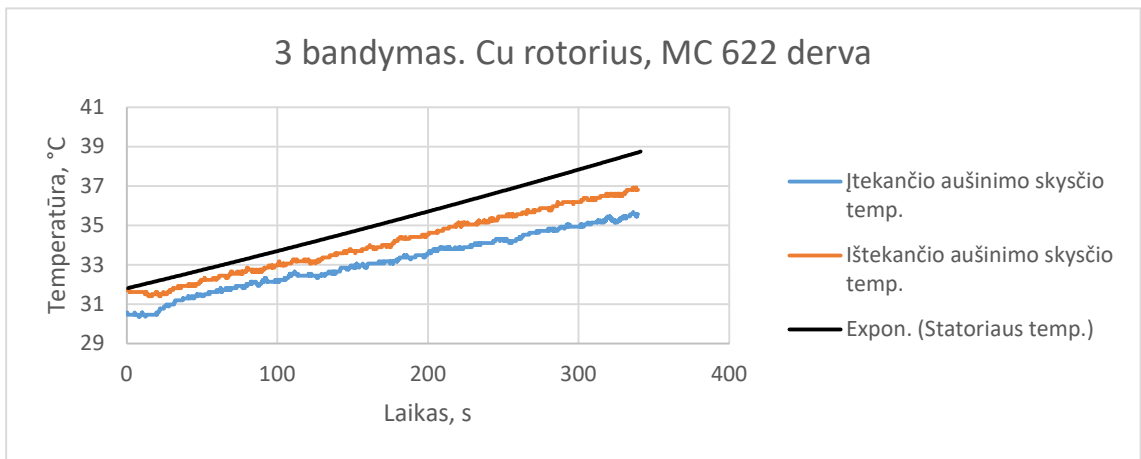
Trečiasis tyrimas atliekamas naudojant 52,5 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



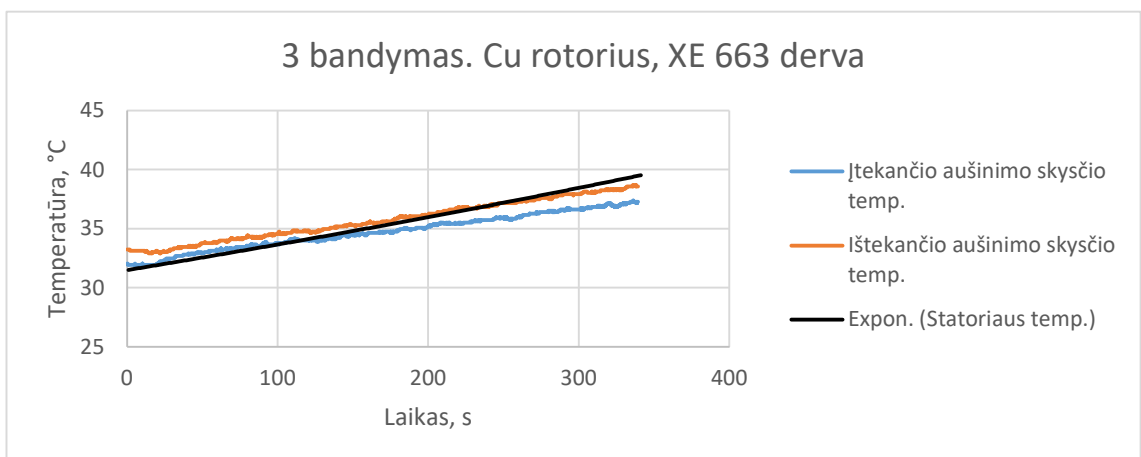
**31 pav.** Trečias bandymas - Al rotorius, MC 622 derva



**32 pav.** Trečias bandymas - Al rotorius, XE 663 derva



**33 pav.** Trečias bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**34 pav.** Trečias bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Apskaičiuotos variklių charakteristikos surašomos į lenteles:

**8 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos trečiojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	50,39	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	34,96	kW
Nuostoliai	15,43	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,69	
Variklio apkrova, $L$	58,19	%

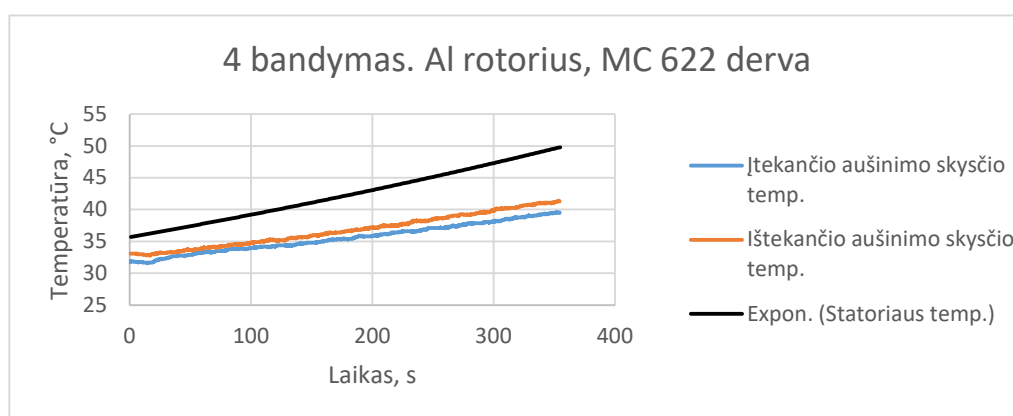
**9 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos trečiojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	50,41	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	36,36	kW
Nuostoliai	14,04	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,72	
Variklio apkrova, $L$	57,33	%

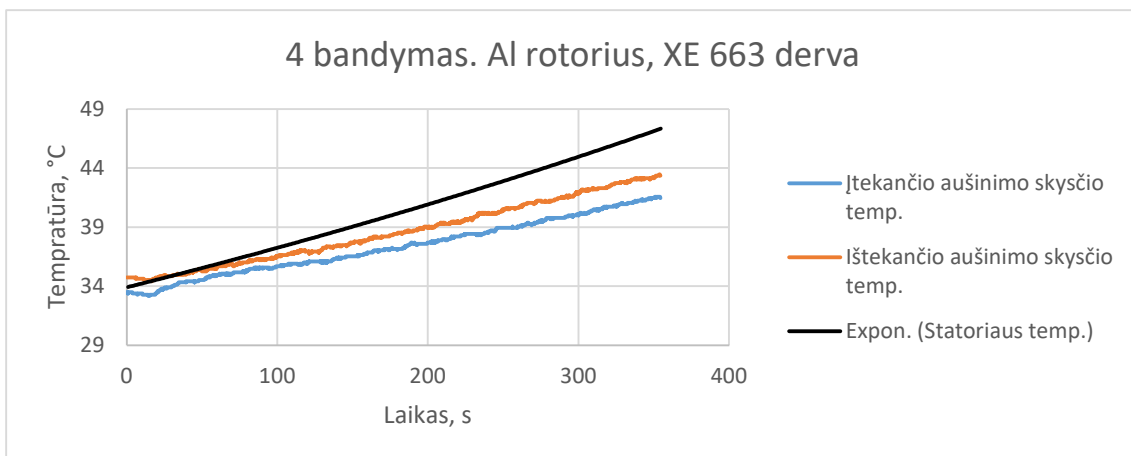
Gautuose rezultatuose pradedamas išvelgti variklio kaitimas. Stabdantysis variklis varantįjį variklį apkrauna 58,2 %, kai naudojamas aliuminis rotorius ir 57,3 %, kai naudojamas varinis rotorius. Naudojant aliuminį rotorių ir MC 622 dervą matoma, kad variklis pradeda kaisti. Rezultatai taip pat parodo, jog pakeitus MC 622 dervą į XE 663 dervą naudojant aliuminį rotorių variklio aušinimas nepakito. Pakeitus rotorių iš aliuminio į varinį ir naudojant MC 622 dervą variklio aušinimas nežymiai pagerėjo. Sukomplektavus varinį rotorių bei XE 663 dervą matomas ženkliai geresnis aušinimas. Tokius rezultatus įtakojo tai, jog aliuminis rotorius bei MC 622 derva turi prastesnes šilumos laidumo savybes, dėl kurių variklio konstrukcija nesugeba perduoti pakankamai šilumos į aušinimo sistemą dėl didelės variklio masės ir terminės inercijos. Variklis su variniu rotoriumi patyrė 1,39 kW mažesnius nuostolius ir dirbo 4,2 % naudingiau.

### 3.5. Ketvirtas bandymas. 70 kW apkrova

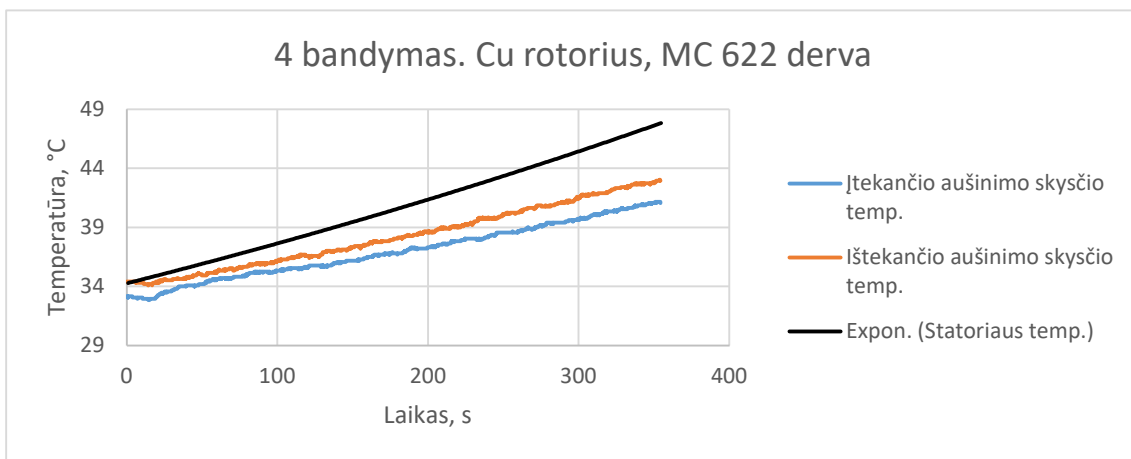
Ketvirtasis tyrimas atliekamas naudojant 70 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



