



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS

Eimantas Jonavičius

ELEKTROS VARIKLIO AUŠINIMO SISTEMOS SUKŪRIMAS
IR TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Valdas Eidukynas

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas
(parašas) Prof. dr. Vytautas Grigas
(data)

ELEKTROS VARIKLIO AUŠINIMO SISTEMOS SUKŪRIMAS
IR TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Mechanikos inžinerija 621H30001

Vadovas

(parašas) Doc. dr. Valdas Eidukynas
(data)

Recenzentas

(parašas)
(data)

Projektą atliko

(parašas) Eimantas Jonavičius
(data)

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

(Fakultetas)

Eimantas Jonavičius

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Elektros variklio aušinimo sistemos sukūrimas ir analizė“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 15 m. birželio 03 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Eimanto Jonavičiaus** baigiamasis projektas tema „Elektros variklio aušinimo sistemos sukūrimas ir analizė“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Eimantas, J. Elektros variklio aušinimo sistemos sukūrimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Valdas Eidukynas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, Mechanikos inžinerijos katedra.

Kaunas, 2015. 54 psl.

SANTRAUKA

Vis labiau populiarėjant alternatyvia energija varomam transportui, gamintojai yra priversti ieškoti naujų sprendimų. Vienas iš pagrindinių komponentų elektromobiliuose ir hibridiniuose automobiliuose yra elektros variklis. Šio darbo tikslas yra suprojektuoti skysčiu aušinamą asinchroninį elektros variklį, kurio maksimali galia 63 kW, išvystomas sukimo momentas 900 Nm.

Elektros variklio korpuso projektavimui naudojama kompiuterinio projektavimo sistema SolidWorks. Sukūrus kompiuterinį modelį panaudota integruota kompiuterinės skysčių analizės programa FlowSimulation. Atlikus elektros variklio temperatūrinę analizę nuspręsta naudoti antrine apvijų izoliacijai skirtą epoksidinę dervą, kuri perduoda šilumą iš statoriaus apvijų į korpusą. Kompiuterinės analizės rezultatai rodo, kad tai elektros variklio maksimalią temperatūrą sumažina nuo 127,54 °C iki 84,659 °C, o aušinimo skysčio temperatūra padidėja nuo 28-30 °C iki 33-37 °C.

Teorinių skaičiavimų patikrinimui buvo pagamintas bandomasis elektros variklis. Sumontavus jį į automobilį ir atlikus bandymus realiomis sąlygomis nustatyta kad elektros variklio temperatūra priklauso nuo važiavimo režimo, greitėjimo ir stabdymo ciklų skaičiaus bei aplinkos temperatūros. Bandymų metu nustatyta, kad vidutinė elektros variklio korpuso išorės temperatūra yra 36 – 38 °C. Gauti rezultatai patenka į teorinių skaičiavimų ribas (teorinė korpuso išorės temperatūra – 30 – 45 °C), todėl skaičiavimus galima laikyti patikimais. Teoriniai skaičiavimai ir praktiniai bandymai rodo, kad elektros variklio maksimali temperatūra nepasieks maksimalių leidžiamų verčių.

Eimantas, J. Electrical motor cooling system design and analysis. Master final work / supervisor doc. dr. Valdas Eidukynas; Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Mechanical Engineering .

Kaunas, 2015. 54 p.

SUMMARY

Popularity of alternative energy powered transport is growing every day and manufacturers are forced to look for new solutions to make reliable, long lasting products. One of the key component of electric and hybrid cars is electric motor. The aim of this study is to design liquid-cooled asynchronous electric motor with 63 kW peak power and 900 Nm torque.

Electric motor housing is designed with computer-aided design software SolidWorks. Developed motor is used in computational fluid dynamics analysis with SolidWorks integrated software Flow Simulation. Temperature analysis of electric motor showed that using epoxy resin significantly reduces maximum temperature of motor components. Epoxy resin transfers heat from the stator windings to the housing and maximum temperature decreases from 127.54 °C to 84.659 °C and the coolant temperature increases from 28 – 30 °C to 33 – 37 °C.

For theoretical calculations confirmation test electric motor was made. After testing in real life conditions dependency on driving mode, acceleration and braking cycles and ambient temperature is visible. Tests showed that average temperature of motor housing outside surface is 36 – 38 °C. The results falls within the limits of theoretical analysis (theoretical housing external surface temperature is between 30 – 45 °C), so the calculations can be considered reliable. Theoretical calculations and practical tests show that the electric motor maximum temperature will not reach the maximum allowable levels.

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS IR MECHATRONIKOS FAKULTETAS

Mechanikos inžinerijos

katedros vedėjas

(parašas, data)

(vardas, pavardė)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS

Studijų programa MECHANIKOS INŽINERIJA

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo ar taikomojo pobūdžio darbas (projektas), kuriam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu magistrantas turi parodyti, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, įgijęs pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Baigiamuoju darbu bei jo gynimu magistrantas turi parodyti savo kūrybingumą, gebėjimą taikyti fundamentines mokslo žinias, socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansinių galimybių išmanymą, informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės įgūdžius, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo įgūdžius, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžius, gebėjimą tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema: elektros variklio aušinimo sistemos sukūrimas ir tyrimas _____.

Patvirtinta 2015 m. gegužės mėn. 11 d. dekanų įsakymu Nr. ST17-F-11-2.

2. Darbo tikslas: sukurti hibridinio N1 klasės sunkvežimio elektros variklio aušinimo sistemą, ir atlikti šio variklio temperatūrinių parametru skaitinius ir eksperimentinius tyrimus esant realioms automobilio eksploatacijos sąlygoms _____.

3. Darbo struktūra: esamų produktų ir sprendimų apžvalga; projektavimui ir tyrimui naudojamų priemonių parinkimas; elektros variklio modernizavimas įgalinantis jo aušinamą skysčiu; variklio temperatūrinių režimų skaitinis modeliavimas; elektros variklio bandymai realiomis sąlygomis; išvados. _____.

4. Reikalavimai ir sąlygos: maksimali elektros variklio galia – 63 kW; elektros variklio sukimo momentas – 900 Nm; apvijų izoliacijos apsaugos klasė – F (maksimali temperatūra – 155 °C). _____.

5. Darbo pateikimo terminas 2015 m. birželio mėn. 2 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

Išduota magistrantui Eimantui Jonavičiui _____.

Užduotį gavau _____
(magistranto vardas, pavardė)

(parašas, data)

Vadovas _____
(pareigos, vardas, pavardė)

(parašas, data)

TURINYS

ĮVADAS.....	8
1. ESAMŲ PRODUKTŲ IR SPRENDIMŲ APŽVALGA	10
1.1 BLDC ir indukcinio variklių analizė ir palyginimas.....	12
1.2 BLDC ir indukcinio AC variklių valdymas	14
1.3 Asinchroninių elektros variklių istorija	14
1.4 Asinchroninių elektros variklių aušinimo būdai	15
1.5 Analogiškų sistemų apžvalga.....	17
1.5.1 Brusa sistema	17
1.5.2 Odyne sistema	18
1.5.3 EDI-Drive sistema	19
1.6 Projektuojamo variklio panaudojimo galimybių analizė	19
2. PROJEKTAVIMUI IR TYRIMUI NAUDOJAMŲ PRIEMONIŲ PARINKIMAS	21
2.1. Kompiuterinis variklio modelio kūrimas CAD sistemomis	21
2.2. Skaičiuojamajai skysčių dinamikos (CFD) analizei naudojamos kompiuterinės sistemos	21
3. ASINCHRONINIO ELEKTROS VARIKLIO AUŠINAMO SKYSČIU KONSTRUKCIJOS APRAŠYMAS.....	24
3.1. Projektuojamo elektros variklio geometrija ir darbo parametrai	24
3.2. Elektros variklio rotoriaus ašies ir korpuso projektiniai skaičiavimai.....	24
4. SKYSČIU AUŠINAMO ELEKTROS VARIKLIO TEMPERATŪRINIŲ REŽIMŲ SKAITINIS TYRIMAS.....	27
4.1. Elektros variklio korpuso aušinimo parametrų analizė.....	28
4.2. Elektros variklio korpuso, su srauto kreipiančiosiomis, aušinimo parametrų analizė.....	32
4.3. Elektros variklio korpuso aušinimo parametrų analizė, panaudojus antrinę izoliaciją.....	35
5. EKSPERIMENTINIS ELEKTROS VARIKLIO AUŠINIMO PARAMETRŲ TYRIMAS	38
5.1. Bandomojo elektros variklio gamyba	38
5.2. Elektros variklio bandymo metodikos aprašymas	42
5.3. Bandymo rezultatų apžvalga.....	42
IŠVADOS	46
LITERATŪRA.....	48
PRIEDAI.....	49
1 Priedas. Elektros variklio korpuso brėžinys	50
2 Priedas. Elektros variklio galinio dangtelio brėžinys.....	51
3 Priedas. Elektros variklio rotoriaus ašies brėžinys.....	52
4 Priedas. Elektros variklio statoriaus plokštelės brėžinys	53
5 Priedas. Antrinės izoliacijos charakteristikos	54

IVADAS

Sparčiai auganti paklausa alternatyviu kuru varomoms transporto priemonėms verčia ieškoti naujų sprendimų, pavyzdžiui automobiliuose naudoti elektros energiją, vandenilinį kurą ir kitas kuro rūšis gaunamas iš atsinaujinančių šaltinių. Šiuo metu sparčiai tobulinamos elektrinės transporto priemonės.

Pirmieji elektromobiliai buvo pradėti kurti dar XIX a. viduryje, tačiau tuo metu dar nebuvo galimybių sukaupti didelį energijos kiekį sąlyginai nedideliuose ir nesunkiuose akumulatoriuose. Dėl per didelio svorio, mažo nuvažiuojamo atstumo ir labai didelės kainos elektromobilių gamyba nepasiekė serijinės. Tik 2000-aisiais metais buvo sukurti kasdieniam naudojimui tinkami pilnai elektriniai automobiliai. Pirmasis serijiniu būdu gaminamas elektromobilis „Tesla Roadster“ vartotojams buvo pristatytas 2008 metais. Vis didėjant elektromobilių paklausai, elektra varomus automobilius pristatė ir kiti gamintojai. Per ketverius metus nuo 2010 m. iš tinklo įkraunamų elektromobilių paklausa augo labai sparčiai (per 4 metus JAV buvo parduota 250000 tokių automobilių). Augant elektromobilių paklausai, auga ir iš tinklo įkraunamų hibridinių automobilių skaičius. Taip yra todėl, kad tokie automobiliai gali nuvažiuoti didesnę atstumą be papildomo įkrovimo.

Šiuolaikinės baterijų gamybos technologijos leidžia sukaupti didesnę energijos kiekį viename akumuliatorių bloke, kurio svoris, lyginant su pirmtakais, yra nedidelis ir siekia 100 - 150 kg. Tai ypač aktualu norint hibridines sistemas panaudoti sunkiasvorėse transporto priemonėse. Hibridinio sunkvežimio su kroviniu judėjimui sunaudojama vidutiniškai 2 kartus daugiau energijos nei lengvajam automobiliui. Tai reiškia jog norint nuvažiuoti tą patį atstumą sunkvežimyje reikia turėti 2 kartus didesnę eigos akumuliatorių.

Didesnis galios poreikis reiškia, kad turi būti didinama ne tik akumulatoriaus talpa, bet ir naudojamas didesnis, galingesnis elektros variklis. Taip pat elektrinė galia priklauso nuo elektros įtampos arba srovės stiprio. Didėjant variklio gabaritams, didinant elektros srovės stiprį ir didėjant galios poreikiui dažnai sumažėja elektros variklio efektyvumas. Dėl visų šių veiksnių elektros variklyje išsiskiria didesnis šilumos kiekis. Siekiant, kad variklis dirbtų sklandžiai, be trikdžių ir gedimų ilgą laiką, būtina jį aušinti. Lengvuosiuose automobiliuose naudojamas elektros variklio aušinimas priverstiniu oro srauto aptekėjimu korpuso išore (aušinimas oru) yra netinkamas, todėl reikia ieškoti efektyvesnių alternatyvų, pavyzdžiui korpusą aušinti skysčiu.

Šiuolaikinė kompiuterinė technika leidžia ne tik sukurti kompiuterinį realaus objekto modelį, patikrinti jo technologiškumą, surasti ir ištaisyti projektavimo klaidas, bet ir atlikti realių darbo sąlygų imitavimą. Pasitelkiant kompiuterines programas galima apskaičiuoti detalių stiprumą

veikiant apkrovoms, nustatyti jų charakteristikas esant tam tikroms sąlygoms. Panaudojant kompiuterinę techniką galima atlikti skysčio tekėjimo ir šiluminę analizę.

Panaudojus kompiuterinę techniką labai sumažėja laiko sąnaudos kuriant prototipus ir atliekant realius bandymus su jais. Dar projektavimo stadijoje atlikus kompiuterinę analizę galima nustatyti objekto charakteristikas, reikalingas norimiems parametrų gauti. Pagal gautas teorines reikšmes sukurtas pirmas bandomasis modelis gali atitikti visus keliamus reikalavimus, todėl taupomas laikas laboratorinių tyrimų atlikimui ir mažinami gamybos kaštai.

Darbo tikslas: sukurti hibridinio N1 klasės sunkvežimio elektros variklio aušinimo sistemą, ir atlikti šio variklio temperatūrinių parametrų skaitinius ir eksperimentinius tyrimus esant realioms automobilio eksploatacijos sąlygoms.

Darbo uždaviniai:

1. Apžvelgti hibridiniuose automobiliuose naudojamus elektros variklius ir jų aušinimo sistemas;
2. Sukurti skysčiu aušinamą elektros variklio sistemą, sudaryti tokio variklio erdvinį modelį ir parengti originalių detalių techninę dokumentaciją gamybai;
3. Atlikti sukurtos elektros variklio aušinimo sistemos skaitinius tyrimus;
4. Atlikti sukurtos elektros variklio aušinimo sistemos eksperimentinius tyrimus.

1. ESAMŲ PRODUKTŲ IR SPRENDIMŲ APŽVALGA

Šiuo metu pasaulyje egzistuoja daugybė elektros variklių tipų. Didžiausia tipų įvairovė stebima palyginti nedidelės galios (iki 1000W) diapazone. Tai įvairiausios servo pavaros, ventiliatoriai ir kiti įvairiausias funkcijas atliekantys varikliai buitinėje ir pramoninėje technikoje. Dažniausiai naudojami varikliai:

- nuolatinės srovės (DC);
- sinchroniniai (BLDC – BrushLess DC);
- asinchroniniai (indukciniai) kintamos srovės (AC) vienfaziai ir trifaziai;
- žingsniniai (stepper);
- specializuoti;

Didesnės galios diapazone (1 - 10kW) ši įvairovė mažėja, o virš 10kW lieka vos keli elektros variklių tipai. Kadangi elektriniam transportui reikalingi 30 - 200kW galios elektros varikliai, tai analizuojami bus tik tokią galią galintys išvystyti variklių tipai. Atitinkamus galios reikalavimus turi tik 3 variklių tipai: nuolatinės srovės (DC), trifazės kintamos srovės – sinchroninių atmaina BLDC bei asinchroniniai indukciniai (AC).

Visų transporto priemonėse naudojamų elektros variklių tipų analizės rezultatai, palyginant juos tarpusavyje, pateikti lentelėje:

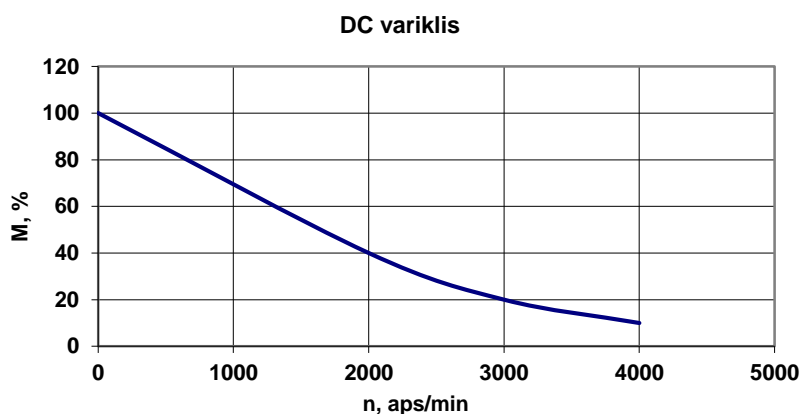
1.1 lentelė. Transporte naudojamų variklių analizė.

