

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektrických pohonů a trakce

**Dimenzování systému chlazení trakčního motoru
bateriového elektromobilu v SW prostředí ANSYS**

leden 2021

Vypracoval: Bc. Jan Dimitrov

Vedoucí práce: Ing. Karel Buhr, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Datum: 5. 1. 2021

.....

podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za poskytnutí rad, podnětů a materiálů pro zpracování této diplomové práce.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dimitrov** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **456977**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektrických pohonů a trakce**
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**
Specializace: **Elektrické pohony**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Dimenzování systému chlazení trakčního motoru bateriového elektromobilu v SW prostředí ANSYS

Název diplomové práce anglicky:

Design of Cooling System for Traction Motor in SW ANSYS

Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s vývojovým prostředím ANSYS
2. Vypracujte rešerši stavu techniky v oboru systémů chlazení trakčních pohonů lehkých BEV
3. Pro návrh trakčního motoru, využijte modul MotorCAD
4. Proveďte simulace tepelného zatěžování trakčního motoru pohonu
5. Analyzujte vypočtená data.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcová V., Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons 2014
- [2] Hrabovcová V., Janoušek L., Rafajdus P., Ličko M., Moderné elektrické stroje, Zilina, 2001
- [3] Boldea I., Tutelea L., Electric Machines - Steady State, Transients and Design with Matlab, CRC Press, 2010
- [4] Manuály ANSYS RMXprt, Maxwell 3D, Techsoft-engineering 2017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Karel Buhr, CSc., katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **13.09.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.01.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Karel Buhr, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Anotace

Cílem této diplomové práce je navrhnout chladicí systém trakčního motoru/generátoru pro elektrický bateriový automobil typu SUV s aerodynamickými vlastnostmi vozu Škoda Kodiaq dle zadaných specifikací. Seznámit se se softwarovým prostředím ANSYS Motor-CAD, ve kterém provést tepelný návrh a následné simulace ustáleného oteplení a přechodových jevů.

Klíčová slova

ANSYS Motor-CAD, tepelný návrh, ekvivalentní tepelný obvod, vodní chlazení pláště, synchronní reluktanční motor s permanentními magnety, PMSRM

Summary

The aim of this thesis is to design a cooling system of a traction motor / generator for an electric battery vehicle of the SUV type with aerodynamic properties of the Škoda Kodiaq car according to the given specifications. To get acquainted with the ANSYS Motor-CAD software, in which to perform thermal model and subsequent simulations of steady state and transients.

Index Terms

ANSYS Motor-CAD, Thermal, cooling system, lumped circuit model, housing water jacket, permanent magnet synchronous reluctance machine, PMSRM

OBSAH

Úvod	8
1 Teoretická část.....	9
1.1 Ztráty.....	9
1.1.1 Ztráty ve vinutí	10
1.1.2 Ztráty v železe	10
1.1.3 Mechanické ztráty.....	11
1.2 Odvod ztrátového tepla	12
1.2.1 Vedení.....	12
1.2.2 Proudění.....	13
1.2.3 Sálání	15
1.3 Tepelný výpočet	16
1.3.1 CFD	16
1.3.2 Ekvivalentní tepelný obvod.....	17
1.4 Návrh chladicího systému	17
1.4.1 Objemový průtok.....	17
1.4.2 Rozměry chladicích kanálů.....	18
2 Literární řešerše v oblasti techniky chlazení	19
3 ANSYS.....	21
3.1 ANSYS Motor-CAD	21
3.1.1 Výpočetní model.....	21
3.1.2 Typy motoru	22
3.1.3 Typy chlazení	23
4 Praktická část.....	25
4.1 Zadání.....	25
4.2 Elektromagnetický návrh	25
4.2.1 Vinutí.....	28
4.2.2 Materiály.....	28

4.2.3	Ztráty	31
4.3	Návrh chladicího systému	32
4.3.1	Objemový průtok.....	32
4.3.2	Rozměry chladicích kanálů.....	33
4.4	Simulace	34
4.4.1	Momentová a výkonová křivka	34
4.4.2	Ustálený stav.....	37
4.4.3	Transientní simulace.....	42
Závěr	48
Literatura	50
Příloha A	Zadané vstupní hodnoty v modulu E-magnetic.....	51
Příloha B	Zadané vstupní hodnoty v modulu Thermal.....	60
Příloha C	Zadané vstupní hodnoty v modulu Lab.....	99

Úvod

Elektrické pohony a jejich aplikace se neustále vyvíjejí. Pro novou aplikaci je možné vybrat řadový motor tak, aby splňoval zadaná kritéria nebo je možné nový motor vyvinout. Vývoj nového motoru je záležitost drahá i časově náročná a vyplatí se v případě, že se očekává veliké množství vyrobených kusů nebo je aplikace natolik specifická, že použití řadového motoru není možné. Vývoj motoru se skládá z elektromagnetického, tepelného a mechanického návrhu. Všechny tři návrhy hrají zásadní roli ve správné funkčnosti a garantované životnosti stroje. Tato práce bude zaměřena na část tepelného návrhu.