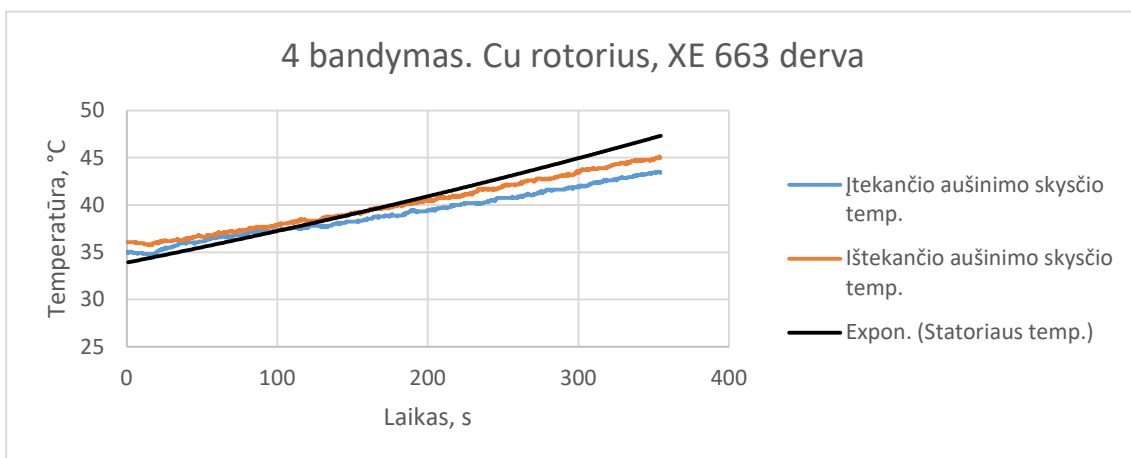
**35 pav.** Ketvirtas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva



**36 pav.** Ketvirtas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva



**37 pav.** Ketvirtas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**38 pav.** Ketvirtas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Apskaičiuotos variklių charakteristikos surašomos į lenteles:

**10 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos ketvirtojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	64,01	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	44,73	kW
Nuostoliai	19,27	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,70	
Variklio apkrova, $L$	78,08	%

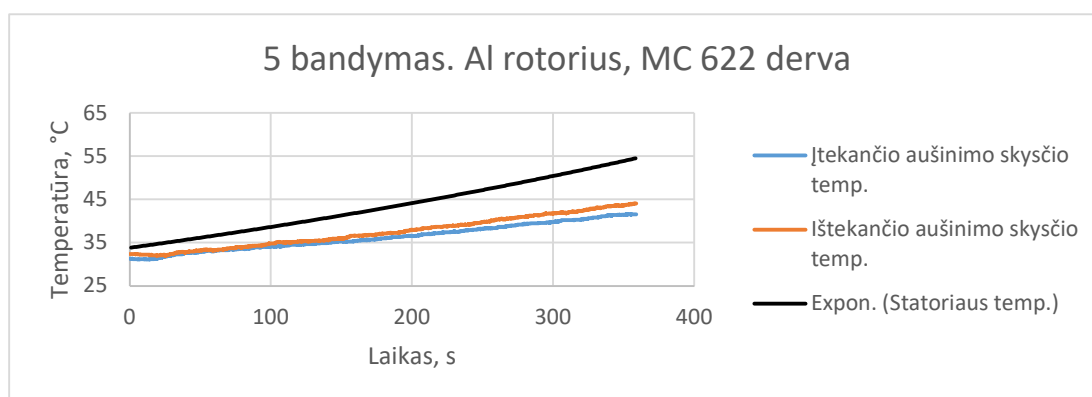
**11 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos ketvirtojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	64,04	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	46,51	kW
Nuostoliai	17,52	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,72	
Variklio apkrova, $L$	77,10	%

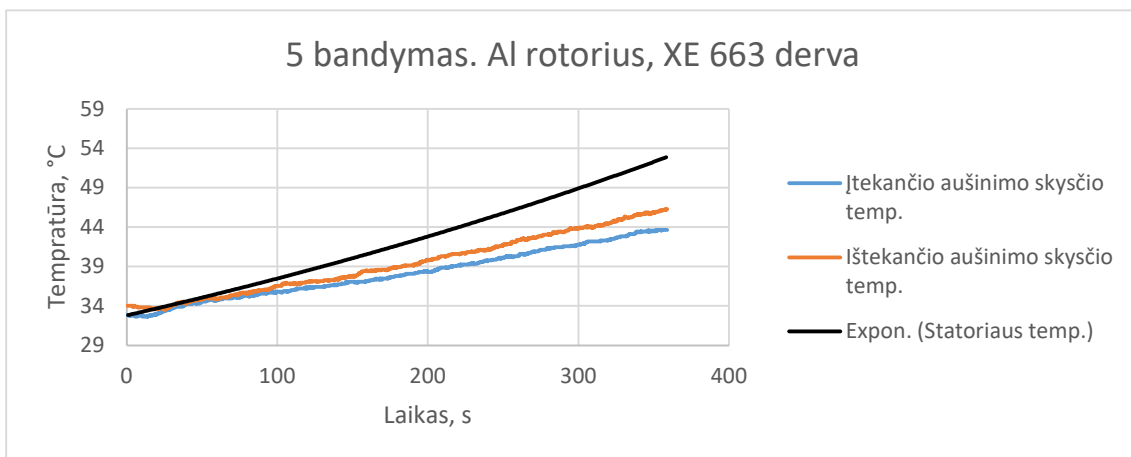
Gautuose rezultatuose matomas akivaizdus variklio kaitimas. Varantysis variklis su aliuminiu rotoriumi yra apkraunamas 78,08 %, su variniu – 77,1 %. Grafikuose galima įžvelgti variklio aušinimo priklausomybę nuo kintančios variklio konstrukcijos. Keičiant po 1 kintamąjį su geresnėmis šilumos sklaidos savybėmis statoriaus temperatūros kreivė tampa artimesnė aušinimo skysčio temperatūros kreivėms. Apjungus varinį rotorių bei XE 663 derivą matomas ženklus kreivių skirtumas tarp variklio konstrukcijų aušinimo. Nepaisant to, visais atvejais variklio statoriaus temperatūros kreivė pamažu tolsta nuo aušinimo skysčio temperatūrų kreivių indikuodama, jog variklis nebegali perduoti pakankamai šilumos, kad nusiaušintų. Variklis su variniu rotoriumi patyrė 1,75 kW mažesnius nuostolius ir dirbo 2,8 % naudingiau.

### 3.6. Penktas bandymas. 87,5 kW apkrova

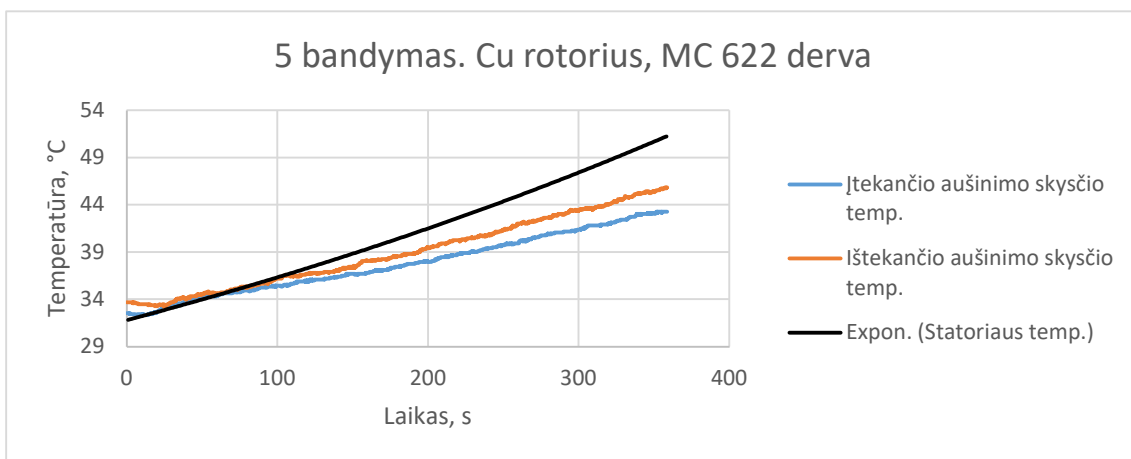
Penktasis tyrimas atliekamas naudojant 87,5 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



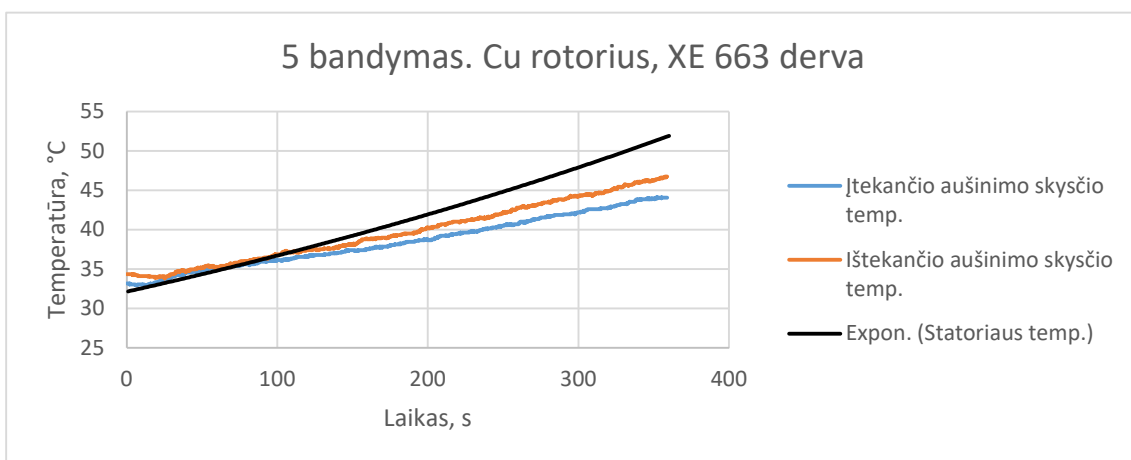
**39 pav.** Penktas bandymas - Al rotorius, MC 622 deriva