Variklio tipas	Naudingumo koeficientas	Patikimumas	Masė ir matmenys	Variklio sudėtingumas	Kaina	Valdiklio sudėtingumas
DC	60 - 85	Geras	Didelis	Sudėtingas	Aukšta	Paprastas
BLDC	90 - 95	L. Geras	Mažas	Nesudėtingas	L. Aukšta	L. Sudėtingas
AC	70 - 95	Puikus	Vidutinis	Nesudėtingas	Žema	L. Sudėtingas

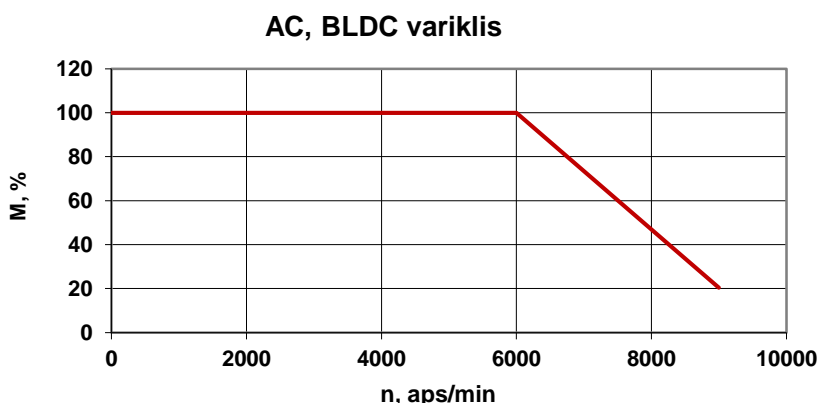
Nuolatinės srovės elektros varikliai yra patys sunkiausi, didžiausi, jų naudingumo koeficientas (60 - 85proc.) yra mažiausias. Juose naudojamas kolektorius ir šepetėliai, kurie sudyla, ir yra neatsparūs vandeniui bei dulkėms, todėl yra ir mažiausiai patikimi. Vienintelis privalumas – nesudėtinga valdymo sistema, reguliuojanti sukimosi greitį. Iširta, kad šie varikliai vis mažiau naudojami elektriniame transporte, juos pakeičia kintamos srovės varikliai. Ir nors DC variklių

gamintojai stengiasi tobulinti savo gaminius ir deklaruoja esą pasiekę 90 proc. naudingumo koeficientą, tačiau toks efektyvumas tėra tik labai siaurame sūkių diapazone. Pažangiausių elektromobilių (tokių kaip Tesla Roadster, Phoenix, Lumineo) gamintojai taip pat naudoja tik trifazius variklius. Taip pat Toyota, Honda ir kitų garsių automobilių gamintojai savo hibridiniuose modeliuose naudoja tik kintamos srovės sistemas. AC sistemos pradėtos naudoti todėl, kad sparčiai tobulėjant puslaidininkiniams elementams, atsirado galimybė realizuoti nuolatinės srovės konvertavimą į trijų fazių kintamą, su įtampos ir dažnio reguliavimu, kai reikalingi dideli galingumai 20 - 200kW.

Dar vienas DC variklių trūkumas - prastos dinaminės charakteristikos, lyginant su indukciniu AC ar BLDC. Žemiau pateiktos tipinės sukimosi momento kitimo kreivės, priklausomai nuo variklio sūkių.



1.1 pav. Nuolatinės srovės variklio sukimo momento priklausomybė nuo sūkių.



1.2 pav. Trifazio kintamos srovės variklio sukimo momento priklausomybė nuo sūkių.

Kaip, matyti iš 1.1 pav. ir 1.2 pav. DC variklio sukimo momentas didelis pradžioje sūkių diapazono, didėjant sūkiams, krenta. Todėl, su tokiu varikliu negalima pasiekti didelio automobilio

greičio arba tam reikalinga pavaru dėžė. Taip pat, tokio variklio naudingumo koeficientas žemų sūkių diapazone yra labai mažas.

AC ir BLDC variklio sukimo momentas yra pastovus plačiame sūkių diapazone. Sukimo momentą galima keisti, praplėsti, keičiant akumuliatorių baterijos įtampą ir srovės dažnį tiek, kiek yra pajėgi atlaikyti, variklio mechaninė konstrukcija. Taigi, galima išgauti didesnę galingumą iš to paties variklio, paprasčiausiai praplečiant jo pastovaus sukimo momento diapazoną aukštesnių sūkių link. Reikia pastebėti, kad srovė tokiu atveju apvijose nedidėja, variklis dėl to neperkaista. Tinkamai suderinus valdiklio su variklio sukimo momento charakteristikas užtikrinama puiki automobilio dinamika visame sūkių diapazone [1, 2].

1.1 BLDC ir indukcinio variklių analizė ir palyginimas

Tiek BLDC, tiek indukcinio AC variklių statorių konstrukcijos yra visiškai identiškos, vieninteliai skirtumai tarp variklių yra rotorų konstrukcijose. BLDC variklio rotoriuje yra du ar daugiau nuolatinių magnetų, o AC indukcinio variklio rotoriuje magnetų nėra. Rotorius sudarytas iš elektrotechninio lakštinio plieno plokštelių, kurios turi griovelius apvijoms. Dėl apvijų rotoriuje buvimo ir jose tekančių indukuotų srovių, AC variklio rotorius labiau kaista ir jį reikia daugiau aušinti nei BLDC variklio rotorių, kuriame srovės neteka. Dėl šios priežasties BLDC variklio naudingumo koeficientas yra aukštesnis ir tai nėra vienintelė priežastis, dėl ko BLDC variklių efektyvumas yra aukštesnis. BLDC variklio $\cos \varphi$ (galios) faktorius yra lygus vienetui, o geriausių AC variklių $\cos \varphi$ faktorius yra apie 0,85. Tas taip pat prideda kelis procentus efektyvumo BLDC variklio naudai [2].

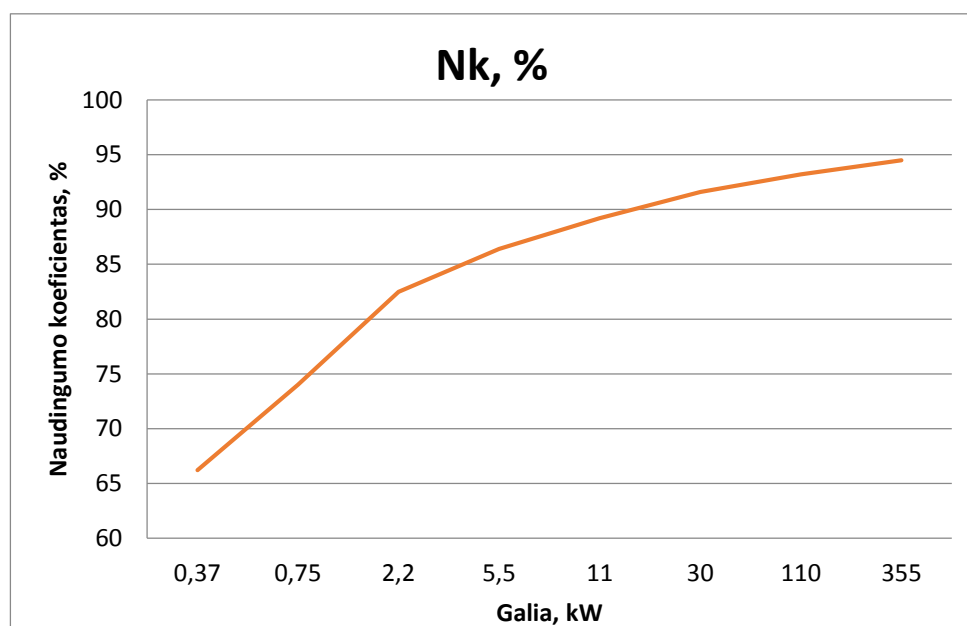
Indukciniai AC varikliai turi savybę generuoti reaktyvinę galią, kuri jokio darbo neatlieka, o tik sukelia nuostolius. Todėl ant visų indukcinio AC variklių esančiose duomenų lentelėse nurodomas faktorius $\cos \varphi$ – kampo tarp srovės ir įtampos variklio apvijose kosinusas. Kuo variklio $\cos \varphi$ yra aukštesnis, tuo variklis dirbs efektyviau ir generuos mažesnę reaktyvinę galią.

BLDC variklis turi ir trūkumų lyginant su indukcinio AC. Idealaus BLDC variklio magnetinis laukas, kurį skleidžia nuolatiniai magnetai turėtų būti reguliuojamas. Kada variklio sukimo momentas yra maksimalus, magnetinio lauko stiprumas (B) turi būti maksimalus. Tuomet keitiklio ir variklio srovės yra mažesnės ir sumažėja nuostoliai aktyvinėje laidininkų varžoje. Kai sukimo momentas sumažėja ir yra nedidelis, magnetinis laukas turi taip pat sumažėti, kitaip nuostoliai dėl sukurinių srovių ir histerezės išliks aukšti. Idealiu atveju, magnetinis laukas visada turi būti toks, kad nuostolių dėl aktyvinės apvijų varžos sukurinių srovių ir histerezės magnetolaidyje suma visada būtų minimali. Tačiau praktiškai negalima keisti nuolatinių magnetų lauko stiprumo B.[1].

AC indukciniai varikliai neturi nuolatinių magnetų ir juose magnetinio lauko stiprumas nesunkiai reguliuojamas sumažinant įtampą, kada mechaninė apkrova nedidelė. Tokiu būdu yra nesudėtinga optimizuoti indukcinio variklio darbą taip, kad jo naudingumo koeficientas visada būtų maksimalus. Kuo variklis galingesnis, tuo šis AC variklio privalumas prieš BLDC ryškėja. Kuo galingesnis BLDC variklis, tuo jame bus didesni magnetinės kilmės nuostoliai, kada variklis yra nepilnai apkrautas. AC varikliui magnetinės kilmės nuostoliai nepasireiškia (dirbant su keitikliu pagal teisingą algoritmą). Todėl tam tikrais režimais, iš AC variklio galima išgauti didesnę efektyvumą negu iš BLDC. Jeigu pažiūrėti į variklio apkrovos kitimą automobilyje, tai nesunku pastebėti, kad variklis būna pilnai apkrautas tikrai nedidelį laiko tarpą – automobiliui įsibėgėjant, arba važiuojant maksimaliu greičiu. Važiuojant pastoviu mieste leidžiamu greičiu, variklio apkrova būna apie 10 - 30 proc.[2].

Nuolatiniai magnetai yra brangūs. Siekiant sustiprinti jų generuojamą magnetinį lauką išgaunant didesnę galingumą iš variklio, naudojamas retasis žemės elementas neodimis, kuris padidina magnetų kainą. Dėl šių magnetų BLDC varikliai nėra labai patikimi nes jie turi savybę išsimagnetinti prie aukštų temperatūrų. BLDC variklius reikia aušinti, kad neviršytų 80°C temperatūros.

AC varikliuose nėra nuolatinių magnetų, todėl jie yra gerokai pigesni. Jų trūkumas yra tas, kad mažos galios variklių (1 – 7 kW) yra žemas naudingumo koeficientas (apie 65 – 80 proc.), tačiau didelės galios variklių (> 30 kW) naudingumo koeficientas siekia 90 – 94 proc. Žemiau pateiktas paveikslas, kuris atsispindi kaip keičiasi AC variklių naudingumo koeficientas priklausomai nuo galingumo:



1.3 pav. AC variklio naudingumo koeficiento kitimas

1.2 BLDC ir indukcinų AC variklių valdymas

Jeigu abu variklių tipus maitinsime iš nuolatinės srovės šaltinio - akumuliatorių baterijos, abiem reikės trifazių keitiklių, kurie yra labai panašūs. Skiriasi tik valdymo algoritmas ir rotoriaus padėties - apsisukimų jutiklis. BLDC varikliui reikia tiksliai sekti rotoriaus padėtį, o indukciniam AC varikliui užtenka sekti tik apsisukimus. Tačiau, specialistai, dirbantys su indukciniais AC varikliais pripažįsta, kad šių variklių valdymas yra gerokai sudėtingesnis nei BLDC. Šių variklių pritaikymo sėkmė nemažai priklauso ir nuo jų valdančios programos kodo. Indukcinis AC variklis gali dirbti ir be grįžtamojo ryšio kilpos. Gerai žinome plačiai pramonėje naudojamus šio tipo variklius, kurie įsisuka su apkrova prijungus juos tiesiog prie trifazio 50 Hz tinklo. BLDC variklis niekaip to padaryti negali, jam būtinas stiprus grįžtamasis ryšys [1, 2].

Prieš, kuriant naują produktą pravartu atlikti rinkos analizę, apžvelgti naudojamus sprendimus aušinant elektros variklius ir nustatyti projektuojamo elektros variklio panaudojimo galimybes. Gauti rezultatai padės nustatyti naujo gaminio poreikį ir pasirinkti tinkamiausius sprendimus projektavimo etapui.

1.3 Asinchroninių elektros variklių istorija

Pirmuoju elektros varikliu galima laikyti nesudėtingą elektrostatinį įrenginį, kurį dar 1740 m. pagamino škotų vienuolis Endrius Gordonas (Andrew Gordon) [3]. Pirmojo indukcinio elektros variklio modelis buvo sukurtas 1879 m. [2]. Galileo Ferraris ir Nikola Tesla pirmuosius praktiškai panaudojamus kintamos įtampos asinchroninius variklius pristatė atitinkamai 1885 m. ir 1887 m. [3].



1.4 pav. Pirmojo Nikola Tesla sukurto asinchroninio elektros variklio modelis [4]

Nuo pirmųjų modelių asinchroniniai varikliai stipriai patobulėjo. Dėl paprastos konstrukcijos jie plačiai taikomi pramonės, transporto srityse. Nedidelis sudedamųjų dalių skaičius (viena besisukanti dalis – rotorius, nereikalauja kontakto su korpusu) lemia labai didelį tokio tipo

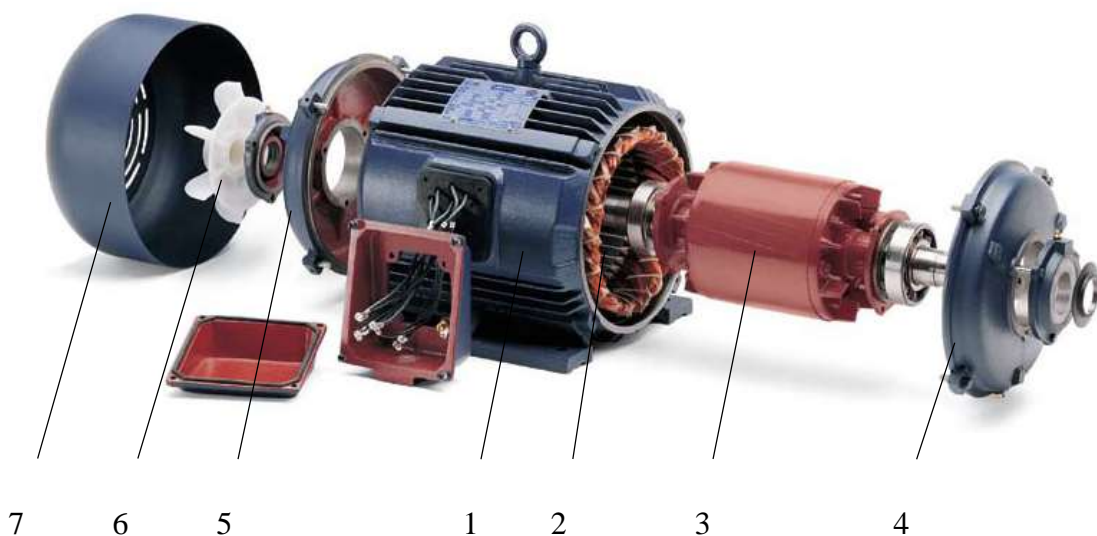
elektros variklių patikimumą. Tinkamai eksploatuojamam varikliui dažniausiai reikia keisti tik rotoriaus guolius. Taip pat, dėl didelio naudingumo koeficiento, kuris yra apie 80 – 90 %, šie varikliai naudojami labai didelio galios diapazono įrenginiuose, nuo smulkios buitinės technikos iki didelio galingumo pramoninių staklių ir kitų įrenginių.



1.5 pav. Šiuolaikinio asinchroninio elektros variklio modelis [5]

1.4 Asinchroninių elektros variklių aušinimo būdai

Šiuo metu patys populiariausi ir plačiausiai naudojami asinchroniniai varikliai yra uždaro tipo oru aušinami varikliai, kurių korpusas priverstinai apipučiamas oru (1.6 pav.). Toks variklis susideda iš korpuso – 1, statoriaus – 2, rotoriaus – 3, galinių dangtelių – 4 ir 5, ventiliatoriaus – 6 ir apsauginio gaubto – 7.



1.6 pav. Asinchroninio elektros variklio sandara [4]

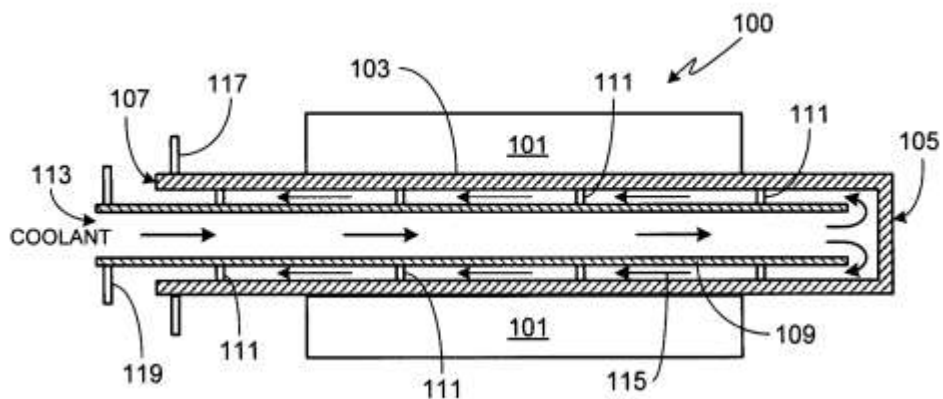
Dažniausiai sutinkamas tokio tipo elektros variklių aušinimo būdas yra jo korpuso priverstinis apipūtimas oro srautu. Toks aušinimo būdas tinkamas jeigu variklio darbo sąlygos yra pastovios, variklis nebūna dažnai stabdomas ir paleidžiamas, dirba be perkrovų.

Esant sudėtingesnėms eksploatacijos sąlygoms naudojamas elektros variklio aušinimas aušinimo skysčiu. Yra keli aušinimo skysčiu variantai. Pats paprasčiausias yra elektros variklio korpuso aušinimas skysčio srautu (1.7 pav.). Tokio variklio korpuse yra aušinimo kanalai, kuriais tekėdamas aušinimo skystis paima šilumą iš korpuso ir aušinimo radiatoriuje atiduoda ją aplinkai. Toks aušinimo būdas yra efektyvesnis nei aušinimas oro srautu.