**40 pav.** Penktas bandymas - Al rotorius, XE 663 dervai



**41 pav.** Penktas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**42 pav.** Penktas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Apskaičiuotos variklių charakteristikos surašomos į lenteles:

**12 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos penktojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	70,30	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	50,56	kW
Nuostoliai	19,73	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,70	
Variklio apkrova, $L$	98,46	%

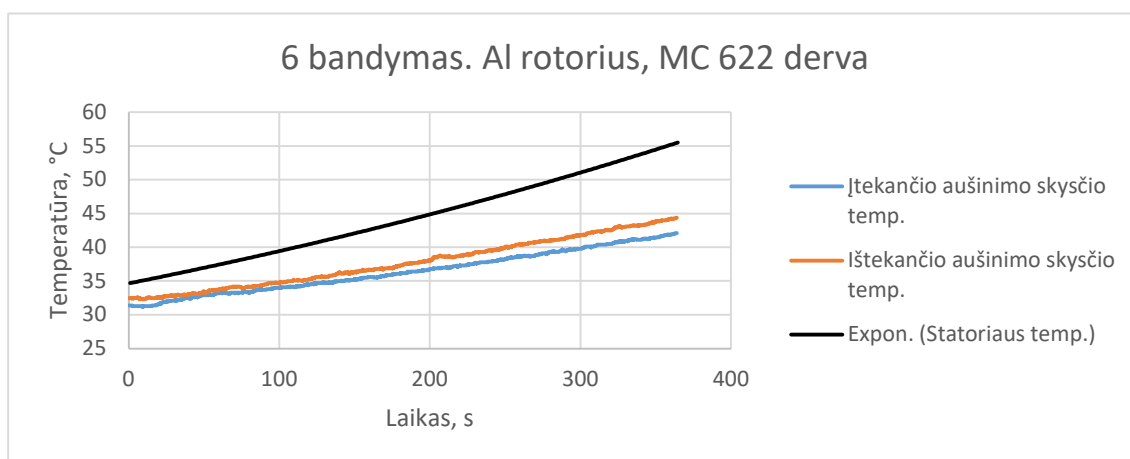
**13 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos penktojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	70,33	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	52,59	kW
Nuostoliai	17,73	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,73	
Variklio apkrova, $L$	93,54	%

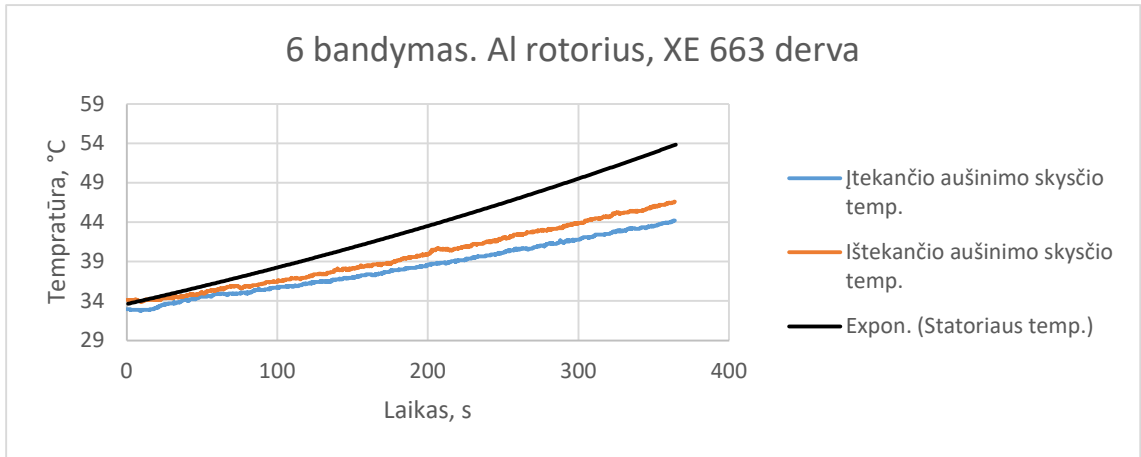
Gautuose penktojo bandymo rezultatuose kaip ir ketvirtojo bandymo rezultatuose matomas tendencingumas. Varikliai nepriklausomai nuo jų konstrukcijos kaista, tačiau, varinio rotoriaus ir XE 663 dervos kombinacija yra pranašiausia iš visų aušinimo atžvilgiu. Varantysis variklis su aliuminiu rotoriumi buvo apkrautas 98,46 %, su variniu – 93,54 %. Didesnį apkrovimo skirtumą nei praeituose bandymuose galėjo įtakoti blogai parinkti variklio valdymo parametrai. Variklis su variniu rotoriumi patyrė 2 kW mažesnius nuostolius ir dirbo 4,2 % naudingiau.

### 3.7. Šeštasis bandymas. 105 kW apkrova

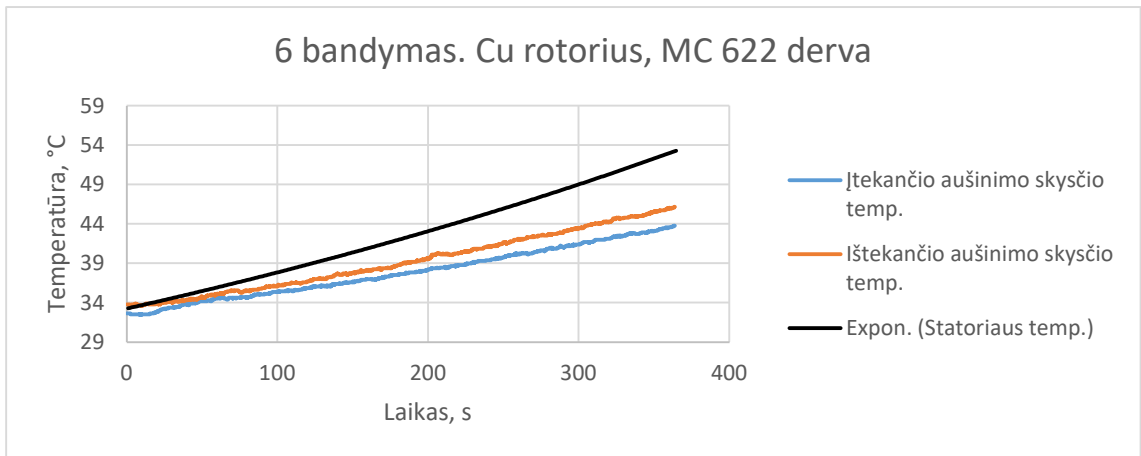
Šeštasis tyrimas atliekamas naudojant 105 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



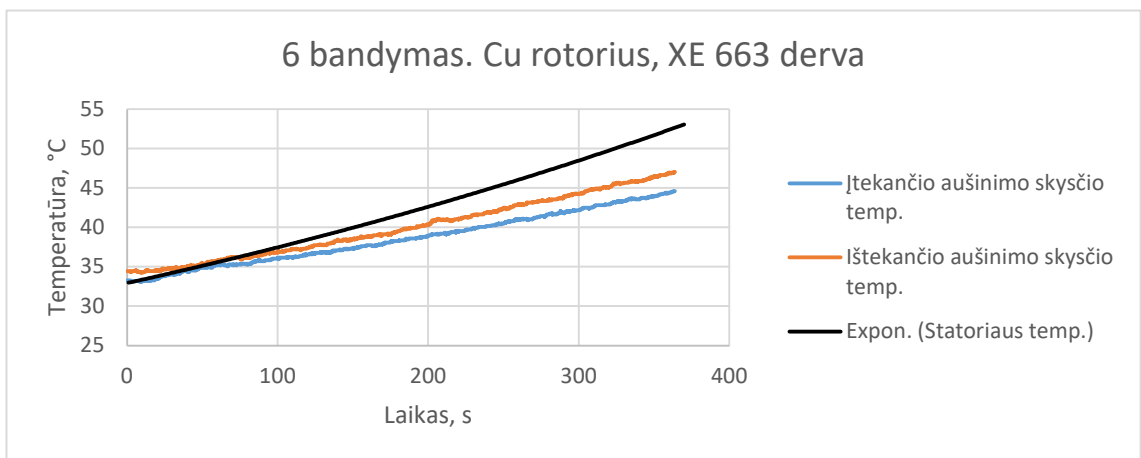
**43 pav.** Šeštasis bandymas - Al rotorius, MC 622 dervai



**44 pav.** Šeštas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva



**45 pav.** Šeštas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**46 pav.** Šeštas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Apskaičiuotos variklių charakteristikos surašomos į lenteles:

**14 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos šeštojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	69,00	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	50,50	kW
Nuostoliai	18,49	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,72	
Variklio apkrova, $L$	88,42	%

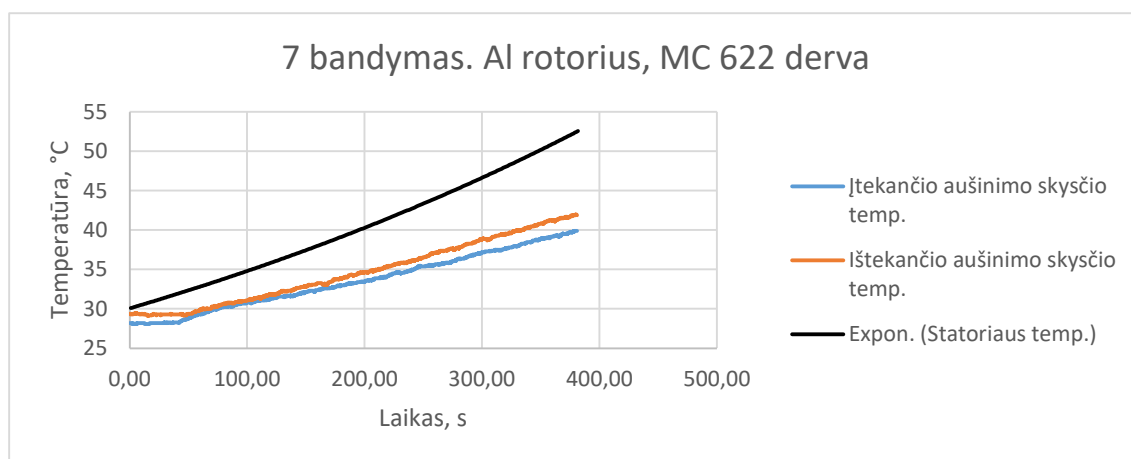
**15 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos šeštojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	69,02	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	52,53	kW
Nuostoliai	16,49	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,75	
Variklio apkrova, $L$	91,12	%