1.7 pav. Skysčiu aušinamas elektros variklis [5]

Skysčiu aušinant elektros variklio korpusą aušinama tik dalis elektros variklių sudarančių detalių. Norint dar labiau sumažinti elektros variklio temperatūrą galima naudoti kombinuotą aušinimo būdą, kuomet skystis aušina ne tik variklio korpusą ir statorių bet ir teka per variklio rotorių, taip nunešdamas šilumą iš visų šylančių komponentų. Toks aušinimo būdas taikomas labai retai, nes jo įgyvendinimas yra labai sudėtingas. Norint, kad būtų aušinamas elektros variklio rotorius reikia jo ašyje įrengti aušinimo kanalą ir į besisukantį rotorių tiekti aušinimo skystį (1.8 pav.).



1.8 pav. Skysčiu aušinamo elektros variklio rotoriaus ašis [6]

Projektuojamame variklyje parinktas statoriaus ir korpuso aušinimo skysčiu būdas. Toks šilumos nunešimas yra efektyvesnis nei korpuso aušinimas oro srautu ir gerokai pigesnis aušinimo sistemos įrengimas, lyginant su sistema, kur aušinamas ir variklio rotoriaus velenas.

1.5 Analogiškų sistemų apžvalga

Didžioji dalis kuriamų hibridinių sistemų yra skirtos lengviesiems automobiliams. Šias sistemas vysto didieji transporto priemonių gamintojai tokie kaip Audi, General Motors, Mitsubishi, Honda ir kt. Norint įsigyti hibridinę transporto priemonę, reikia senąjį automobilį pakeisti nauju. Individualių vartotojų atveju tai nėra didelė problema, tačiau jeigu transporto priemonių parką reikėtų pakeisti kompanijai, vykdančiai siuntų ar krovinių pervežimą, ir turinčiai nuo 100 sunkvežimių, kurie yra neseniai nupirkti t.y. 1-2 metų senumo.

Sprendimas, leidžiantis toliau naudoti esamą transporto priemonę, nesvarbu ar ji būtų lengvoji ar krovininė, yra perdarymo rinkinys. Tokio rinkinio esmė ta, kad jau turimoje transporto priemonėje tereikia įmontuoti elektros variklį, baterijų sistemą ir visos sistemos valdiklį.

Tokių sistemų (rinkinių) gamyba ir pardavimais užsiimančių įmonių pasaulyje yra vienetai, neskaičiuojant mėgėjų sukurtų vienetinių projektų. Daugelis hibridinių sistemų perdarymo rinkinių yra jau esamos sistemos atnaujinimas skirtas, baterijų talpos padidinimui ir/ar pakrovimo galimybės įdiegimui, jau pagamintiems hibridiniams automobiliams, tokiems kaip Honda Insight ar Toyota Prius.

1.5.1 Brusa sistema

Vokiečių įmonė gaminanti 400 V ir 750 V variklio bei jo valdiklio sistemą, kurios galia gali būti nuo 50 iki 200kW. Žemiau esančioje lentelėje, yra pateikta 150 kW sistemos variklių, su atitinkamos įtampos valdikliais, parametrai.

1.2 lentelė. Brusa variklių parametrai

Nominalus greitis	6000 aps.	4900 aps.
Maks. greitis	12000 aps.	13000 aps.
Sukimo momentas	100 Nm	165 Nm
Maks. sukimo momentas	290 Nm	305 Nm
Nuolatinė galia	60 kW	86 kW
Maks. galia	160 kW	146 kW
Efektyvumas	95%	95%
Svoris	49 kg	51 kg

Su šiomis sistemomis galima pasirinkti 14-16 kWh talpos ličio jonų tipo baterijas, sveriančias apie 130-140 kg, 400 V sistemai bei 26,6 kWh, sveriančias apie 260 kg – 750 V sistemai. Automobilio elektrinės sistemos darbą per CAN [7] sąsają valdo jų gaminamas valdiklis VCU60.

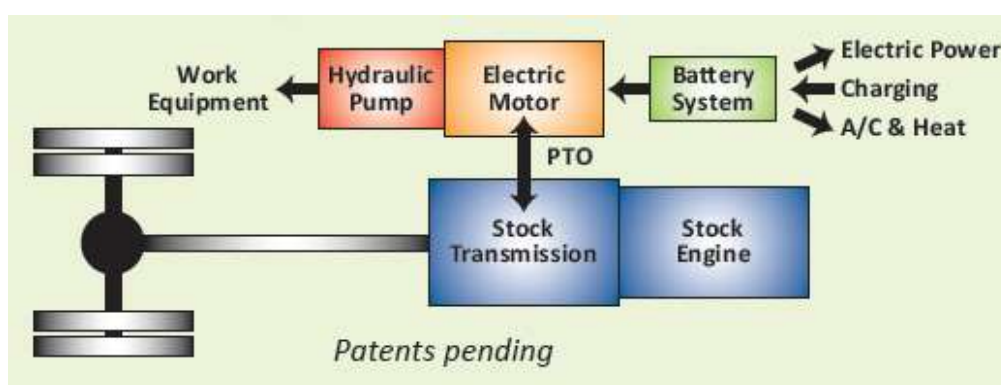
1.5.2 Odyne sistema

Šio gamintojo parduodama produkcija yra skirta kroviniinio transporto degalų suvartojimo mažinimui ir bendro efektyvumo padidinimui. Ši sistema nepasižymi aukštais parametrais, kurie yra pateikti 1.2 lentelėje.

1.3 lentelė. Odyne hibridinės sistemos parametrai

Maks. galia	80 kW
Nuolatinė galia	51 kW
Nominalus greitis	1600 aps.
Maks. greitis	2250 aps.
Baterijų įtampa	320 V
Baterijų talpa	14 / 28,4 kWh
Baterijų svoris	158 / 316 kg

Panaudojus šią sistemą galima papildomai maitinti oro kondicionieriaus ar šildytuvo sistemas, bei tiekti papildomą galią kitiems įrenginiams. Šios sistemos privalumas yra tas, kad nereikia modifikuoti gamyklinės transporto priemonės transmisijos ar vidaus degimo variklio. Sistemos schema pateikta žemiau esančiame 1.6 paveiksle.

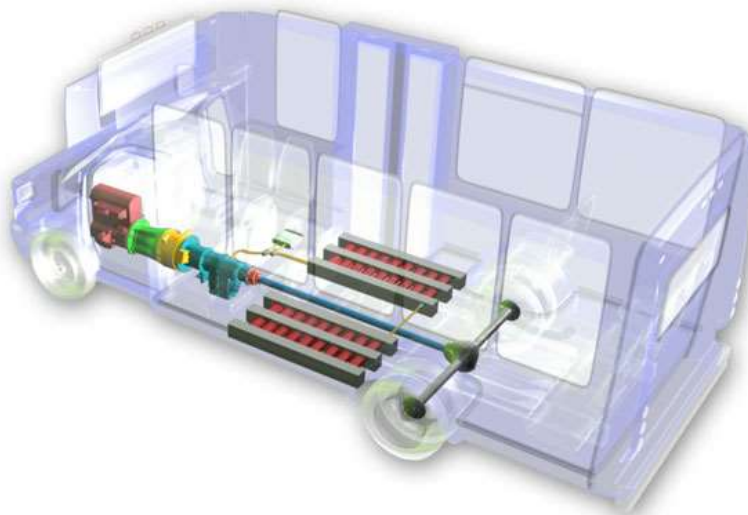


1.6 pav. Odyne sistemos schema [8]

Reikia paminėt tai, kad ši sistema yra pritaikyta amerikietiškiems sunkvežimiams ir negali būti panaudota europos standartus atitinkančiame transporte.

1.5.3 EDI-Drive sistema

EDI-Drive hibridinė sistema yra skirta tiek lengvosioms, tiek sunkesnėms transporto priemonėms. Transporto priemonė su šia sistema gali važiuoti 4 pasirinktiniais režimais: 2 elektriniais ir 2 hibridiniais, kurių pagalba energija išnaudojama gan efektyviai.



1.7 pav. EDI-Drive sistemos pavyzdys [9]

Ši sistema ir yra žymiai efektyvesnė už prieš tai aptartas, tačiau norint ją įdiegti į transporto priemonę, reikia keisti originalią transmisiją bei pavarų sistemą. Taip pat, šios sistemos gamintojai nepateikia konkrečių sistemos parametrų ar ne vienetinių pritaikymo pavyzdžių.

1.6 Projektuojamo variklio panaudojimo galimybių analizė

Projektuojamas variklis turėtų būti kiek galima universalesnis. Tokiu būdu būtų užtikrinamas variklio daugiavfunkciškumas, ir padidėtų jo panaudojimo galimybės.

Dėl savo veikimo principo asinchroniniai varikliai naudojami labai plačiai. Tokio tipo variklis gali būti panaudotas kaip galios šaltinis hidrauliniuose įrenginiuose, pramonės mašinose taip pat elektrinėse transporto priemonėse ir t.t. Pagrindinė sritis į kurią orientuojamasi kuriant šį variklį yra elektrinis ir hibridinis transportas. Tokio tipo variklis čia tinkamiausias, dėl paprastos konstrukcijos, mažų eksploatacijos sąnaudų. Pagrindinis reikalavimas elektros varikliui naudojamam transporto priemonėje yra geras aušinimas. Automobiliui važiuojant variklis patiria perkrovą, jo darbo režimas yra nepastovus todėl jame išsiskiria didelis šilumos kiekis. Įprastų, oru aušinamų variklių šilumos nunešimo savybės yra nepakankamos, ir jie tokiomis sąlygomis veikti negali arba veikia tik trumpą laiko tarpą iki perkaitimo.

Laikoma, kad projektuojamas skysčiu aušinamas asinchroninis elektros variklis bus patikimas jeigu jo veikimo metu, esant trumpalaikėms perkrovoms, jo korpuso maksimali temperatūra neviršys 90 °C. Maksimali projektuojamo elektros variklio galia – 63 kW, mažiausias naudingumo koeficientas – 85 %.

2. PROJEKTAVIMUI IR TYRIMUI NAUDOJAMŲ PRIEMONIŲ PARINKIMAS

Naudojantis šiuolaikinėmis kompiuterinėmis programomis galima kurti įvairių konfigūracijų ir skirtingo sudėtingumo lygio objektus. Prieš imantis kūrimo darbų būtina atlikti įrangos apžvalgą ir iš visų siūlomų produktų išsirinkti priimtinausią ir tinkamiausią konkretaus objekto kūrimui. Tokia apžvalga užtikrins, kad kuriant objektą bus naudojamos efektyviausios priemonės, bus išvengta migravimo tarp programinės įrangos naudojamos modelio kūrimui ir analizei.

2.1. Kompiuterinis variklio modelio kūrimas CAD sistemomis

Geometrinio elektros variklio modelio kūrimui naudojama kompiuterinio projektavimo (CAD) sistema. Šiam darbui atlikti tinka bet kuri vidutinio lygio CAD sistema. Populiariausios ir plačiausiai naudojamos vidutinio lygio kompiuterinio projektavimo sistemos yra SOLIDWorks ir Inventor.

AUTODESK Inventor – 3D kompiuterinio projektavimo sistema turinti visus įrankius kietų kūnų, lakštinių, vamzdinių modelių kūrimui, dokumentacijos kūrimui ir analizei atlikti. Su šia sistema galima kurti atskiras detales, jų junginius bei sudarinėti brėžinius. Šioje sistemoje integruoti įrankiai judesių modeliavimui, optimizavimui, baigtinių elementų analizei atlikti.

SOLIDWorks – 3D kompiuterinio projektavimo sistema apimanti kietų kūnų, paviršinių, lakštinių modelių, vamzdinių elementų kompiuterinį modeliavimą, judesių analizę, geometrijos optimizavimą, detalių ir junginių analizę baigtinių elementų metodu, dokumentacijos ir brėžinių kūrimą. Taip pat šioje sistemoje gali būti integruota skysčių ir dujų tekėjimo analizei skirta įranga, su kuria atliekami skysčio tekėjimo, šilumos perdavimo tyrimai.

2.2. Skaičiuojamajai skysčių dinamikos (CFD) analizei naudojamos kompiuterinės sistemos

Skaičiuojamoji skysčių dinamikos analizė yra skysčių mechanikos sritis, kurioje naudojami skaitiniai metodai ir algoritmai, siekiant spręsti ir analizuoti problemas apimančias srauto tekėjimą. Sąveikos tarp paviršių (kraštinių sąlygų) ir skysčių arba dujų skaičiavimams atlikti naudojama kompiuterinė įranga. Naudojant šiuolaikinius superkompiuterius galima gauti labai tikslius rezultatus ir atlikti didelio sudėtingumo skaičiavimus. Po kompiuterinės analizės seka eksperimentiniai bandymai patvirtinantys skaičiavimų rezultatus.

Esminis skaičiuojamosios srautų dinamikos analizės pagrindas yra Navje-Stoukso lygčių sprendimas. Šios lygtys apibūdina klampių skystų medžiagų judėjimą. Tai yra pusiausvyros lygtys

išvedamos iš antrojo Niutono dėsnio pritaikyto skysčių judėjimui, su prielaida, kad skystyje susidarantys įtempiai yra klampos ir slėgio narių suma [10].

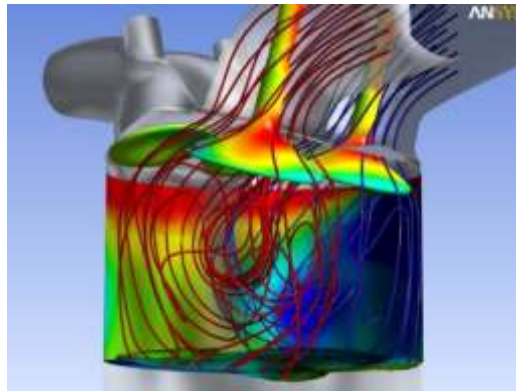
$$\frac{\delta\rho}{\delta t} + \frac{\delta(\rho u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho w)}{\delta z} = 0 \quad (1)$$

čia x, y, z – koordinatės; u, v, w – greičio dedamosios; t – laikas, s ; ρ – tankis, kg/m^3 ;

Srautų tekėjimo ir šilumos mainų analizė gali būti atliekama su specializuotomis programomis, tokiomis kaip Fluent, ICEM CFD ir kt. Šiose programose geometrinio modelio kūrimas yra komplikotas, todėl dažniausiai jis kuriamas CAD sistemoje ir naudojant neutralius geometrinių modelių formatus importuojamas į analizei skirtas sistemas. Dėl formato keitimo, migracijos tarp sistemų gali būti prarandama arba iškraipoma dalis informacijos, gaištamas laikas.

Jeigu analizei nereikalingas specifinis sprendimo būdas galima naudoti CAD sistemose integruotus kompiuterinės srautų analizės papildinius. Tuomet geometrinis modelis kuriamas ir tiriamas toje pačioje CAD sistemoje, taip eliminuojant konvertavimo ir migracijos į kitą sistemą etapus.

ANSYS Fluent programinė įranga turi plačias fizikines modeliavimo galimybes modeliuojant srauto tekėjimą, turbulenciją, šilumos perdavimą ir reakcijas pramoniniuose objektuose apimančiuose oro aptekėjimo aplink lėktuvo sparną, degimo proceso krosnyje modeliavimą ir kita.



2.1 pav. Vidaus degimo variklio modelis sukurtas ANSYS Fluent programa [11]

SOLIDWORKS Flow Simulation – integruota programinė įranga, susieta su SOLIDWORKS 3D CAD projektavimo programa. Toks susiejimas leidžia atlikti suprojektuoto gaminio analizę nepervedinėjant jo į kitą programą. Taip sutaupomas laikas, neprarandama svarbi modelio informacija. Dažniausiai integruotosios programos turi mažesnes analizės galimybes, tačiau naudojant Flow Simulation galima atlikti skysčio ir dujų srauto tekėjimo analizę realiomis sąlygomis, vykdyti „kas jeigu“ scenarijus, ir efektyviai analizuoti skysčio tekėjimo poveikį, šilumos perdavimą, ir su tuo susijusias apkrovas atsirandančias tiriamuose arba aplinkiniuose objektuose.

Kuriant skysčiu aušinamą asinchroninį elektros variklį bus atliekama aušinimo skysčio tekėjimo ir šilumos nunešimo analizė. Tokiam tyrimui atlikti pakanka integruotos programinės įrangos, todėl geometrinis modelis bus kuriamas SOLIDWORKS sistema, o analizė atliekama SOLIDWORKS Flow Simulation papildiniu.



2.2 pav. SOLIDWORKS Flow Simulation programos darbo langas [12]

3. ASINCHRONINIO ELEKTROS VARIKLIO AUŠINAMO SKYSČIU KONSTRUKCIJOS APRAŠYMAS

Šioje darbo dalyje pateikta asinchroninio elektros variklio skysčiu aušinamos sistemos projektavimo eiga: elektros variklio parametrų nustatymas, rotoriaus ašies stiprumo skaičiavimai, korpusinių detalių konstrukcijos aprašymas.

3.1. Projektuojamo elektros variklio geometrija ir darbo parametrai

Projektuojamas asinchroninis trifazis elektros variklis turi atitikti tokius parametrus:

- **Geometriniai korpuso parametrai**
 - Elektros variklio gabaritai turi būti ne didesni nei: 400 x 400 x 500 mm;
 - Naudojamas 160L tipo elektros variklio statorius, kurio matmenys: $\varnothing 270 \times 160$ mm;
 - Naudojamas 160L tipo elektros variklio rotorius, kurio matmenys $\varnothing 179 \times 246$ mm;
 - Variklis tvirtinamas korpuso galuose su galimybe variklį pasukti 45° kampu.
- **Elektriniai variklio parametrai**
 - Maksimalus pasiekiamas sukimo momentas $T = 900$ Nm;
 - Maksimali elektrinė galia $P = 63$ kW;
 - Naudingumo koeficientas $\eta = 85$ %.