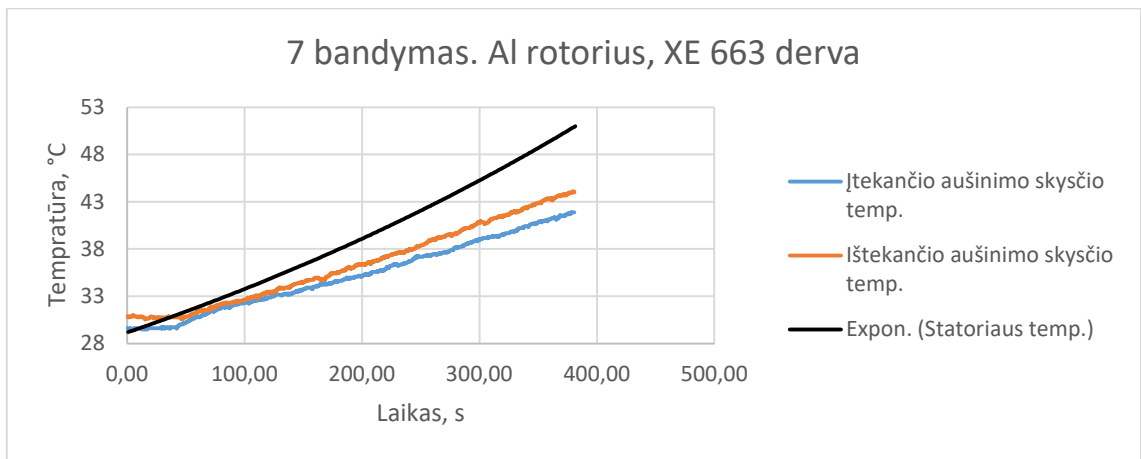
Gautuose rezultatuose matomas besitęsianti variklio kaitimo tendencija. Varantysis variklis su aliuminiu rotoriumi buvo apkrautas 88,42 %, su variniu – 91,12 %. Variklis su variniu rotoriumi patyrė 2 kW mažesnius nuostolius ir dirbo 4 % naudingiau nei variklis su aliuminiu rotoriumi.

### 3.8. Septintas bandymas. 122,5 kW apkrova

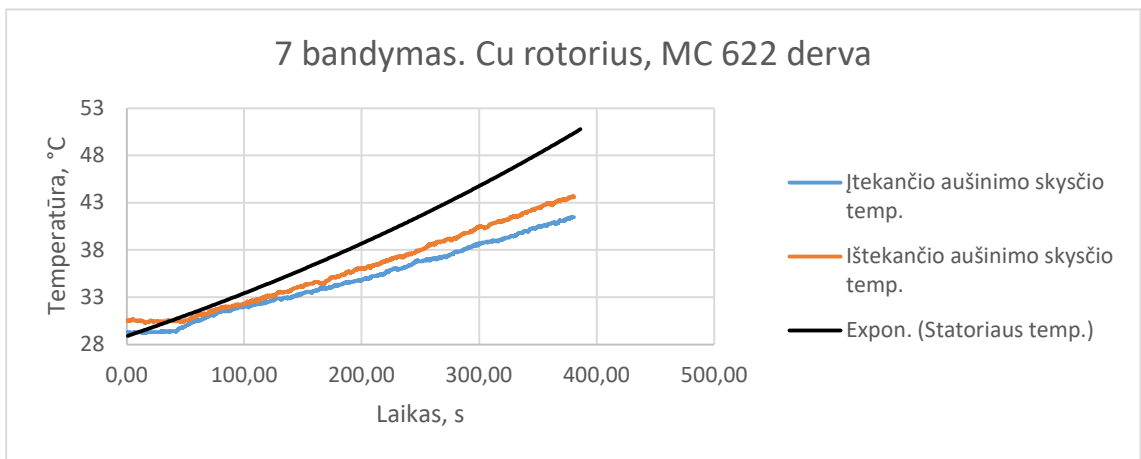
Septintasis tyrimas atliekamas naudojant 122,5 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



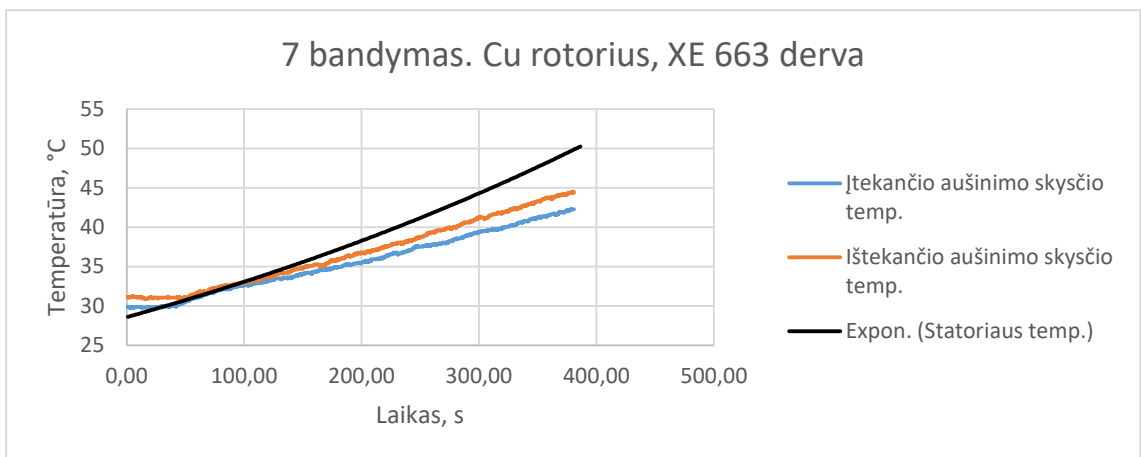
**47 pav.** Septintas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva



**48 pav.** Septintas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva



**49 pav.** Septintas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**50 pav.** Septintas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Apskaičiuotos variklių charakteristikos surašomos į lenteles:

**16 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos septintojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	69,45	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	50,57	kW
Nuostoliai	18,88	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,73	
Variklio apkrova, $L$	95,8	%

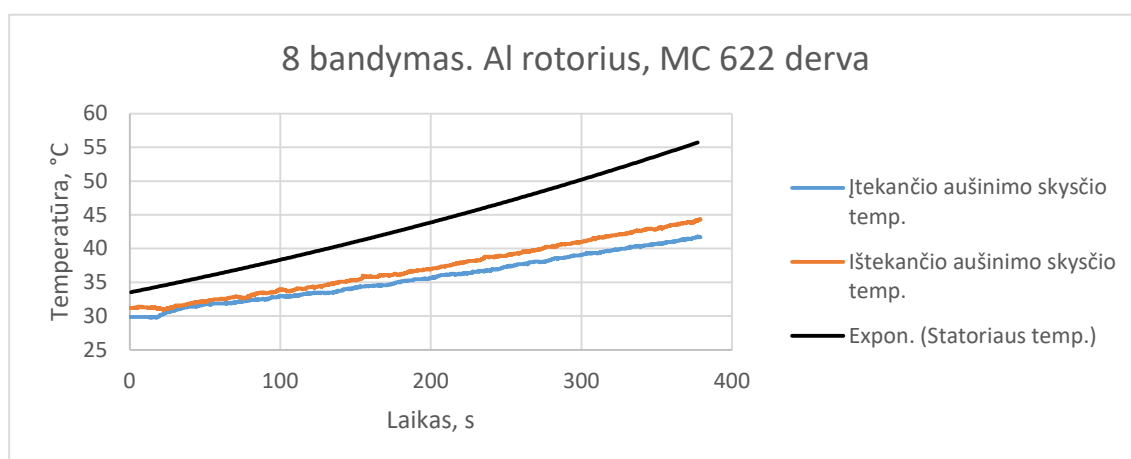
**17 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos septintojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	69,48	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	52,71	kW
Nuostoliai	16,77	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,76	
Variklio apkrova, $L$	96,96	%

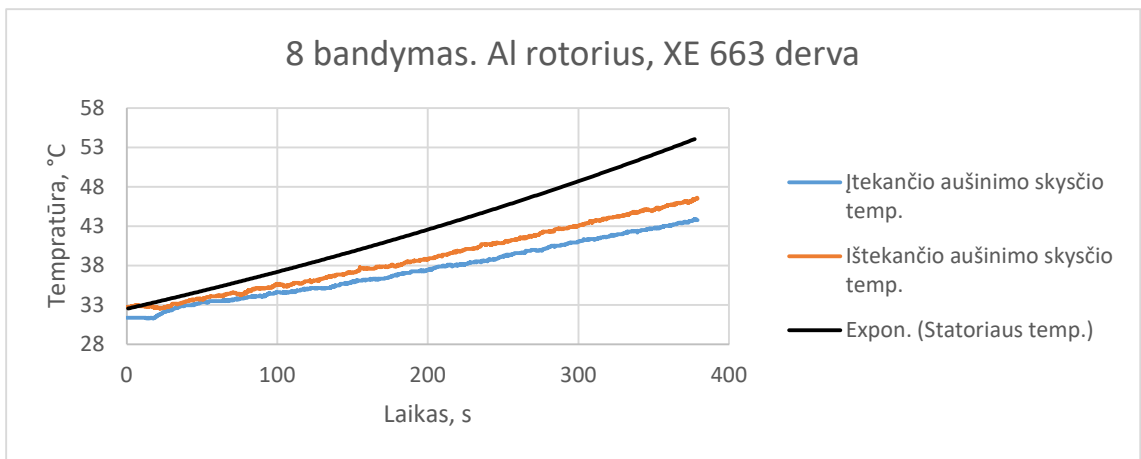
Gautuose rezultatuose galima išvelgti tam tikrą varinio rotoriaus ir XE 663 dervos kombinacijos pranašumą. Nepaisant to, jog varikliai visais atvejais kaista, minėta kombinacija variklio kaitimą prailgina ir variklis perkais vėliau nei visų kitų konstrukcijų varikliai. Šio bandymo metu varantysis variklis su aliuminiu rotoriumi 95,8 %, su variniu – 96,96 %. Variklis su variniu rotoriumi 2,11 kW mažesnius nuostolius ir dirbo 4 % naudingiau nei su aliuminiu rotoriumi.

### 3.9. Aštuntas bandymas. 140 kW apkrova

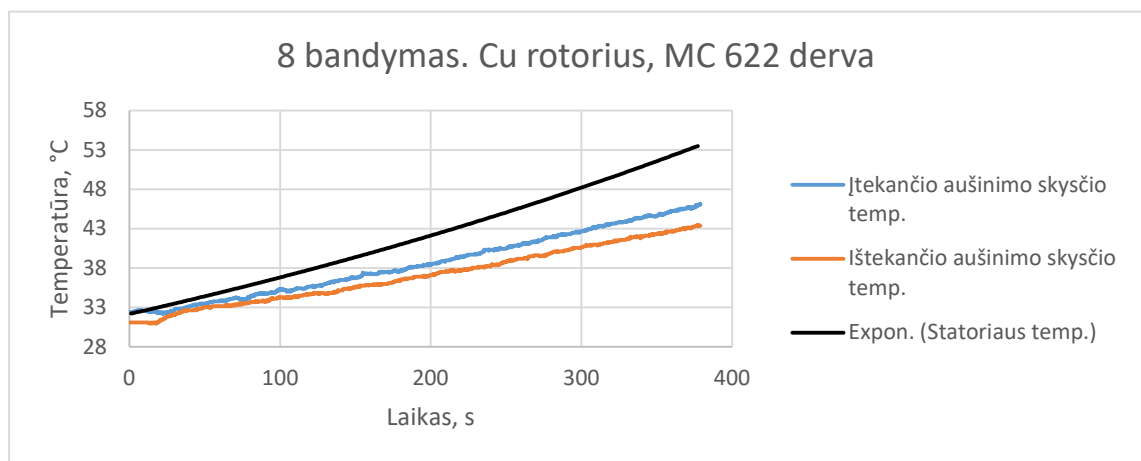
Aštuntasis tyrimas atliekamas naudojant 140 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



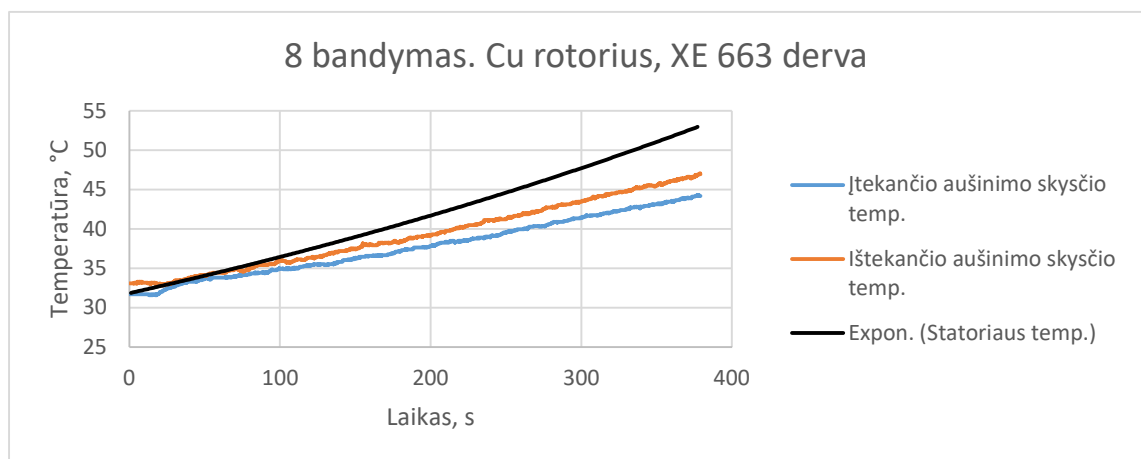
**51 pav.** Aštuntas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva



**53 pav.** Aštuntas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva



**54 pav.** Aštuntas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**52 pav.** Aštuntas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Apskaičiuotos variklių charakteristikos surašomos į lenteles:

**18 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos aštuntojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	67,03	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	50,58	kW
Nuostoliai	16,44	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,74	
Variklio apkrova, $L$	96,96	%

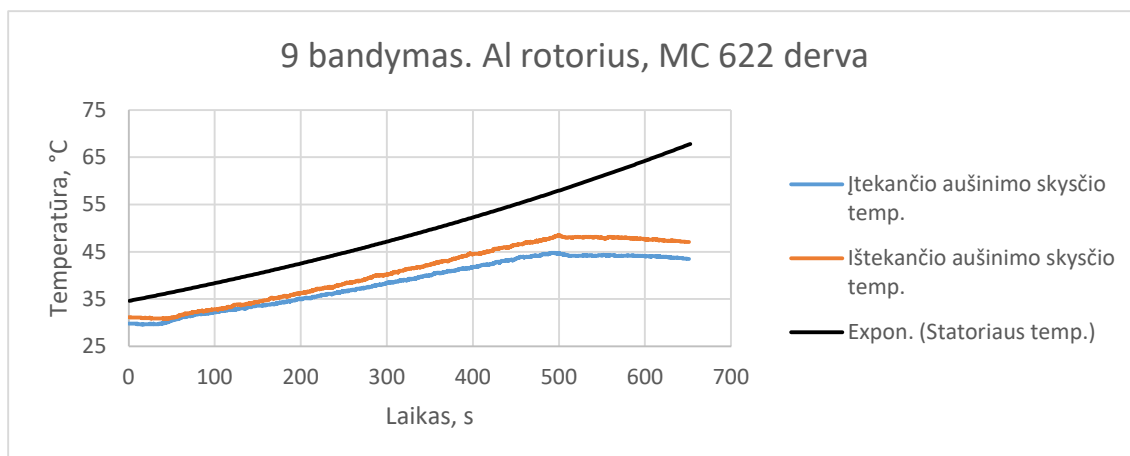
**19 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos aštuntojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	67,05	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	52,65	kW
Nuostoliai	14,40	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,77	
Variklio apkrova, $L$	97,71	%

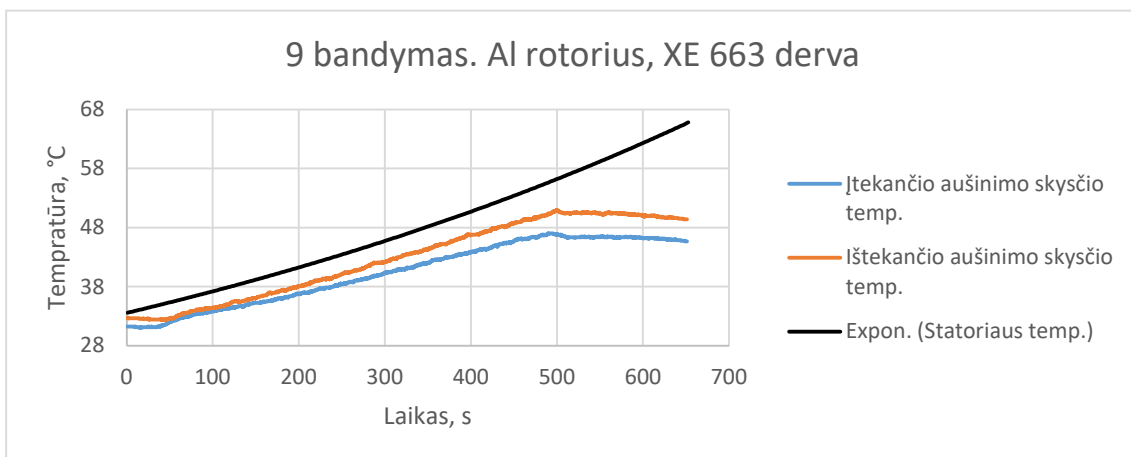
Kaip ir praeitame bandyme matomas varinio rotoriaus ir XE 663 dervos kombinacijos pranašumas. Aštuntojo bandymo metu varantysis variklis su aliuminiu rotoriumi buvo apkrautas 96,96 %, su variniu – 97,13 %. Variklis su variniu rotoriumi patyrė 2,04 kW mažesnius nuostolius ir dirbo 3,9 % naudingiau.