3.2. Elektros variklio rotoriaus ašies ir korpuso projektiniai skaičiavimai

Apskaičiuojamas minimalus rotoriaus ašies skersmuo.

Pradiniai duomenys:

Maksimalus sukimo momentas - $T = 900$ Nm;

Ašies medžiaga – plienas S275, $\tau_{all} = 105 \cdot 10^6$ N/m²;

Atsargos koeficientas – $n = 2,5$.

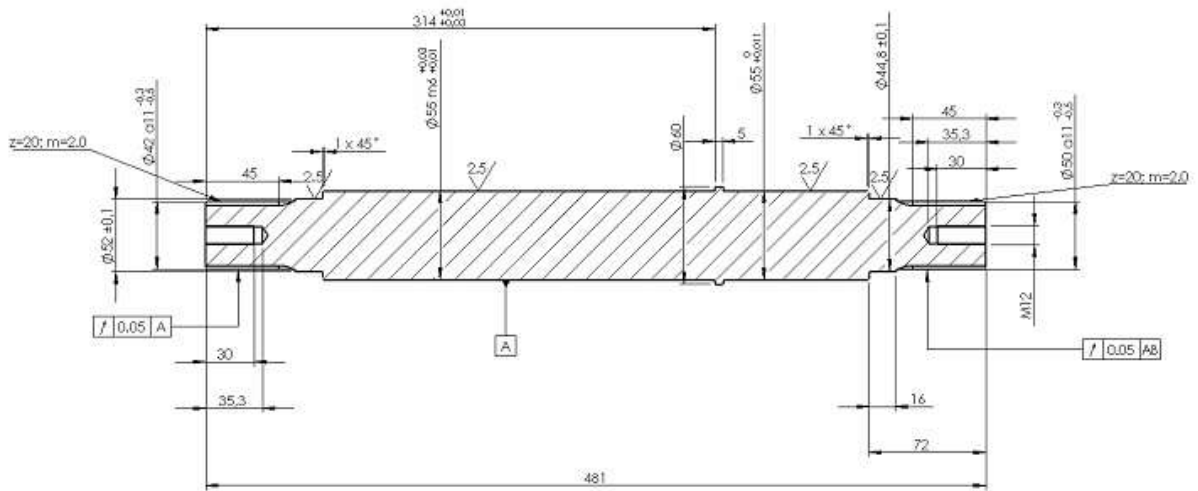
$$d_{min} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T \cdot n}{\pi \cdot \tau_{all}}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 900 \cdot 2,5}{\pi \cdot 105 \cdot 10^6}} = 0,0478 \text{ m} \quad (1)$$

čia T – sukimo momentas, Nm; n – atsargos koeficientas; τ_{all} – leistinieji medžiagos įtempiai, N/m².

Apskaičiuotas minimalus ašies skersmuo lygus 47,8 mm, priimama, kad mažiausias ašies skersmuo bus lygus 50 mm. Kitų ašies kakliukų skersmenys didinami 5 mm.

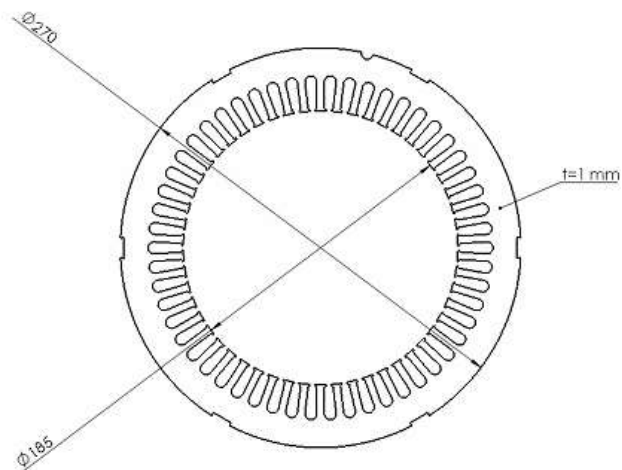
Patikrinama ar parinktas ašies skersmuo tenkina stiprumo sąlygas:

$$\tau_{maks} = \frac{16 \cdot T \cdot n}{\pi \cdot d^3} = \frac{16 \cdot 900 \cdot 2,5}{\pi \cdot 0,050^3} = 91,673 \cdot 10^6 \frac{N}{m^2} < \tau_{all} = 105 \cdot 10^6 N/m^2 \quad (2)$$



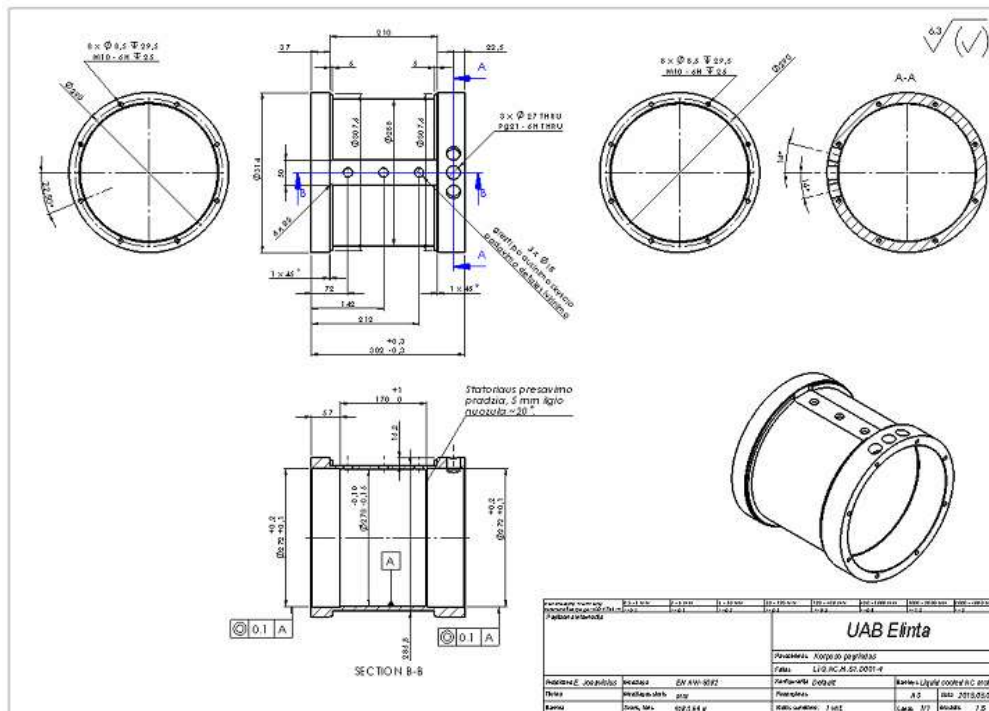
3.1 pav. Rotoriaus ašies brėžinys

Elektros variklio statorius gaminamas iš specialaus elektrotechninio plieno. Statorius sudarytas iš specialios formos šampuotų plokštelių, kurios sudedamos taip kad sudarytų cilindrą, kurio ilgis 160 mm. Visos plokštelės tarpusavyje dielektriškai izoliuojamos.



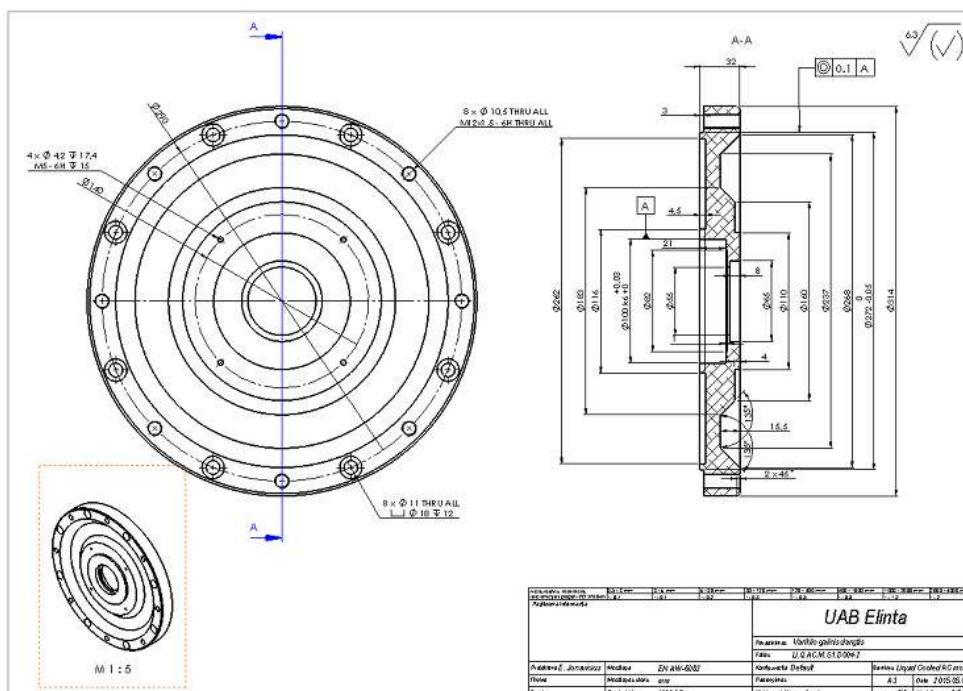
3.2 pav. Statoriaus plokštelės eskizas

Skysčiu aušinamam korpusui gaminti naudojamas aliuminij, dėl jo gerų šilumos laidumo savybių ir lengvo apdirbamumo. Projektuojamas vamzdžio tipo elektros variklio korpusas, kurio viduje sudaromas tikslus paviršius statoriaus įpresavimui, o išorėje suformuojamas aušinimo skysčio tekėjimui skirtas kanalas.



3.3 pav. Skysčių aušinamo variklio korpuso brėžinys

Suprojektuojami korpuso galiniai dangčiai, kuriose sudaromos išėmos rutuliniams radialiniams guoliams ir sandarinimo riebokšliams. Ašiškumui užtikrinti numatomi centravimo laipteliai.



3.4 pav. Variklio korpuso dangtis

4. SKYSČIU AUŠINAMO ELEKTROS VARIKLIO TEMPERATŪRINIŲ REŽIMŲ SKAITINIS TYRIMAS

Suprojektuoto asinchroninio elektros variklio aušinimo savybių ir aušinimo skysčio tekėjimo tyrimui naudojamas kompiuterinės įrangos paketas SolidWorks FlowSimulation.

Pradiniai analizės duomenys:

Aušinimo skysčio debitas $V - 250 \text{ l/val.}$;

Maksimalus atitekančio skysčio slėgis $p_{\text{maks.}} - 0,22 \text{ bar} = 0,022 \text{ MPa}$

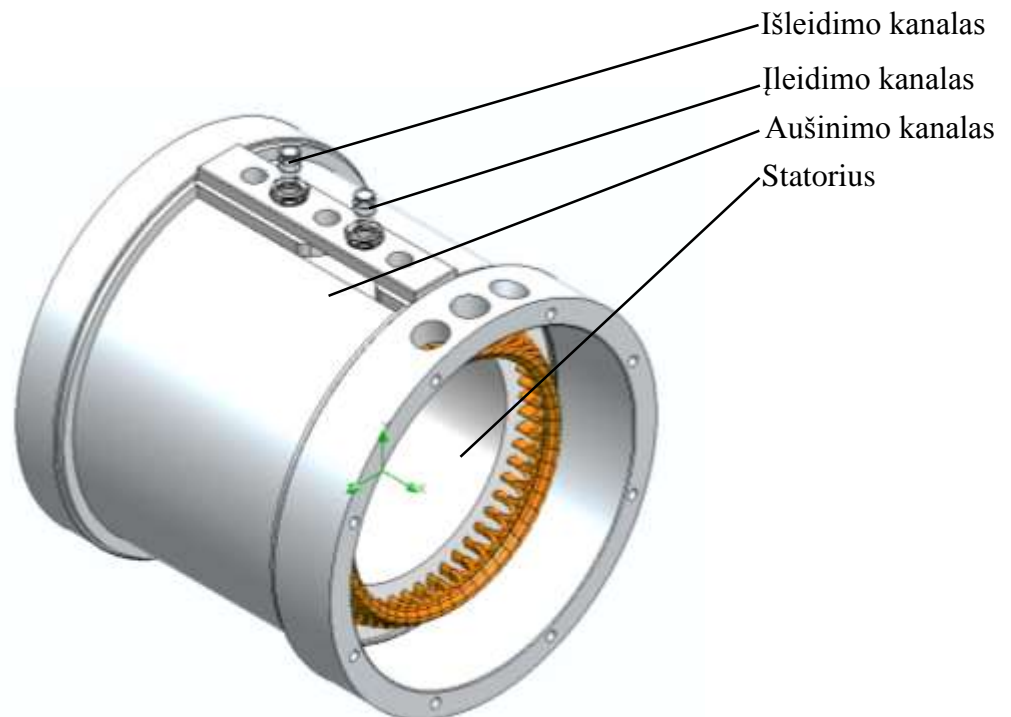
Pradinė aušinimo skysčio temperatūra $T_{\text{sk.}} - 22 \text{ }^\circ\text{C}$;

Aplinkos temperatūra $T_{\text{apl.}} - 22 \text{ }^\circ\text{C}$;

Maksimali elektros variklio galia $P_{\text{maks.}} - 63 \text{ kW}$;

Mažiausias elektros variklio naudingumo koeficientas $\eta - 85\%$.

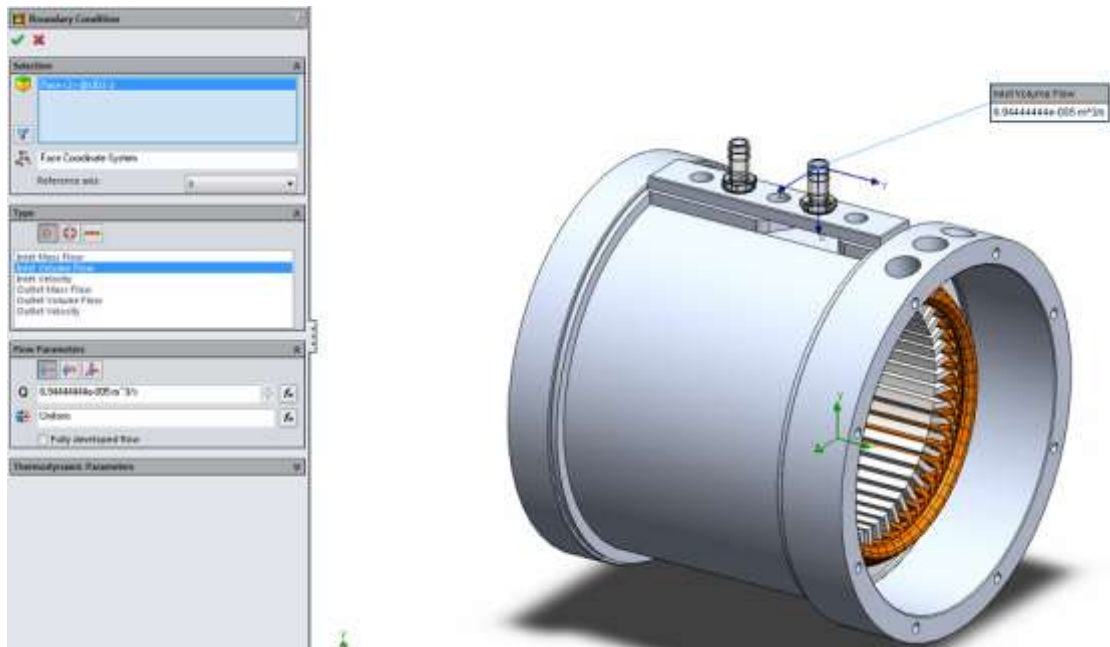
Modeliavimas atliekamas SolidWorks programos papildiniu Flow Simulation. Prieš atliekant analizę supaprastinamas elektros variklio modelis. Srauto modeliavimui reikalingas tik variklio korpusas ir statorius.



4.1 pav. Supaprastintas ir analizei paruoštas modelis

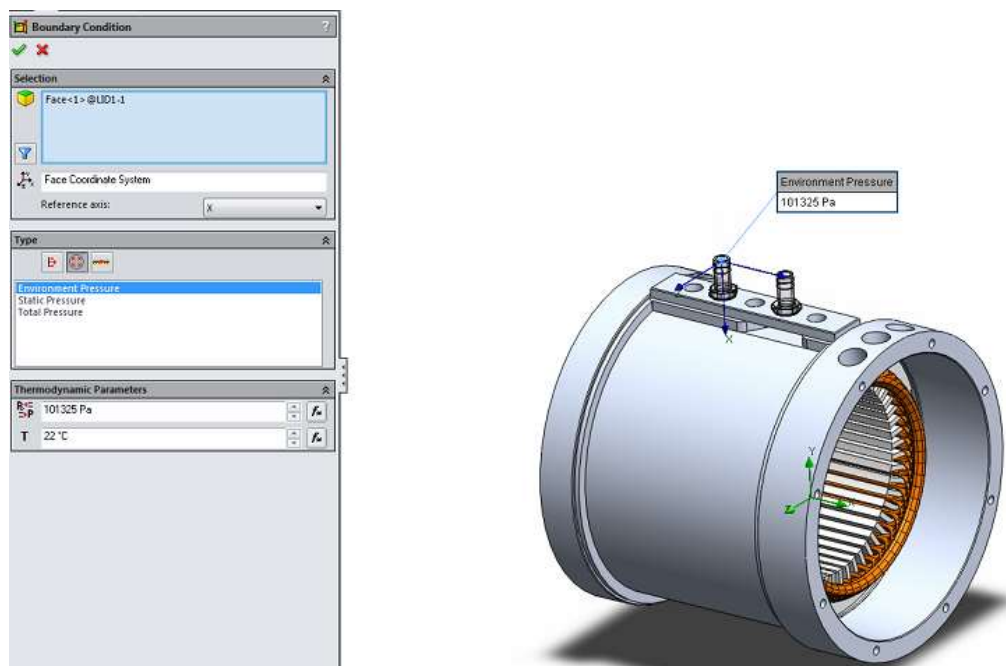
4.1. Elektros variklio korpuso aušinimo parametrų analizė

Nurodomas aušinimo skysčio debitas ($V = 250 \text{ l/val.}$) ir temperatūra ($T_{sk} = 22 \text{ }^\circ\text{C} = 295,2 \text{ K}$) išleidimo kanale (4.2 pav.)