### 3.10. Devintas bandymas. 157,5 kW apkrova

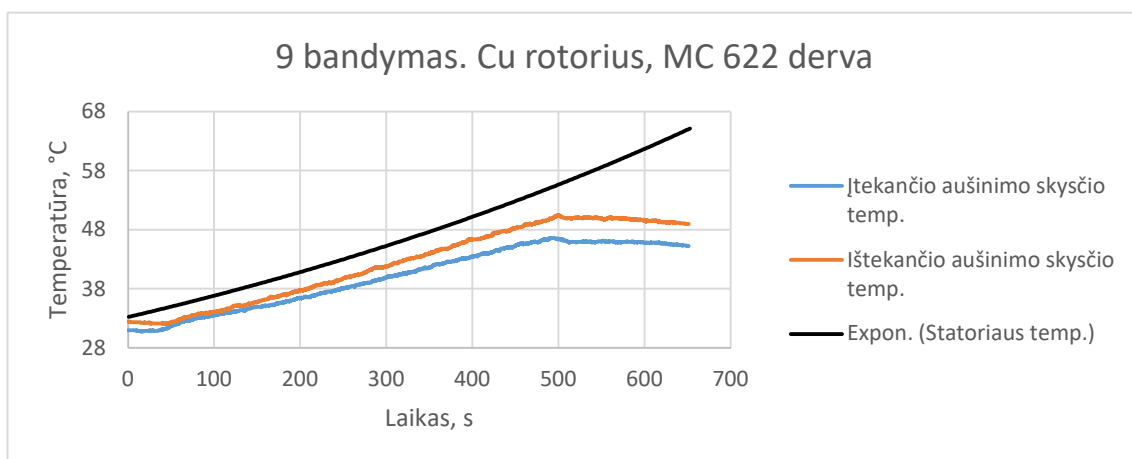
Devintasis tyrimas atliekamas naudojant 157,5 kW apkrovą. Gauti rezultatai:



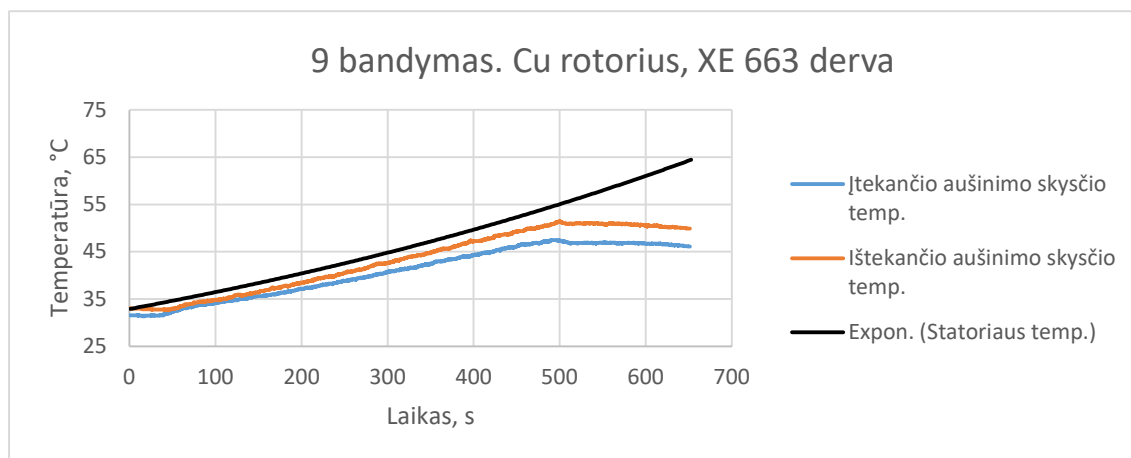
**55 pav.** Devintas bandymas - Al rotorius, MC 622 derva



**56 pav.** Devintas bandymas - Al rotorius, XE 663 derva



**58 pav.** Devintas bandymas - Cu rotorius, MC 622 derva



**57 pav.** Devintas bandymas - Cu rotorius, XE 663 derva

Apskaičiuotos variklių charakteristikos surašomos į lenteles:

**20 lentelė.** Variklio su aliuminiu rotoriumi charakteristikos devintojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Al rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	67,68	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	50,44	kW
Nuostoliai	17,24	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,75	
Variklio apkrova, $L$	98,87	%

**21 lentelė.** Variklio su variniu rotoriumi charakteristikos devintojo bandymo metu

Variklio charakteristikos su Cu rotoriumi	Matmuo	Matavimo vnt.
Vid. elektrinė galia, $P_{in}$	67,71	kW
Vid. mechaninė galia, $P_{out}$	52,46	kW
Nuostoliai	15,25	kW
Vid. variklio naudingumas, $\eta$	0,78	
Variklio apkrova, $L$	98,87	%

Devintasis bandymas vyko ilgiau siekiant išsiaiškinti variklio perkaitimo ribą. Iš praktikos žinoma, kad variklis perkaista, kai statorius pasiekia 60 °C temperatūrą. Bandymo pradžia vykdyta taip pat kaip ir visų praėjusių bandymų, tačiau, šio bandymo metu varančiajam varikliui buvo leista sukis apie 2,5 minutės ilgiau. Duomenų fiksavimas buvo tęsiamas po stabdančiojo variklio apkrovos panaikinimo. Grafikuose matomos ko ne identiškos kreivės, taip pat kaip ir praėjusiuose bandymuose galima įžvelgti varinio rotoriaus bei XE 663 dervos kombinacijos pranašumą. Šio bandymo rezultatai įrodo anksčiau minėtą tezę, jog varinio rotoriaus bei XE 663 dervos kombinacija pavėlina variklio perkaitimą. Grafikuose matoma, jog bandymo pabaigoje minėtos konstrukcijos variklio statorius pasiekė maksimalią 58 °C temperatūrą. Varinio rotoriaus ir MC 622 dervos kombinaciją turintis statorius pasiekė 58,5 °C temperatūrą. Naudojant aliuminį rotorį ir XE 663 dervą pasiekta 59,5 °C temperatūra, o aliuminio rotoriaus ir MC 622 dervos kombinacija pasiekė 61 °C temperatūrą. Šio bandymo metu varantysis variklis buvo apkrautas 98,87 %. Variklis su variniu rotoriumi patyrė 1,99 kW mažesnius nuostolius ir dirbo 3,9 % naudingiau.

#### 4. Rezultatų apibendrinimas

Paprastesniam rezultatų apdorojimui svarbiausi kiekvieno bandymo punktai surašomi į bendras lenteles.

Vertinant 21 lentelėje pateiktus duomenis pastebimas varinio rotoriaus pranašumas prieš aliuminį rotorių. Ko ne visais atvejais variklis su variniu rotoriumi dirbo 4 % naudingiau už variklį su aliuminiu rotoriumi.

**22 lentelė.** Aliuminio ir varinio rotoriaus konstrukcijų nuostoliai, naudingumas

Bandymas	Aliuminis rotorius		Varinis rotorius	
	Nuostoliai, kW	Naudingumas, $\eta$	Nuostoliai, kW	Naudingumas, $\eta$
Pirmas	7,18	0,67	6,57	0,70
Antras	11,93	0,66	10,97	0,69
Trečias	15,43	0,69	14,04	0,72
Ketvirtas	19,27	0,70	17,52	0,72
Penktas	19,73	0,70	17,73	0,73
Šeštas	18,49	0,72	16,49	0,75
Septintas	18,88	0,73	16,77	0,76
Aštuntas	16,44	0,74	14,40	0,77
Devintas	17,24	0,75	15,25	0,78

Vertinant 22 lentelėje pateiktus duomenis matoma, jog aušinimo sistema geba nuaušinti iš variklio perimamą šilumą.

**23 lentelė.** Iš variklio perduodamų ir aušinimo sistemos nuaušinamų temperatūrų skirtumai

Bandymas	Aukščiausia aušinimo sistemai perduota temperatūra iš variklio, °C	Aušinimo sistemos nuaušinta temperatūra, °C
Pirmas	0,9	1,1
Antras	0,9	1,2
Trečias	1,4	1,9
Ketvirtas	1,9	2,3
Penktas	2,5	3,1
Šeštas	2,3	3,6
Septintas	2,2	3,3
Aštuntas	2,7	4
Devintas	4	4,3

Nepaisant to, kad aušinimo sistema geba nuaušinti iš variklio perimamą šilumą, tyrimų rezultatuose matomas akivaizdus variklio kaitimas.

Naudojantis žemiau pateikta formule apskaičiuojamas 9 bandymo aušinimo galia:

$$Q = (V \cdot \rho) \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (5)$$

čia:

$Q$  – aušinimo galia, kW

$V$  - srauto greitis, m<sup>3</sup>/s

$\rho$  – aušinimo skysčio tankis, kg/m<sup>3</sup>

$C_p$  – aušinimo skysčio šiluminė talpa, kJ/kg/K

$\Delta T$  – temperatūros skirtumas, K

Apskaičiuojama aušinimo sistemos radiatoriaus nuaušinama galia 9 bandymo metu:

$$Q = (V \cdot \rho) \cdot C_p \cdot \Delta T = (0,000216 \cdot 1082) \cdot 3,283 \cdot 4,3 = 3,29 \text{ kW}$$

Apskaičiuojama kiek variklis geba perduoti šiluminės galios į aušinimo sistemą 9 bandymo metu:

$$Q = (V \cdot \rho) \cdot C_p \cdot \Delta T = (0,000216 \cdot 1082) \cdot 3,283 \cdot 4 = 3,07 \text{ kW}$$

Atlikti skaičiavimai įrodo anksčiau minėtą tezę, jog aušinimo sistema nuaušina iš variklio perimamą šilumą, tačiau, variklis kaista.

Variklio perkaitimo problema kyla iš paties variklio - variklis nesugeba pakankamai perduoti sukuriamos šilumos į aušinimo sistemą. Tą gali įtakoti kelios priežastys:

- Didelė variklio masė, kuri sukuria didelę terminę inerciją.
- Blogai parinkti statoriaus aušinimo kanalai.
- Prastos variklio konstrukcijos medžiagų šiluminio laidumo savybės.
- Oro tarpas, esantis tarp rotoriaus ir statoriaus trukdo efektyviai aušinti variklį.

Apibendrinant tyrimo rezultatus galima teigti, jog tyrimo eigoje pavyko nustatyti kaip skirtingos variklio konstrukcijos įtakoja variklio naudingumą bei jo aušinimą. Iš gautų rezultatų matomas akivaizdus varinio rotoriaus pranašumas prieš aliuminį rotorių. Kiekvieno bandymo metu variklis su variniu rotoriumi dirbo apie 4 % naudingiau už variklį su aliuminiu rotoriumi. Taip pat nustatyta, jog geresnes šilumos sklaidos savybes turinti XE 663 derva bei vario medžiaga nors ir nežymiai, tačiau, pagerina variklio aušinimą. Naudojant minėtą kombinaciją galima išvelgti lėtesnį variklio kaitimą. Tyrimo eigoje įrodyta, jog aušinimo sistema yra nepakankamai efektyvi nuaušinti iš variklio perimamą šilumą. Kaip pavyzdį pasirinkus 9 bandymą, kuomet variklis buvo apkrautas maksimaliai, apskaičiuota, jog variklis į aušinimo sistemą geba perduoti vos 3,07 kW šiluminės galios, tuo tarpu aušinimo sistema tuo pačiu momentu gali nuaušinti 3,29 kW šiluminės galios. Variklio kaitimo problema nustatyta pačiame variklyje dėl kelių galimų priežasčių: didelė variklio masė, sukurianti terminę inerciją, blogai parinkti statoriaus aušinimo kanalai, prastos variklio konstrukcijos šiluminės sklaidos savybės ir oro tarpas, esantis tarp rotoriaus ir statoriaus girdelės. Išsprendus variklio dizaino problemas variklio perduodama šiluminė galia padidės, o esamas šiluminių galių skirtumas per mažas, kad sistema efektyviai nuaušintų variklį.

## Išvados

1. Atlikus literatūros analizę apžvelgti keli variklio korpuso aušinimo būdai. Nustatytas tinkamiausias korpuso aušinimo būdas – aušinimas skysčiu. Remiantis moksliniais tyrimais nustatyta, jog aušinimo sistema yra efektyvesnė kai variklio korpuse esantys kanalai yra išdėstomi nuosekliai. Apžvelgta, kad varis turi didesnę šilumos ir elektros laidumą nei aliuminis, o tai lemia efektyvesnę šilumos perdavimą į aušinimo sistemą bei naudingesnį variklio darbą. Remiantis literatūros šaltiniais nustatyta, kad epoksidinės dervos pasižymi maža dielektrine konstanta ir nuostoliais, o tai padeda sumažinti energijos nuostolius ir pagerinti variklio efektyvumą.
2. Vertinant aušinimo sistemos efektyvumą nustatyta, jog aušinimo sistema yra nepakankamai efektyvi, kad nuaušintų variklį. Apskaičiuota aušinimo sistemos aušinimo galia 9 bandyme – 3,29 kW, variklio perduodama šiluminė galia – 3,07 kW. Nepaisant to, jog aušinimo sistema geba nuaušinti realiai perduodamą variklio šilumą, variklis kaista. Vertinant tai daroma išvada, jog aušinimo sistema yra nepakankamai efektyvi, kadangi padidėjus variklio perduodamai šiluminei galiai esamas skirtumas tarp minėtų galių yra per mažas, kad aušinimo sistema efektyviai nuaušintų variklį.
3. Gautuose rezultatuose matoma, jog keičiant rotorius iš aliuminio į varinį bei naudojant MC 622 dervą išgaunamas apie 1-2 °C temperatūrų skirtumas. Šį temperatūrų skirtumą lėmė geresnės vario medžiagos šiluminio laidumo savybės (1 priedas). Vario šiluminis laidumas yra 385 W/(m·K), tuo tarpu aliuminio šiluminis laidumas yra 205 W/(m·K). Geresnės vario medžiagos šiluminio laidumo savybės lemia greitesnę ir efektyvesnę sukuriamos šilumos variklyje perdavimą į aušinimo sistemą, todėl variklio konstrukcija su variniu rotoriumi aušinama geriau nei su aliuminiu rotoriumi.
4. Tyrimo metu nustatyta, jog naudojant aliuminio rotorius ir keičiant epoksidinę dervą iš MC 622 į XE 663 išgaunamas apie 1 °C temperatūrų skirtumas. Šį temperatūrų skirtumą lėmė geresnės XE 663 epoksidinės dervos šiluminio laidumo savybės (2 priedas). XE 663 epoksidinės dervos šiluminis laidumas yra 1,6 W/(m·K), MC 622 epoksidinės dervos šiluminis laidumas yra 0,85 W/(m·K). Geresnės XE 663 epoksidinės dervos šiluminio laidumo savybės lemia greitesnę ir efektyvesnę sukuriamos šilumos variklyje perdavimą į aušinimo sistemą, todėl variklio konstrukcija su XE 663 epoksidine derva aušinama geriau nei su MC 622 epoksidine derva.
5. Nustatyta, jog naudojant varinį rotorius prie bet kokios apkrovos variklis dirba apie 4 % naudingiau nei naudojant aliuminį rotorius. Tokį naudingumą skirtumą lemia apie geresnės vario elektros laidumo savybės. Vario elektros laidumas -  $5,98 \cdot 10^7$  S/m, aliuminio –  $3,5 \cdot 10^7$  S/m.
6. Pasiūlymai elektrinio variklio aušinimo tobulinimui:
  - Atlikti variklio generuojamos šilumos skaičiavimus įvertinant visų naudojamų medžiagų charakteristikas. Remiantis gautais rezultatais nustatyti variklio korpusui reikalingos formos aušinimo kanalus bei aušinimo sistemai reikalingą srautą, kad aušinimo sistema būtų efektyvi.
  - Atlikti tyrimą naudojant aušinimo skysčio ir alyvos aušinimo sistemos derinį ir įvertinti kaip alyva veikia variklio aušinimą.

## Literatūros sąrašas

1. Wang, Q., Liu, Z., & Zhang, Y. (2019). *Thermal management of electric vehicle motors: A review*. *Energies*, 12(10), 1944. doi: 10.3390/en12101944
2. Li, W., Li, J., Zhou, X., Liu, H., & Sun, F. (2019). *Design and analysis of a new heat pipe cooling system for electric vehicle motors*. *Journal of Power Sources*, 422, 23-32. doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.03.078
3. Zhang, Y., Liu, Z., Wang, Q., & Chen, J. (2019). *An Overview of Thermal Management for Electric Vehicles*. *International Journal of Energy Research*, 43(6), 2068-2091. doi: 10.1002/er.4424
4. Farzaneh-Gord, M., Azizpour, H., & Emadi, A. (2018). *Thermal management of electric vehicle (EV) powertrain: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4177-4193.
5. Liu, Q., Zhao, Y., Wang, J., Zhang, H., & Liu, Y. (2016). *Cooling strategy analysis and optimization of electric vehicle driving motor*. *Applied Thermal Engineering*, 109, 518-525.
6. Wei, W., Li, W., Li, Y., Li, W., Li, J., & Li, Z. (2020). *Investigation of a cooling system for an electric vehicle traction motor based on computational fluid dynamics*. *International Journal of Thermal Sciences*, 149, 106267.
7. Jafari, H., Vaez-Zadeh, S., & Moghani, J. S. (2017). *A review on electric vehicle motors overheating protection techniques*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 403-413.
8. Pan, X., Li, G., & Ji, X. (2019). *Aging evaluation and thermal simulation of electric vehicle driving motor stator winding insulation system*. *IEEE Access*, 7, 3193-3200.
9. Sarwar, S. M., & Hannan, M. A. (2017). *A review on thermal management of electric vehicle (EV) batteries and motors*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 414-428.
10. <https://www.haydonkerkpitman.com/learningzone/whitepapers/temperature-effects-on-dc-motor-performance>
11. Dincer, I., & Rosen, M. A. (2015). *Cooling of Electric Motors in Electric Vehicles*. *Entropy*, 17(3), 1035-1053.
12. <https://electrical-engineering-portal.com/troubleshooting-winding-problems-three-phase-electric-motors>
13. Wang, X., & Xie, K. (2016). *Thermal management of electric vehicles: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1254-1265.
14. Jin, J.-M. (2019). *Carbon fiber reinforced polymer composites for thermal management in electric vehicles*. *Composites Part B: Engineering*, 163, 626-640.
15. Zhu, S., & Xu, G. (2018). *Thermal management of electric vehicle motors and inverters: A review*. *Energy Science and Engineering*, 6(6), 683-698.
16. Gao, J., Wang, J., & Wu, Y. (2019). *Review on thermal management of electric vehicle*. *Journal of Power Sources*, 439, 227045.
17. Xu, H., Sun, Z., Liu, X., Xu, M., & Wang, X. (2018). *A review on thermal management systems for lithium-ion batteries in electric vehicles*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1978-1995.
18. Fernandez-Cabanas, M., Riera-Guasp, M., & Vidal-Idiazabal, J. (2019). *A review of electric vehicle motor control algorithms and their influence on the electric machine temperature*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 177-193.
19. Sarkar, A., Hsu, P. Y., & Roy, K. (2019). *Electric motor thermal management materials and methods: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 99, 1-20.

20. Zhang, Y., Chen, X., Hu, J., & Gao, Y. (2021). *Thermal management of electric vehicle powertrain: a review*. *Journal of Thermal Science*, 30(2), 295-309.
21. S.M. Sarwar, M.A. Hannan (2015). *A review on thermal management of electric vehicle (EV) batteries and motors*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 56, Pages 1275-1289.
22. Pechánek, R., & Bouzek, L. (2012). *Analyzing of two types water cooling electric motors using computational fluid dynamics*. 2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), LS2e.4-1-LS2e.4-5.
23. D. Dincer and M. Rosen (2014) *Cooling of Electric Motors in Electric Vehicles*. *Applied Thermal Engineering*, Volume 66, Issues 1-2, Pages 395-408.
24. Putra, N., & Ariantara, B. (2017). *Electric motor thermal management system using L-shaped flat heat pipes*. *Applied Thermal Engineering*, 126, 1156–1163. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.01.090
25. Liu, X., Zhang, C., & Cao, B. (2016). *A review of thermal management technologies for lithium-ion battery systems in electric and hybrid vehicles*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64, 106-128.
26. Wang, H., Hu, X., Ma, X., & Zhou, H. (2017). *An experimental investigation of the oil-cooled electric vehicle motor thermal management system*. *Applied Thermal Engineering*, 119, 90-96.
27. X. Wang and K. Xie. (2014). *Thermal management of electric vehicles: A review*. *Applied Energy*, Volume 115, Part A, 15 September 2014, Pages 164-190.
28. J.-M. Jin. (2020). *Carbon fiber reinforced polymer composites for thermal management in electric vehicles*. *Journal of Materials Science*, Volume 55, Issue 26, Pages 12025-12040.
29. <https://www.compositesworld.com/news/reducing-heat-in-ev-motors-via-fiber-reinforced-thermoset-housing-and-stator>
30. S. Zhu and G. Xu. (2018). *Thermal management of electric vehicle motors and inverters: A review*. *Applied Energy*, Volume 210, Pages 413-436.
31. Bonnett, A. H., Holtz, J., Müller, S., & De Doncker, R. W. (2020). *High-efficiency induction motor drive for electric vehicles: A review*. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 6(3), 839-853.
32. Kothari, D. P., & Gupta, V. (2019). *Design and analysis of induction motor for electric vehicle application*. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(4S2), 61-65.
33. Un-Noor, Fuad & Padmanaban, Sanjeevikumar & MIHET-POPA, Lucian & Mollah, Mohammad & Hossain, Eklas. (2017). *A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development*. *Energies*. 10. 10.3390/en10081217.
34. Soparat, Jenwit, and Chi-na Benyajati. *Liquid Cooled Induction Motor: Computational Design, Heat Transfer Analysis, Parametric Study, and Performance Testing*. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, vol. 2, no. 1, 2013, pp. 1–6. JSTOR
35. Abdul Karim, Z. A., & Mohd Yusoff, A. H. (2014). *Cooling System for Electric Motor of an Electric Vehicle Propulsion*. *Advanced Materials Research*, 903, 209–214. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.903.209
36. Huang, J., Shoai Naini, S., Miller, R., Rizzo, D., Sebeck, K., Shurin, S., & Wagner, J. (2019). *A Hybrid Electric Vehicle Motor Cooling System- Design, Model, and Control*. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1–1. doi:10.1109/tvt.2019.2902135