4.2 pav. Pradinių duomenų įvedimas

Išleidimo kanale nurodoma, kad ten yra atmosferinis slėgis (4.3 pav.).



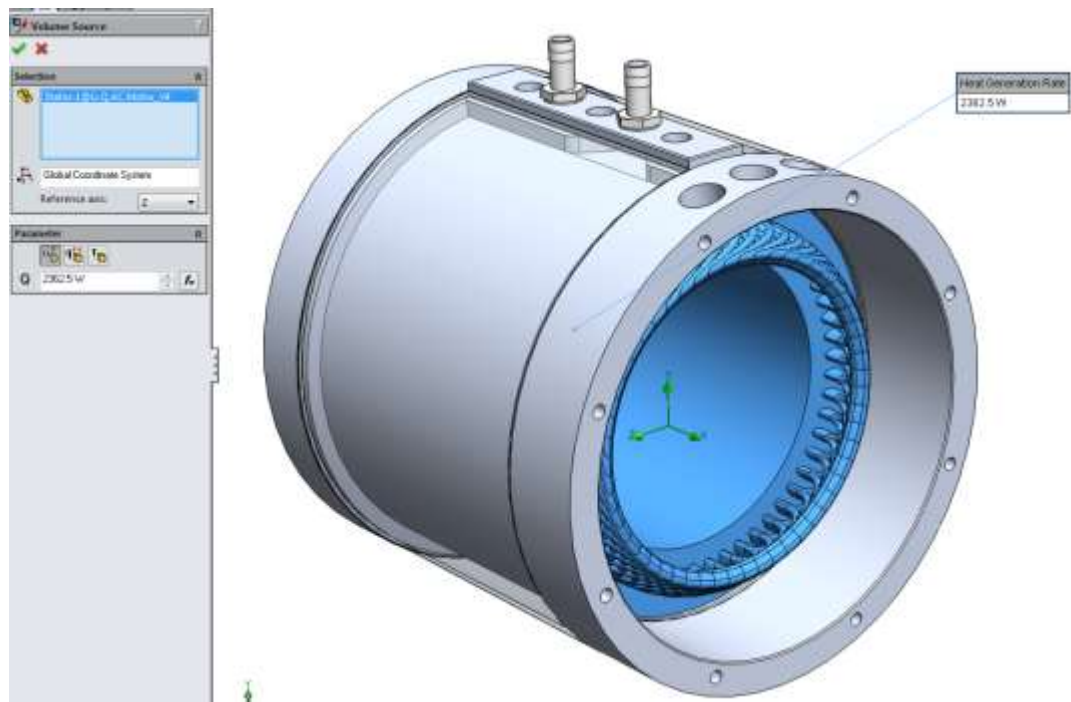
4.3 pav. Pradinės sąlygos išleidimo kanale

Eksplloatuojant variklį normaliomis sąlygomis didžiausias išsiskiriančios šilumos kiekis bus lygus:

$$Q_{maks} = P_{maks} \cdot (1 - \eta) = 63 \cdot (1 - 0,85) = 9,45 \text{ kW} \quad (3)$$

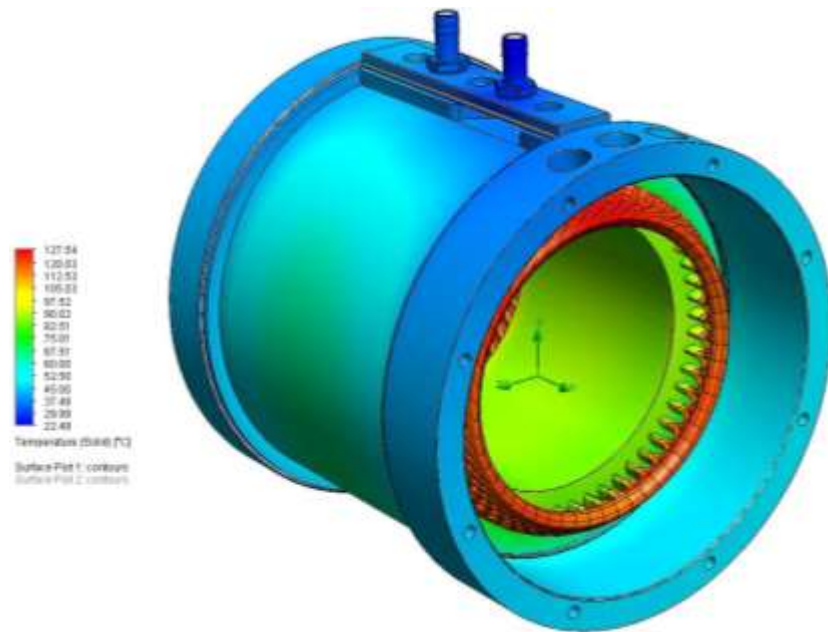
Iš bendrų elektros energijos nuostolių virstančių šiluma, statoriui tenka apie 15 – 25 %. Likusi dalis išsiskiria rotorijoje ir guoliuose. Taigi elektros variklio statoriuje nurodomas šilumos kiekis, kuris lygus apskaičiuotam 4 formulėje t.y. 2,3625 kW.

$$Q_{stat} = P_{maks} \cdot 0,15 = 63 \cdot 0,25 = 2,3625 \text{ kW} \quad (4)$$

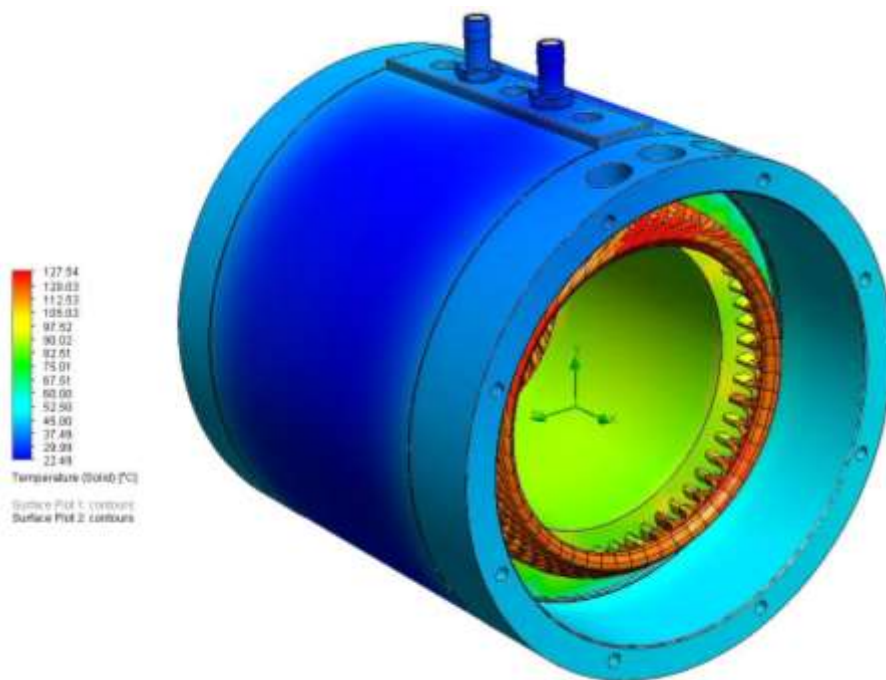


4.5 pav. Statoriuje susidarančio šilumos kiekio nurodymas

Kaip tikslo funkcija nurodoma kieto kūno ir skysčio temperatūra, taip pat įėjimo kanalo maksimalus slėgis. Nurodžius visas kraštines sąlygas išsprendžiamas uždavinys.

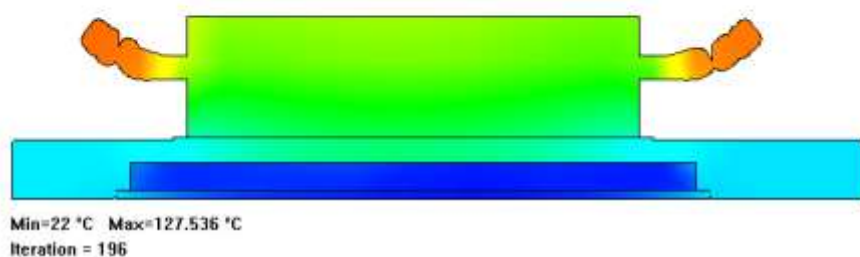
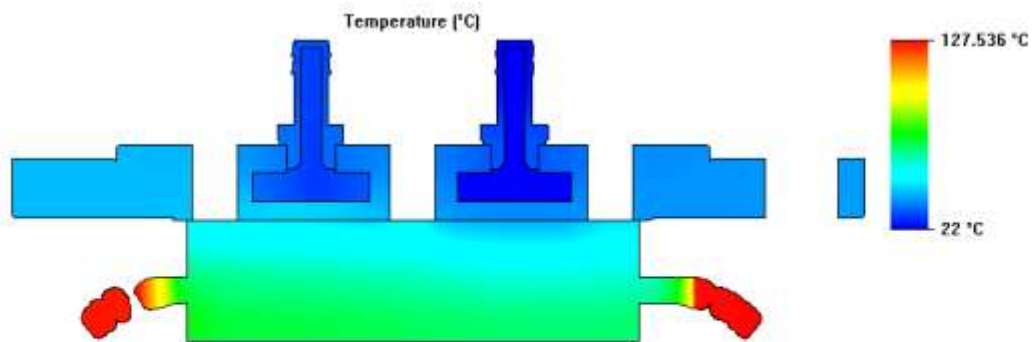


1

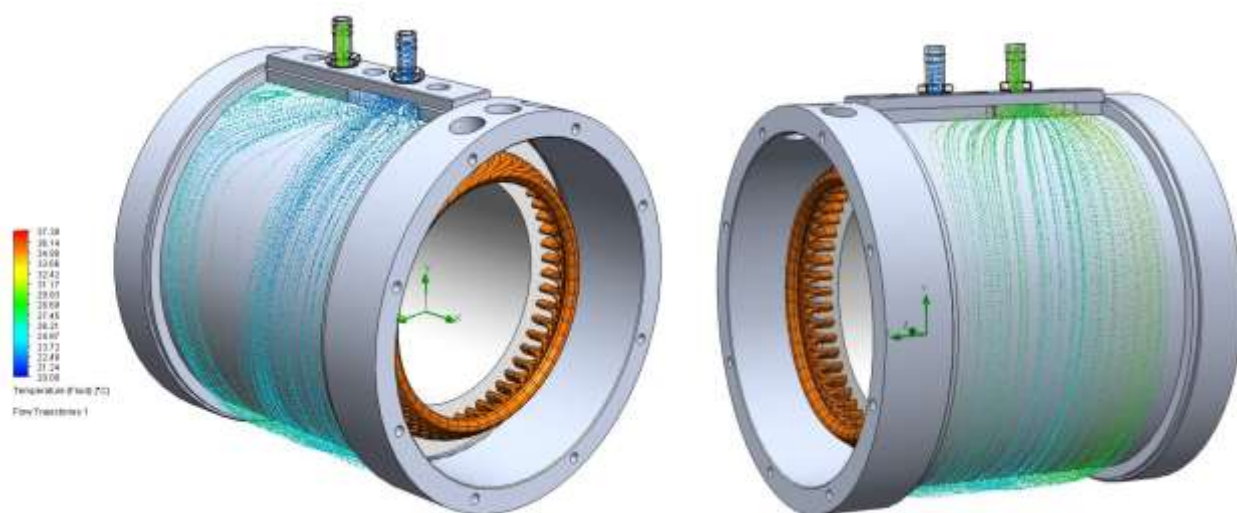


2

4.6 pav. Temperatūros pasiskirstymas variklio korpuse: 1 – aušinimo ertmės vidiniame paviršiuje; 2 – išoriniame korpuso paviršiuje



4.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas variklio korpuso skespjūvyje

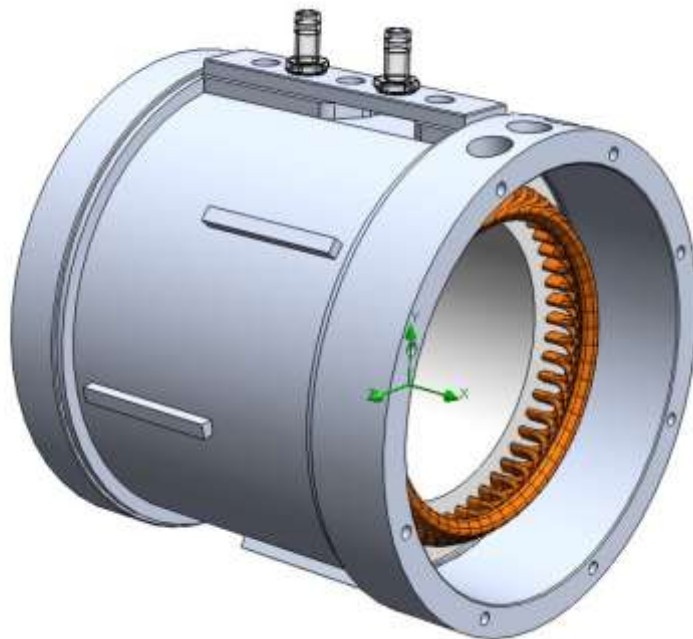


4.8 pav. Aušinimo skysčio tėkmė variklio korpuse

Atlikus pradinio elektros variklio korpuso aušinimo analizę gauti korpuso ir aušinimo skysčio temperatūrų pasiskirstymo grafikai (4.6 pav., 4.7 pav.). Nustatyta, kad dėl elektros variklio statoriuje atsirandančių nuostolių statoriaus temperatūra padidėja iki 127,54 °C. Sumodeliavus aušinimo skysčio srauto tekėjimą variklyje (4.8 pav.) pastebėta, kad dalyje aušinimo kanalo, kuriuo teka skystis, atsiranda sūkūriai ir aušinimas čia yra prastesnis. Toks skysčio tekėjimas pablogina šilumos nunešimą nuo korpuso. Taip pat nustatyta, esant tokiai aušinimo kanalo formai pratekantčio aušinimo skysčio vidutinė temperatūra padidėja nuo 22 °C iki 28 - 30 °C.

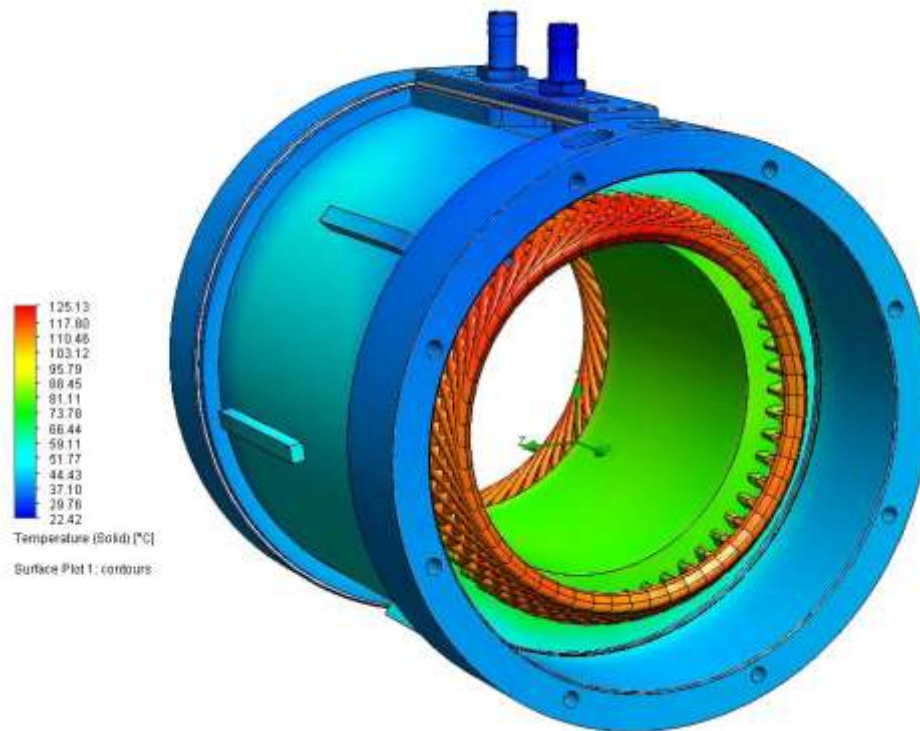
4.2. Elektros variklio korpuso, su srauto kreipiančiosiomis, aušinimo parametrų analizė

Modifikuojama aušinimo skysčio tekėjimo ertmė, pridėdama papildomų detalių, kurios padidina skysčio tekėjimo kelią aušinimo kanalu, taip pat padidinamas aušinimo skysčio ir korpuso lietimosi plotas.