37. Assaad, B., Mikati, K., Tran, T. V., & Negre, E. (2018). *Experimental Study of Oil Cooled Induction Motor for Hybrid and Electric Vehicles*. 2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM). doi:10.1109/icelmach.2018.8507058
38. E. Ilhan Konukseven, Ozkan Arikan, and Huseyin Akpolat. (2019). *Comparison of Copper and Aluminum Rotor Performance in Induction Motors: An Experimental Study*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 66(10), 7702-7710. doi: 10.1109/TIE.2019.2891145
39. M. R. Mohammadi, M. R. Feyzi, and H. Pourmahmoud. (2020). *Copper Rotor Versus Aluminum Rotor in Induction Motors: A Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110279. doi: 10.1016/j.rser.2020.110279
40. Zdanowski, M., Kowal, J., & Wieszała, R. (2019). *Electrical insulation of windings in electrical machines*. Przegląd Elektrotechniczny, 95(10), 27-31.
41. M. Karadagli, S. Yurtdas, and A. C. Akkanet. *Properties of Epoxy Resins and Their Suitability for Electrical Insulation*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 1, pp. 1-11, February 2010.
42. S. R. Kim, S. H. Lee, and S. H. Lee. *Effect of cross-linking density of epoxy resin on insulation performance of stator coil in induction motor*. Journal of Mechanical Science and Technology, vol. 32, no. 9, pp. 4249-4255, September 2018.
43. <https://www.forsensor.com/quality-12688022-0-500nm-shaft-to-shaft-rotating-torque-sensor-for-motor-test-bench.html>

## Priedai

### 1 priedas. MC 622 epoksidinės dervos charakteristikos



#### SYSTEM SPECIFICATIONS

Property	Conditions	Method	Resin MC 62	Hardener W 363	UM
Viscosity at:	25°C	IO-10-50 (EN13702-2)	9.000÷13.000	10÷30	mPas
Density at:	25°C	IO-10-51 (ASTM D 1475)	1,68÷1,72	-	g/ml
Gelation time	25°C 100ml	IO-10-52a (UNI 8701)	-	52÷62	min

#### TYPICAL SYSTEM CHARACTERISTICS

Property	Conditions	Method	Value	UM
Mixing ratio by weight		for 100 g resin	100:13	g
Mixing ratio by volume		for 100 ml resin	100:23	ml
Resin Colour			Various colours	
Hardener Colour			Blue Neutral	
Density hardener	25°C	IO-10-51 (ASTM D 1475)	0,97÷1,01	g/ml
Initial mixture viscosity at:	25°C	IO-10-50 (EN13702-2)	1.400÷2.200	mPas
	40°C	IO-10-50 (EN13702-2)	800÷1.100	mPas
Pot life	25°C (50mm;200ml)	IO-10-53 (*)	25÷35	min
Pot life (doubled initial viscosity)	25°C	IO-10-50 (EN13702-2) (*)	35÷45	min
	40°C	IO-10-50 (EN13702-2) (*)	15÷25	min
Exothermic peak	25°C (50mm;200ml)	IO-10-53 (*)	100÷115	°C
Gelation time	25°C (15ml;6mm)	IO-10-73 (*)	2,5÷3,5	h
	40°C (15ml;6mm)	IO-10-73 (*)	1,0÷2,0	h
	50°C (15ml;6mm)	IO-10-73 (*)	50÷70	min
Gelation time	40°C 100ml	IO-10-52b (UNI 8701)	44÷52	min
Demoulding time	25°C (15ml;6mm)	(*)	8÷10	h
Post-curing	60°C	(**)	(15)	h

#### TYPICAL CURED SYSTEM PROPERTIES

##### Properties determined on specimens cured: 24 h TA + 15 h 60°C

Property	Conditions	Method	Value	UM
Surface			Bright	
Density	25°C	IO-10-54 (ASTM D 792)	1,61÷1,63	g/ml
Hardness	25°C	IO-10-68 (ASTM D 2240)	85÷90	Shore D/15
Glass transition (Tg)	1h50°C + 2h70°C 24hTA + 15h60°C	IO-10-69 (ASTM D 3418)	53÷58 60÷67	°C °C
Water absorption (24h RT)		IO-10-70 (ASTM D 570)	0,20÷0,30	%
Water absorption (2h 100°C)		IO-10-70 (ASTM D 570)	0,90÷1,10	%
Linear thermal expansion (Tg -10°C)		IO-10-71 (ASTM E 831)	35÷45	10 <sup>-6</sup> /°C
Linear thermal expansion (Tg +10°C)		IO-10-71 (ASTM E 831)	120÷130	10 <sup>-6</sup> /°C
Thermal shock (n°10 cycles passed)		IO-10-67 (inserto metallico Olyphant)	- 55÷+ 180	°C
Flammability		IO-10-68 (UL 94 V-0)	4	mm
Max recommended operating temperature		IEC 60085 (***)	155	°C
Thermal conductivity		IO-10-87 (ASTM C518)	0,85÷0,95	W/(m°K)
Dielectric constant at:	25°C	IO-10-59 (ASTM D 150)	4÷5	
Loss factor at:	25°C	IO-10-59 (ASTM D 150)	30÷50	x 10 <sup>-3</sup>
Volume resistivity at:	25°C	IO-10-60 (ASTM D 257)	2 x 10 <sup>14</sup> ÷10 x 10 <sup>14</sup>	Ohm x cm
Dielectric strength	25°C	IO-10-61 (ASTM D 149)	21÷24	kV/mm
Flexural strength		IO-10-66 (ASTM D 790)	63÷73	MN/m <sup>2</sup>
Maximum strain		IO-10-66 (ASTM D 790)	1,0÷1,5	%
Flexural elastic modulus		IO-10-66 (ASTM D 790)	6.500÷7.500	MN/m <sup>2</sup>
Tensile strength		IO-10-63 (ASTM D 638)	38÷45	MN/m <sup>2</sup>
Elongation at break		IO-10-63 (ASTM D 638)	1,0÷2,0	%
Compressive strength		IO-10-72 (ASTM D 695)	84÷88	MN/m <sup>2</sup>

## 2 priedas. XE 663 epoksidinės dervos charakteristikos



**DEMAK POLYMERS S.r.l.**

Strada del Cascinotto, 163 – 10156 Torino (TO) – (ITALY)

Phone Nr. (+39) 011.223.98.89 – Fax Nr. (+39) 011.223.98.86

eMail: [info@demak.it](mailto:info@demak.it) – web: [demakgroup.com](http://demakgroup.com)

### SYSTEM SPECIFICATIONS

	PROPERTY	CONDITION	VALUE	UM	METHOD
<b>XE 663</b> RESIN	Color		Neutral or Black		
	Density	25°C	2.55 – 2.65	g/ml	ASTM D1475
	Viscosity	25°C	50.000 – 100.000	mPas	ISO 3219
60°C		4.000 – 6.000	mPas	ISO 3219	
<b>DK 50/6L</b> HARDENER	Color	/	Neutral	/	/
	Specific Gravity	25°C	0.94 – 0.96	g/ml	ASTM D1475
	Viscosity	25°C	20 - 40	mPas	ISO 3219
Mixture ratio	By weight		100: 8.5	g	/
	By volume		100:18	ml	/
	Initial mix viscosity	40°C	1.500 – 2.500	mPas	ISO 3219
60°C		650 – 850	mPas	ISO 3219	
Reactivity Data	Gel time-20g *	25°C	3 – 4	h	DIN 16945-16916
		60°C	60 - 80	min	DIN 16945-16916
	Pot Life -20g – double initial viscosity *	60°C	10 - 14	min	IST04P15
Suggested Curing time	(*) ( **)		4h – 70°C		

### PROPERTIES OF CURED SYSTEM (\*\*\*)

Properties determined on standard test specimens cured 4h at 70°C.

PROPERTY	CONDITION	VALUE	UM	METHOD
Density	25°C	2.3 – 2.4	g/ml	ASTM D 1475
Hardness	25°C	85 - 90	shoreD	ASTM D2240
Glass Transition Temperature (DSC)		70 - 80	°C	ASTM D3418
Linear Thermal Expansion (Tg-10°C)		20 - 30	ppm/°C	DIN 53752
Linear Thermal Expansion (Tg+10°C)		90 - 100	ppm/°C	DIN 53752
Thermal conductivity	25°C	1.6 – 1.7	W/(m°K)	ISO 22007-2
Recommended operating temperature (***)		200	°C	IEC 60085
Dielectric constant	25°C	4.2-4.5		
Dielectric Strength (50 Hz - 2 mm)	25°C	20 - 23	kV/mm	ASTM D149
Flexural strenght		68	MN/m2	
Volume resistivity	25°C	1x10 <sup>15</sup> - 3x10 <sup>15</sup>	Ohm x cm	ASTM D257
Comparative Tracking Index ( Sol. A)	25°C	> 600	V	IEC 60112