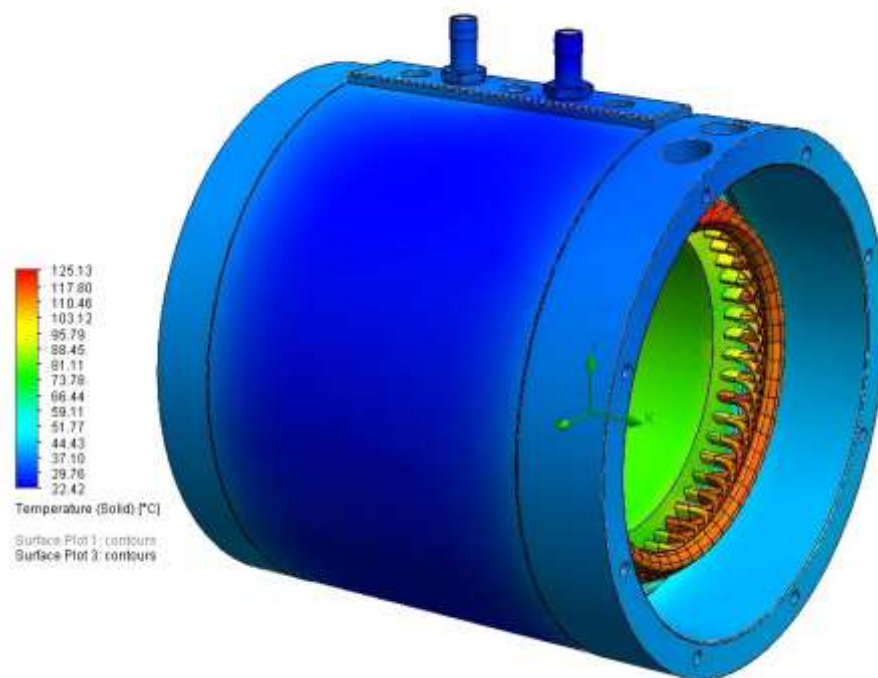


4.9 pav. Modifikuoto elektros variklio korpuso modelis

Naudojant tokias pat sąlygas kaip ir pirminėje analizėje atliekamas aušinimo savybių tyrimas. Variklio korpuso temperatūros pasiskirstymas parodytas 4.9 pav., o aušinimo skysčio tėkmė – 4.10 paveiksle.

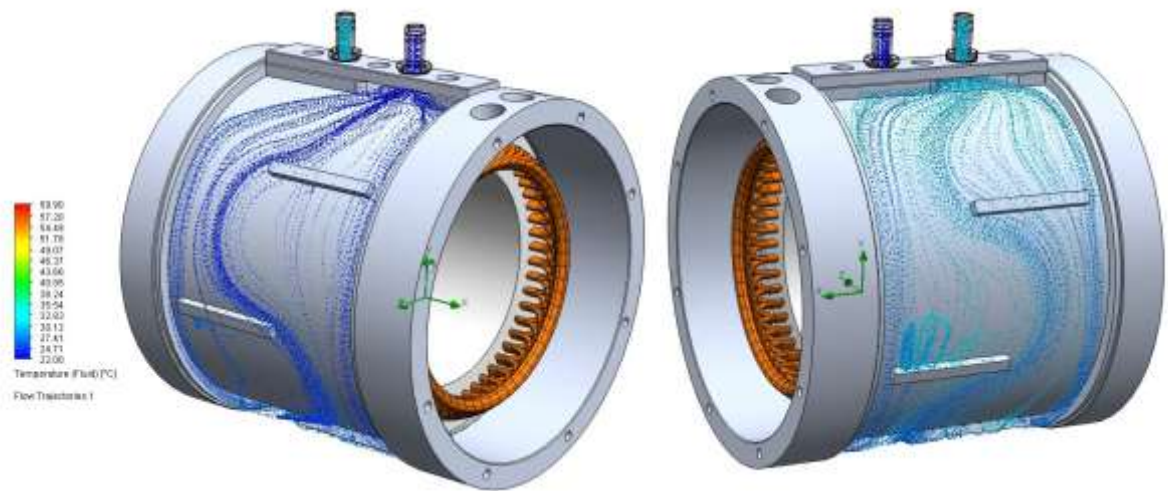


1



2

4.10 pav. Temperatūros pasiskirstymas modifikuotame variklio korpusė: 1 – aušinimo ertmės vidiniame paviršiuje; 2 – išoriniame korpuso paviršiuje



4.11 pav. Skysčio tekėjimas modifikuotame variklio korpusė

Kadangi pirmosios analizės metu gauti rezultatai netenkina norimų, buvo atliktas aušinimo kanalo geometrijos pakeitimas. Į aušinimo kanalą įterpti papildomi elementai, kurie padidina kanalo paviršiaus plotą ir prailgina aušinimo skysčio tekėjimo kelią. Atlikus modifikacijas ir pakartojus analizę gauti tokie rezultatai: maksimali statoriaus ir variklio korpuso temperatūra lygi 125,13 °C, vidutinė aušinimo skysčio temperatūra – 32 – 35 °C.

Iš antros analizės rezultatų matyti, kad papildomi elementai aušinimo kanale maksimalią variklio korpuso ir statoriaus temperatūrą sumažina beveik 2 °C t.y. nuo 127,54 °C iki 125,13°C. Tuo tarpu aušinimo skysčio vidutinė temperatūra, lyginant pradinę ir modifikuotą korpuso geometriją, padidėja apie 5 °C. Tai rodo, kad modifikuojant aušinimo kanalą ir įterpiant papildomus elementus didinančius paviršiaus plotą galima pagerinti bendras variklio aušinimo savybes.

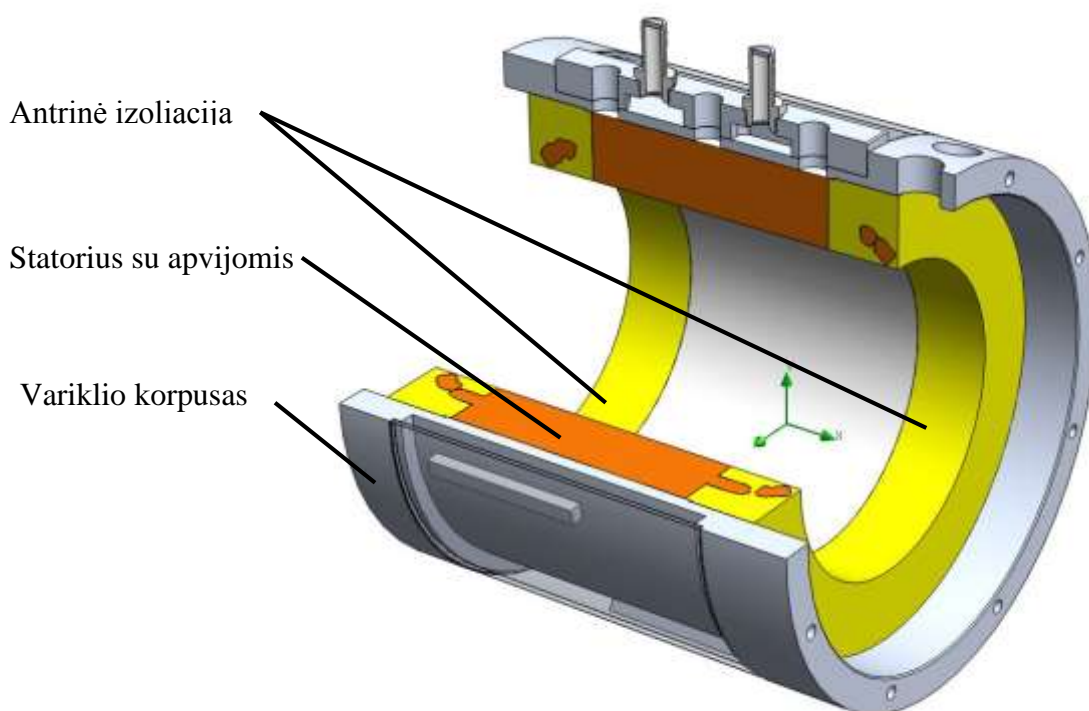
Keičiant aušinimo skysčio tėkmę ar didinant aušinamo paviršiaus plotą galima pasiekti patenkinamus rezultatus, tačiau iš kompiuterinės analizės rezultatų, rodančių temperatūros pasiskirstymą (4.6, 4.10 pav.), matyti, kad didžiausia šilumos koncentracija yra apvijų vietose, kurios neturi kontakto nei su statoriumi, nei su korpusu. Norint ženkliai padidinti aušinimo efektyvumą ir sumažinti statoriaus temperatūrą reikia statoriaus apvijų galuose susikaupusią šilumą perduoti į aušinamą variklio korpusą.

Šilumos nuvedimui iš apvijų galų geriausiai tinka specialios medžiagos, turinčios geras šilumos perdavimo savybes. Šiuo atveju tikslingiausia naudoti specialią epoksidinę dervą, skirtą elektros variklių apvijų antrinei izoliacijai.

4.3. Elektros variklio korpuso aušinimo parametrų analizė, panaudojus antrinę izoliaciją

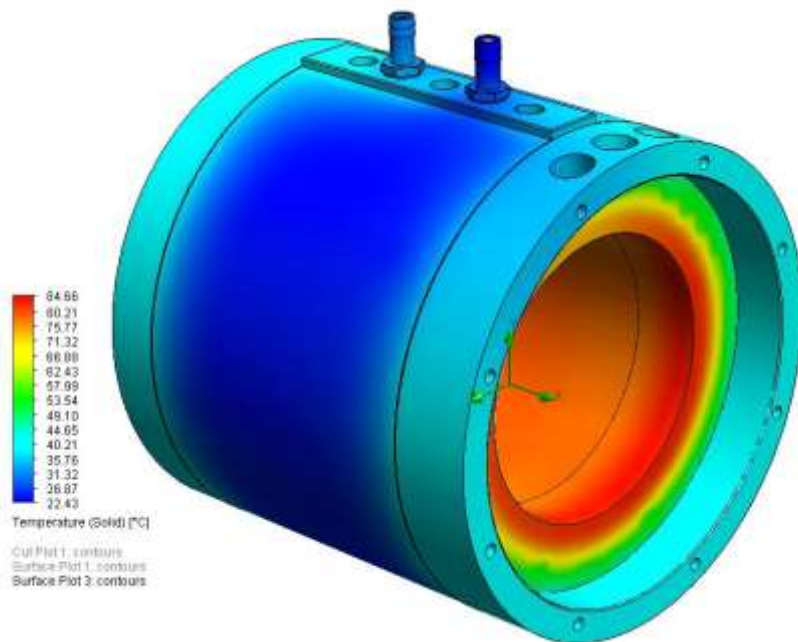
Modifikavus elektros variklio aušinimo kanalo geometriją pastebėta, kad aušinimo parametrai pasikeičia nežymiai, bei nustatyta, kad norint sumažinti statoriaus temperatūrą reikia nuvesti šilumą atsirandančią apvijų galuose į aušinamą korpusą. Norint užtikrinti tinkamą šilumos nuvedimą iš apvijų pasirinkta naudoti specialią epoksidinę dervą, kuri užtikrins maksimalų paviršių lietimosi plotą.

Norint nustatyti aušinimo savybių pokytį buvo sudarytas elektros variklio korpuso modelis (4.12 pav.). Papildomai įvestos antrinei izoliacijai naudojamos epoksidinės dervos temperatūrinės savybės pateiktos [13].

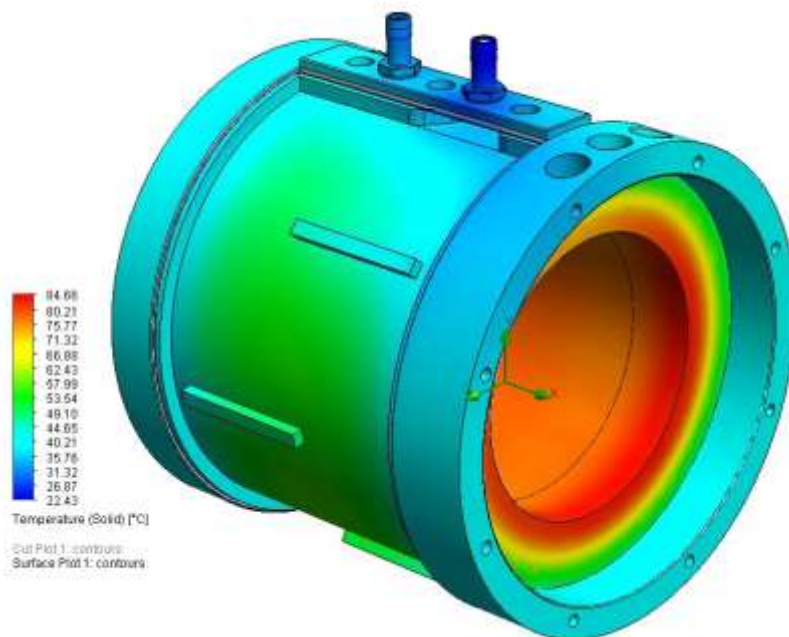


4.12 pav. Elektros variklio modelis su antrine apvijų izoliacija

Atlikus reikalingus pakeitimus ir naudojant pradines sąlygas atliekama analizė. Gauti rezultatai pateikti 4.13, 4.14 ir 4.15 paveikslėliuose.

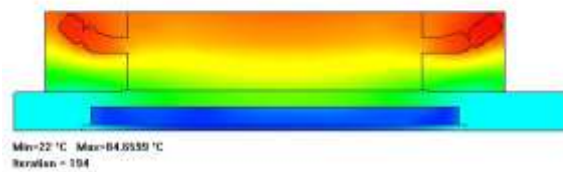
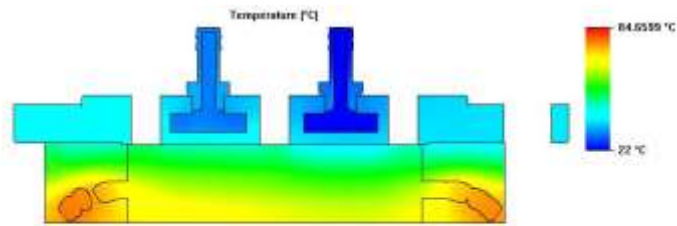


1

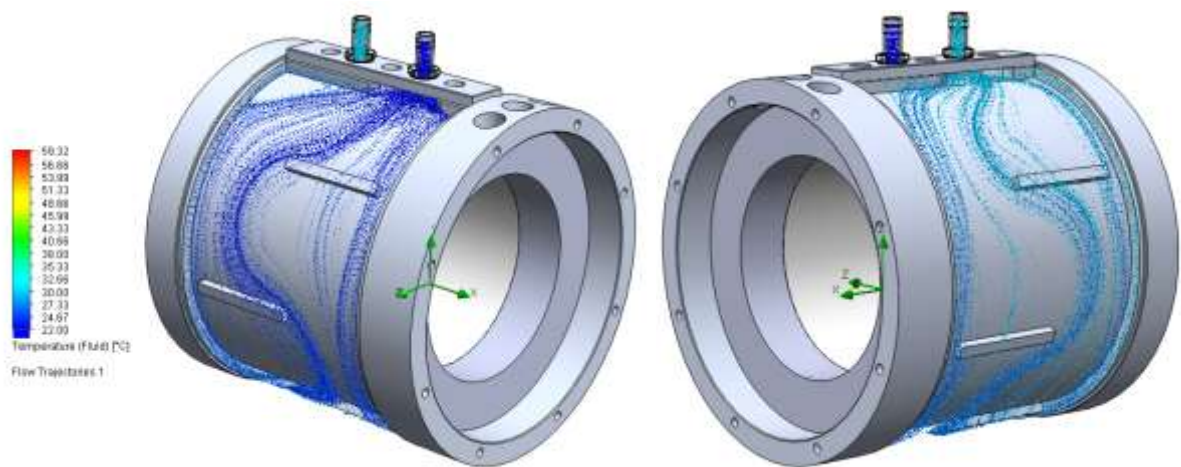


2

4.13 pav. Temperatūros pasiskirstymas variklio korpuse, panaudojus antrinę izoliaciją: 1 – išoriniame korpuso paviršiuje; 2 – aušinimo ertmės vidiniame paviršiuje



4.14 pav. Temperatūros pasiskirstymas variklio skerspjūvyje



4.16 pav. Aušinimo skysčio tekėjimo trajektorijos

Panaudojus antrinę izoliaciją elektros variklio statoriaus apvijų maksimali temperatūra sumažinama iki 84,659 °C (4.14 pav.). Vidutinė variklio korpuso išorės temperatūra yra lygi ~30 – 45 °C . Gauti analizės duomenys rodo, kad elektros variklio maksimalūs temperatūriniai režimai nebus pasiekiami ir variklis galės tinkamai funkcionuoti, tada kai jo statoriaus apvijos bus apsaugotos antrine izoliacija, nunešančia šilumą į korpusą. Panaudodami kompiuterinės analizės metu gautus duomenis atliekame praktinius bandymus.

5. EKSPERIMENTINIS ELEKTROS VARIKLIO AUŠINIMO PARAMETRŲ TYRIMAS

5.1. Bandomojo elektros variklio gamyba

Norint atlikti praktinius elektros variklio aušinimo efektyvumo bandymus reikia pagaminti bandymams skirtą variklį. Pagal 3 skyriuje ir 1 priede pateiktus brėžinius pagaminamas elektros variklio korpusas ir kiti papildomi elementai.



5.1 pav. Skysčiu aušinamo elektros variklio korpuso ruošinys

Elektros variklio korpusas gaminamas iš keleto detalių, kurios tarpusavyje suvirinamos ir gaunamas galutinis gaminys. Korpusas sudarytas iš trijų detalių, tai: korpuso pagrindas (5.1 pav.), aušinimo skysčio žarnų prijungimo plokštelė ir aušinimo kanalo išorinė valcuota skarda.

Pagaminus korpusą į jį įpresuojamas statorius su apvijomis ir prijungiami maitinimo laidai (5.2 pav.).



5.2 pav. Elektros variklio korpusas su statoriumi

Po statoriaus presavimo seka apvijų užpylimas antrine izoliacija. Pagal gamintojo specifikaciją paruošiama dviejų komponentų epoksidinė derva, kuria užpilamas vienas statoriaus galas su apvijomis ir nustatytoje temperatūroje laikomas 24 valandas, kol sukietėja derva. Toliau seka kitos statoriaus dalies užpylimas ir epoksidinės dervos kietinimas. Epoksidinė derva kietėjimo metu laikoma pastovioje temperatūroje, kad būtų pasiektos nustatytos temperatūrinės savybės.



5.3 pav. Elektros variklio korpusas su užpiltomis apvijomis

Po statoriaus apvijų užpylimo seka rotoriaus surinkimas (5.4 pav.), guolių ir galinių korpuso dangtelių montavimas. Surinktas bandomasis elektros variklis parodytas 5.5 paveiksle.



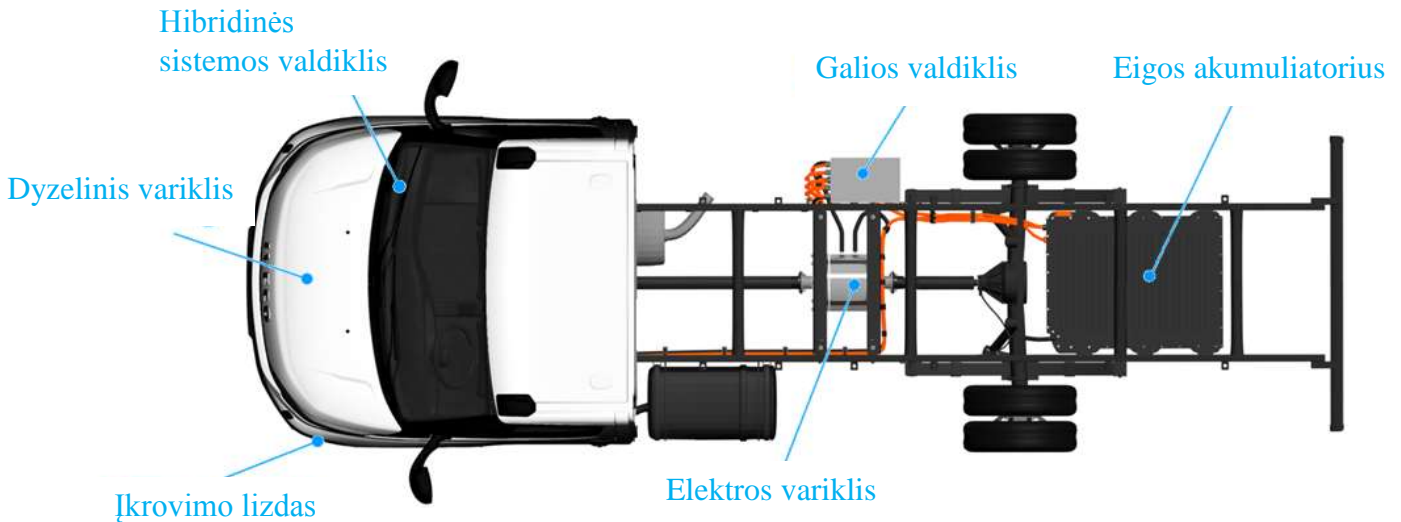
5.4 pav. Surinktas elektros variklio rotorius



5.5 pav. Surinktas skysčiu aušinamas elektros variklis

Suprojektuotas variklis bus naudojamas hibridinių sunkvežimių, kurių maksimali bendroji masė yra iki 3,5 t., todėl jo temperatūriniai režimai nustatinėjami sumontavus į automobilį. Tyrimo

tikslas yra nustatyti realius temperatūrinius režimus atsirandančius įprastinėmis eksploataavimo sąlygomis. Surinktas elektros variklis montuojamas į IVECO DAILY automobilį.



5.6 pav. Bandymams skirto automobilio komponentų išdėstymo schema

Elektros variklis automobilyje montuojamas nuosekliai kardaniniam velenui. Jis maitinamas iš galios valdiklio, keičiančio eigos akumulatoriaus nuolatinę įtampą į trifazę kintamą įtampą. Automobilio valdymo ir parametrų stebėjimo įranga prie galios valdiklio prijungiama per hibridinės sistemos valdiklį. Elektros variklio montavimas prie kardaninio veleno leidžia automobilį eksploatuoti trimis režimais: varomas elektra, varomas vidaus degimo varikliu ir hibridinis t.y. varomas elektra ir vidaus degimo varikliu.



5.7 pav. Automobilyje sumontuotas elektros variklis

5.2. Elektros variklio bandymo metodikos aprašymas

Praktiniam skysčiu aušinamo elektros variklio tyrimui atlikti ir gautų duomenų tikslumui užtikrinti, bandymų atlikimo metu reikia laikytis nustatytos tvarkos.

- **Bandymo pradžia:**

Prieš pradėdant variklio temperatūrinių režimų nustatymo bandymą reikia nustatyti pradines sąlygas t.y. aplinkos temperatūrą, taip pat įsitikinti, kad aušinimo skysčio ir variklio temperatūros nesisiskiria nuo aplinkos temperatūros. Jeigu prieš bandymą automobilis su tiriamuoju varikliu buvo laikomas patalpoje reikia palaukti, kol variklio temperatūra susivienodins su aplinkos temperatūra.

- **Bandymo eiga:**

Nustačius pradines sąlygas pradedamas bandymas. Jo metu automobilis varomas tik tiriamojo elektros variklio eksploatuojamas realiomis eismo sąlygomis. Bandymo metu nustatytais laiko tarpais fiksuojami temperatūros daviklio, pritvirtinto prie elektros variklio korpuso, parodymai. Gauti duomenys užrašomi į 5.1 lentelę. Bandymo trukmė ne mažiau kaip 30 minučių. Temperatūros daviklio duomenys fiksuojami 5 minučių intervalu.

5.1 lentelė. Bandymų rezultatų fiksavimo pavyzdys.

Bandymo data:							Oro temperatūra:	°C
	Bandymo trukmė, min							
	0	5	10	15	20	25	30	
Korpuso temperatūra	

5.3. Bandymo rezultatų apžvalga

Pagaminus bandomąjį elektros variklio modelį ir sumontavus jį į automobilį buvo atlikti variklio korpuso temperatūros stebėjimai. Temperatūra buvo fiksuojama 5 minučių intervalu, kai automobilis važiavo realiame eisme. Stebėjimų duomenys užrašyti toliau pateikiamose lentelėse.

5.2 lentelē. Variklio korpuso temperatūra (1 bandymas).

Bandymo data:	05.04		Oro temperatūra:	12 °C			
	Bandymo trukmė, min						
	0	5	10	15	20	25	30
Korpuso temperatūra	12	23	34	38	36	37	36

5.3 lentelē. Variklio korpuso temperatūra (2 bandymas).

Bandymo data:	05.05		Oro temperatūra:	17 °C			
	Bandymo trukmė, min						
	0	5	10	15	20	25	30
Korpuso temperatūra	17	30	35	38	38	42	41

5.4 lentelē. Variklio korpuso temperatūra (3 bandymas).

Bandymo data:	05.06		Oro temperatūra:	15 °C			
	Bandymo trukmė, min						
	0	5	10	15	20	25	30
Korpuso temperatūra	15	23	32	35	37	38	36

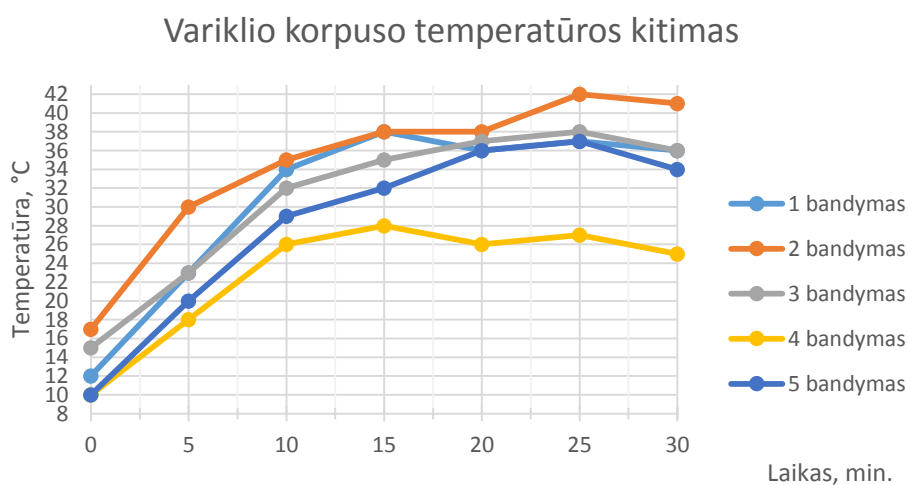
5.5 lentelė. Variklio korpuso temperatūra (4 bandymas).

Bandymo data:	05.07		Oro temperatūra:	10 °C			
	Bandymo trukmė, min						
	0	5	10	15	20	25	30
Korpuso temperatūra	10	18	26	28	26	27	25

5.6 lentelė. Variklio korpuso temperatūra (5 bandymas).

Bandymo data:	05.08		Oro temperatūra:	10 °C			
	Bandymo trukmė, min						
	0	5	10	15	20	25	30
Korpuso temperatūra	10	20	29	32	36	37	34

Su bandomuoju automobiliu 2015 metų gegužės mėnesį buvo atlikti 5 bandomieji važiavimai, kurių metu stebėta ir fiksuota elektros variklio korpuso temperatūros kaita. Iš gautų duomenų sudarytas 5.8 pav. parodytas grafikas.



5.8 pav. Variklio korpuso temperatūros kitimo grafikas



5.9 pav. Elektros variklio korpuso temperatūros pasiskirstymas

Iš gauto grafiko matyti, kad nuo bandymo pradžios elektros variklio korpuso temperatūra staigia kyla, kol maždaug po 15 minučių nusistovi tarp 32 – 38 °C. Tai galima paaiškinti tuo, kad bandymo pradžioje variklio korpuso ir jį aušinančio skysčio temperatūra yra lygi aplinkos temperatūrai, kuri bandymų metu yra gerokai mažesnė nei variklio darbinė temperatūra.

Vėlesni korpuso temperatūros svyravimai atsiranda dėl eismo ypatumų t.y. dėl galimo automobilio stovėjimo prie sankryžų, degant raudonam šviesoforo signalui ir kt. Tuo metu kai automobilis sustojęs elektros variklis neveikia ir šiluma jame nesusidaro, tuo metu aušinimo skystis tekantis per aušinimo radiatorių iš variklio nuneša atitinkamą šilumos kiekį ir korpuso temperatūra sumažėja.

Taip pat elektros variklio korpuso temperatūrą įtakoja aplinkos oro temperatūra ir akceleracijos bei stabdymo dažnumas ir stiprumas. Kaip matyti iš grafiko antrojo bandymo metu aplinkos oro temperatūra siekė 17 °C, todėl aušinimo radiatoriaus efektyvumas buvo mažesnis ir elektros variklio korpuso temperatūra didesnė, nei kitų bandymų metu. Staigiai greitėjant elektros varikliu teka didesnė elektros srovė todėl apvijose išsiskiria didesnis šilumos kiekis, nei akceleruojant tolygiai ir palengva. Stabdymo metu elektros variklis veikia generatoriaus režimu, taigi kuo ilgesnis ir stipresnis stabdymas tuo didesnė elektros srovė generuojama variklyje.

IŠVADOS

Atlikus literatūros apžvalgą ir alternatyvių produktų analizę pastebėta, kad populiariausi elektros varikliai naudojami elektriniame transporte yra bešepetėliniai nuolatinės srovės ir asinchroniniai. Dėl konstrukcijos ir valdymo sistemos paprastumo asinchroniniai varikliai yra geresnis pasirinkimas, kuriant hibridinius sunkvežimius. Asinchroninio elektros variklio aušinimui galimos kelios alternatyvos. Paprasčiausia ir populiariausia – aušinimas oru. Jeigu tokio aušinimo nepakanka naudojamas aušinimo skystis, kuris nukreipiamas variklio korpuse įrengtu kanalu arba rotoriaus ašimi. Dėl gamybos paprastumo ir nesudėtingo prijungimo pasirinkta projektuoti asinchroninį elektros variklį su aliuminiame korpuse įrengtu aušinimo kanalu.

Projektavimo darbams atlikti naudota SOLIDWORKS kompiuterinio projektavimo (CAD) sistema. Kompiuterinei elektros variklio modelio analizei nuspręsta naudoti skaičiuojamosios skysčių dinamikos (CFD) programinę įrangą, kuri integruota į projektavimo sistemą.

Naudojant CAD programą suprojektuotas skysčiu aušinamas asinchroninis elektros variklis. Jame panaudotas standartinio dydžio statorius ir rotorius supaprastina variklio gamybą ir užtikrina norimą gauti galią. Suprojektuoto variklio maksimali galia $P = 63 \text{ kW}$, maksimalus sukimo momentas $T = 900 \text{ Nm}$, naudingumo koeficientas $\eta = 85 \%$.

Sukūrus kompiuterinį elektros variklio modelį atlikta aušinimo savybių analizė. Pastebėta, kad pradinė aušinimo kanalo forma yra nepriimtina, nes neužtikrinamas elektros variklio aušinimas, o maksimali variklio temperatūra, $t_{\text{maks.1}} = 127,54 \text{ }^\circ\text{C}$, yra artima maksimaliai apvijų izoliacijos temperatūrai. Taip pat dėl netinkamos aušinimo kanalo formos aušinimo skystis nenuneša pakankamo šilumos kiekio ir aušinimo radiatoriuje šilumos mainai yra neefektyvūs, dėl mažo temperatūrų skirtumo ($t_{\text{oro}} = 22 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{\text{skysčio}} = 28\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$).

Paaikškęjus elektros variklio korpuso aušinimo kanalo trūkumams buvo atlikti pakeitimai ir aušinimo kanale šachmatine tvarka išdėstyti papildomi elementai padidinantys aušinamą plotą ir prailginantys aušinimo skysčio kelią. Tokie pakeitimai maksimalią temperatūrą sumažino tik $2 \text{ }^\circ\text{C}$ iki $t_{\text{maks.2}} = 125,13 \text{ }^\circ\text{C}$, tačiau aušinimo skysčio temperatūrą padidino nuo $28\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C}$ iki $32\text{-}35 \text{ }^\circ\text{C}$. Pastebėta, kad maksimali temperatūra susidaro statoriaus apvijų galuose, kurie neturi kontakto su aušinamu korpusu. Norint sumažinti temperatūrą apvijose suprojektuotas elektros variklis su specialia antrine izoliacija, perduodančia šilumą iš apvijų į korpusą. Pakartojus analizę gauti tokie rezultatai: maksimali temperatūra $t_{\text{maks.3}} = 84,659 \text{ }^\circ\text{C}$, aušinimo skysčio maksimali temperatūra $t_{\text{skysčio3}} = 59,32 \text{ }^\circ\text{C}$, vidutinė temperatūra $t_{\text{sk.vid.3}} = 33\text{-}37 \text{ }^\circ\text{C}$. Tokie teoriniai rezultatai tenkina reikalavimus, todėl buvo pagamintas bandomasis elektros variklis.

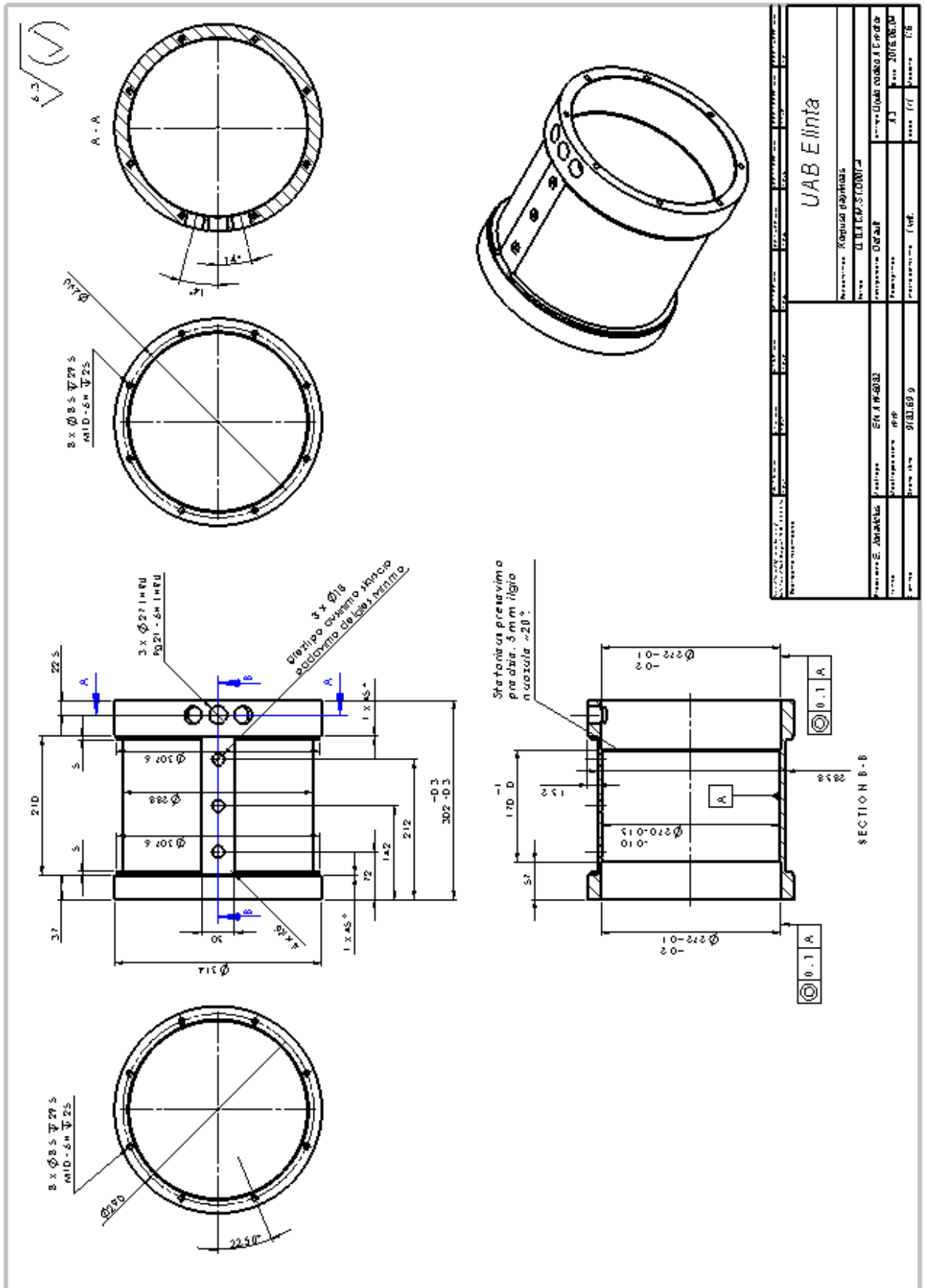
Bandomąjį variklį sumontavus į automobilį buvo atliekami bandymai realiomis sąlygomis. Gauti penkių bandymų duomenys parodė, kad elektros variklio temperatūra priklauso nuo važiavimo režimo, aplinkos temperatūros ir kitų veiksnių. Bandymų metu pasiekta maksimali elektros variklio korpuso temperatūra buvo 41 °C, kai oro temperatūra 17 °C. Vidutinė korpuso temperatūra visų bandymų metu buvo apie 36-38 °C. Tokie rezultatai patvirtina teorinius skaičiavimus, nes kompiuterinės analizės duomenimis korpuso išorės temperatūra svyruoja tarp 30-45 °C. Tiek praktiniai tiek teoriniai rezultatai rodo, kad panaudojus specialią epoksidinę dervą antrinei statoriaus apvijų izoliacijai darbinė elektros variklio temperatūra nepriartėja prie maksimalios apvijų izoliacijos temperatūros ir suprojektuotas elektros variklis yra tinkamas naudojimui.

LITERATŪRA

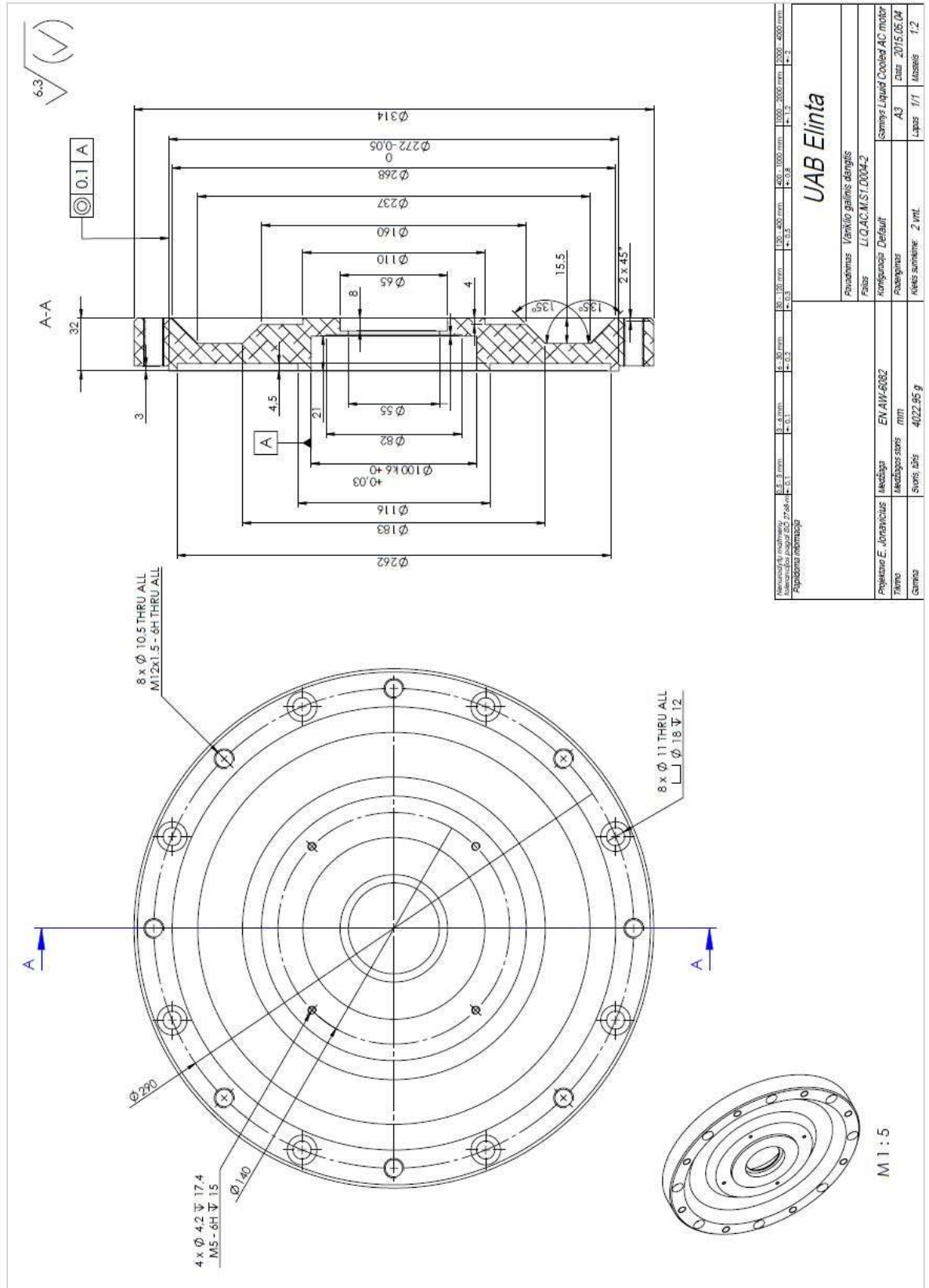
1. Elektros varikliai. [interaktyvus], [žiūrėta 2011-12-10]. Prieiga per internetą: <http://www.energymanagertraining.com/CodesandManualsCD5-Dec%2006/BEST%20PRACTICE%20MANUAL-ELECTRIC%20MOTORS.pdf>
2. Dr. Algirdas Baškys „Dažnio keitikliai elektros variklių valdymui“, Puslaidininkių fizikos instituto Mikroelektronikos laboratorijos vedėjas.
3. Tom McNally, The Sixth Scottish University. The Scots Colleges Abroad: 1575 to 1799 (Brill, Leiden, 2012) p. 115
4. Thompson, Silvanus Phillips (1895). Polyphase Electric Currents and Alternate-Current Motors (1st ed.). London: E. & F.N. Spon. p. 261. Išleistas 2012 Gruodžio 2 d.
5. Vučković, Vladan (November 2006). "Interpretation of a Discovery". The Serbian Journal of Electrical Engineers **3** (2). Išleistas 2013 Vasario 10 d.
6. Tesla patentas. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-12-03]. Prieiga per internetą: <https://www.google.com/patents/US7489057?dq=tesla+motor&hl=lt&sa=X&ei=WNV8VJbcAuTNygOrmoD4Dw&ved=0CEsQ6AEwBQ>
7. CAN sąsaja. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-05-20]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/CAN_bus
8. Odyne hibridinė sistema. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-06-11]. Prieiga per internetą: <http://www.odyne.com/>
9. Efficient Drivetrains Inc. įmonės gaminama EDI-Drive sistema. [interaktyvus], [žiūrėta 2014-06-11]. Prieiga per internetą: http://www.efficientdrivetrains.com/edi-drive_drivetrain_line.html
10. CFD aprašymas. [interaktyvus], [žiūrėta 2015-04-04]. Prieiga per internetą: http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics
11. ANSYS Fluent programinės įrangos gamintojo aprašymas. [interaktyvus], [žiūrėta 2015-04-05]. Prieiga per internetą: <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+Fluent>
12. SOLIDWORKS FlowSimulation programos darbo langas. [interaktyvus], [žiūrėta 2015-04-05]. Prieiga per internetą: <http://innova-systems.co.uk/assets/images/videoimgs/flowbreakout.JPG>
13. Antrinei izoliacijai naudojamos epoksidinės dervos specifikacija. [interaktyvus], [žiūrėta 2015-04-15]. Prieiga per internetą: http://www.nylund.fi/media/datasheetit/elantas/elantron_mc622_w363_04_eng_6641.pdf

PRIEDAI

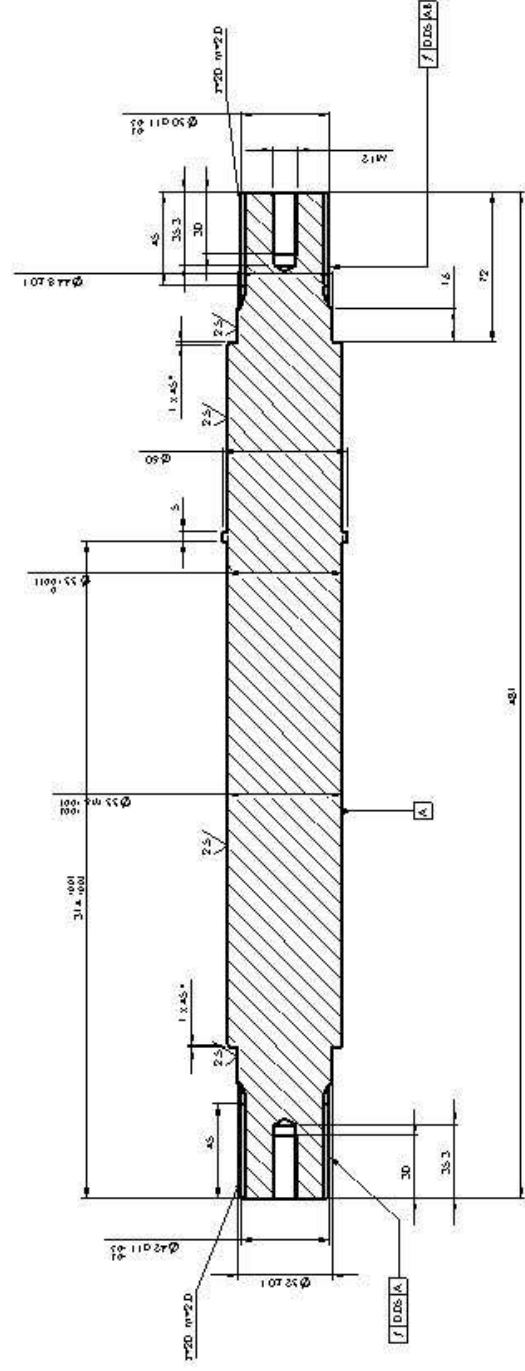
1 Priedas. Elektros variklio korpuso brėziny.



2 Priedas. Elektros variklio galinio dangtelio brėžinys



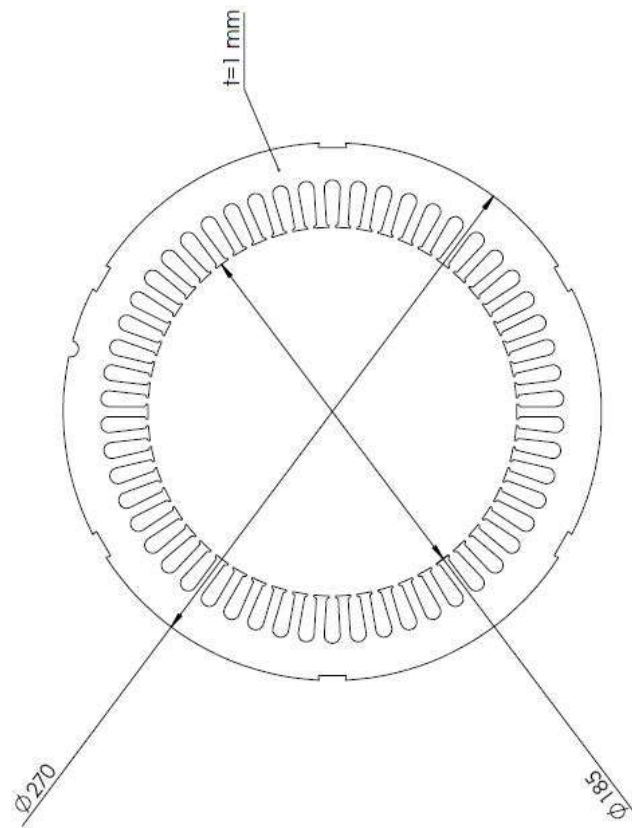
3 Priedas. Elektros variklio rotoriaus ašies brėžinys



Priekšinis žymėjimas:
 - Mažiausias leistinas greitis: 1000 rpm
 - Nominalus greitis: 1500 rpm
 - Didžiausias leistinas greitis: 3000 rpm
 - Kiektoriaus kompiuterinio modeliavimo rezultatai: 107.277.01

Projektavimas	Antanas V. V.
Patikrinimas	Antanas V. V.
Užduoties numeris	107.277.01
Skalas	1:1
Surinkimo data	2013.12.30
Surinkimo vieta	UAB "Energija"
Surinkimo laikas	1 val.
Surinkimo kaina	10000 Lt
Surinkimo sąlygos	20°C, 50% RH

4 Priedas. Elektros variklio statoriaus plokštelės brėžinys



Papildoma informacija		UAB Elinta			
		Pavadinimas: Stator plate Failas: Stator_160L			
Projektavo: E. Jonavicius	Medžiaga	Konfiguracija: Default	GaminyšAC motor		
Tikimo	Medžiagos storis: 1 mm	Pavengimas	A4	Data: 2015.05.04	
Garna	Svoris, tūris	Kiekis: 1 vnt.	Lapas: 1/1	Mastelis: 1:2	

5 Priedas. Antrinės izoliacijos charakteristikos



SYSTEM SPECIFICATIONS

Property	Conditions	Method	Resin MC 622	Hardener W 363	UM
Viscosity at:	25°C	IO-10-50 (EN13702-2)	25.000÷45.000	10÷30	mPas
Density at:	25°C	IO-10-51 (ASTM D 1475)	1,78±1,82	-	g/ml

TYPICAL SYSTEM CHARACTERISTICS

Property	Conditions	Method	Value	UM
Mixing ratio by weight		for 100 g resin	100:9,5	g
Mixing ratio by volume		for 100 ml resin	100:17,5	ml
Resin Colour			Various colours	
Hardener Colour			Blue Neutral	
Viscosity resin	40°C	IO-10-50 (EN13702-2)	10.000±15.000	mPas
	50°C	IO-10-50 (EN13702-2)	5.000±8.000	mPas
	60°C	IO-10-50 (EN13702-2)	3.000±4.500	mPas
Density hardener	25°C	IO-10-51 (ASTM D 1475)	0,97±1,01	g/ml
Initial mixture viscosity at:	40°C	IO-10-50 (EN13702-2)	1.600±2.400	mPas
Pot life at:	40°C (10.000 mPas)	IO-10-50 (EN13702-2) (*)	25±30	min
Pot life	25°C (50mm;200ml)	IO-10-53 (*)	35±45	min
Exothermic peak	25°C (50mm;200ml)	IO-10-53 (*)	55±62	°C
Gelation time	25°C (15ml;6mm)	IO-10-73 (*)	3,5±4,5	h
	40°C (15ml;6mm)	IO-10-73 (*)	55±65	min
Gelation time	40°C 100 ml	IO-10-52b (UNI 8701)	52±62	min
Demoulding time	25°C (15ml;6mm)	(*)	8±10	h
Post-curing	60°C	(**)	(6 - 8)	h

TYPICAL CURED SYSTEM PROPERTIES

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

Property	Conditions	Method	Value	UM
Surface			Semi-bright	
Density	25°C	IO-10-54 (ASTM D 792)	1,72±1,76	g/ml
Hardness	25°C	IO-10-58 (ASTM D 2240)	83±87	Shore D/15
Glass transition (Tg)		IO-10-69 (ASTM D 3418)	50±56	°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)	30±35	10 ⁻⁶ /°C
Linear thermal expansion (Tg +10°C)		IO-10-71 (ASTM E 831)	105±125	10 ⁻⁶ /°C
Thermal shock (n°10 cycles passed)		IO-10-67 (inserto metalico Olyphant)	- 55++ 180	°C
Flammability		IO-10-68 (UL 94 HB)	1,5	mm
		IO-10-68 (UL 94 V-0)	3,0	mm
Max recommended operating temperature		IEC 60085 (***)	155	°C
Thermal conductivity		IO-10-87 (ASTM C518)	1,1±1,2	W/(m°K)
Dielectric constant at:	25°C	IO-10-59 (ASTM D 150)	4,2±4,6	
Loss factor at:	25°C	IO-10-59 (ASTM D 150)	38±48	x 10 ⁻³
Volume resistivity at:	25°C	IO-10-60 (ASTM D 257)	2,5 x 10 ¹⁴ ±4,5 x 10 ¹⁴	Ohm x cm
Dielectric strength	25°C	IO-10-61 (ASTM D 149)	22±25	kV/mm
Flexural strength		IO-10-66 (ASTM D 790)	65±75	MN/m ²
Strain at break		IO-10-66 (ASTM D 790)	0,9±1,6	%
Flexural elastic modulus		IO-10-66 (ASTM D 790)	8.500±9.500	MN/m ²
Tensile strength		IO-10-63 (ASTM D 638)	42±50	MN/m ²
Elongation at break		IO-10-63 (ASTM D 638)	1,0±1,8	%
Compressive strength		IO-10-72 (ASTM D 695)	85±95	MN/m ²