Způsoby, jakými jsou tepelné výpočty řešeny, se časem vyvíjely. Dnes jsou velikou výhodou výkonné počítače, které tyto výpočty usnadňují, urychlují a otevírají nové možnosti. Teoretické principy, které jsou založeny na fyzikálních základech, zůstávají stejné a při práci s moderními softwary je dobré je dostatečně znát a orientovat se v nich, aby bylo možné výsledkům důvěřovat a chápat, co znamenají. V první části této práce budou představeny teoretické znalosti v oblasti ztrát elektrického stroje a odvodu ztrátového tepla, možnosti tepelného výpočtu a typy chlazení.

V praktické části bude proveden tepelný návrh trakčního motoru pro využití v bateriovém elektromobilu, který byl navržen podle daných specifikací. Úvodem této kapitoly bude literární rešerše techniky v oboru systému chlazení motorů této specializace, následovat bude seznámení s vývojovým prostředím ANSYS, a především s modulem Motor-CAD, ve kterém bude samotný návrh proveden. Vytvořený model bude prověřen simulacemi ustáleného stavu a přechodových jevů. Závěrem budou vyhodnocena data získaná pomocí simulací.

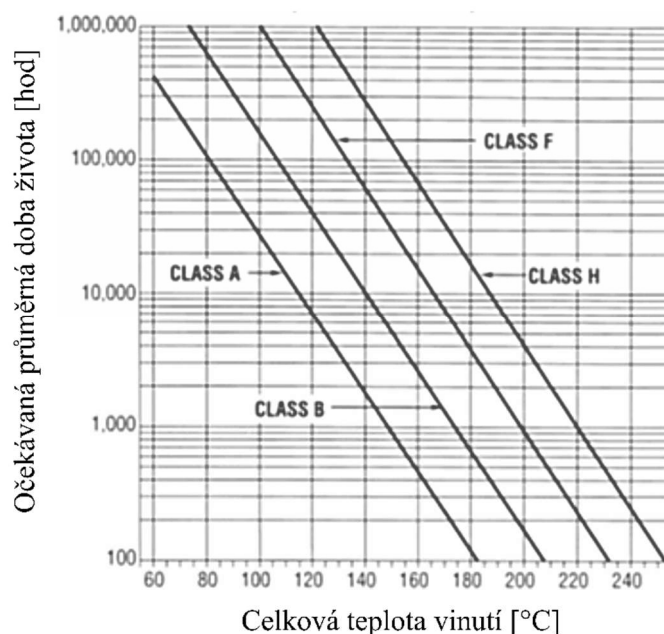
1 Teoretická část

Kritická místa tepleného návrhu stroje s permanentními magnety jsou izolace vinutí a permanentní magnety. Maximální povolená teplota vinutí je dána tepelnou třídou izolace. Při překračování dané teploty dochází ke snížení životnosti nebo v horším případě zničení izolace, a tedy celého stroje. Třída izolace je dána použitými materiály a má stanovenou mezní teplotu (Tab. 1.1).

Třída izolace	Y	A	E	B	F	H	C
Mezní teplota [°C]	90	105	120	130	155	180	nad 180

Tab. 1.1 - Tepelné třídy izolace

Očekávaná životnost stroje je závislá na teplotě vinutí [2]. Pro různé tepelné třídy (class) je tato závislost zobrazena na Obr. 1.1.



Obr. 1.1 – Vliv teploty vinutí na životnost stroje [2]

U permanentních magnetů může vlivem teploty dojít k nevratné demagnetizaci. K tomu dochází při překročení limitní velikosti magnetické indukce ve směru magnetizace. Ta je dána BH charakteristikami, které definují vlastnosti magnetů.

1.1 Ztráty

Přeměna elektrické energie uložené v baterii v mechanickou energii je doprovázena ztrátami, tedy přeměnou energie ve ztrátové teplo. Pro tepelný výpočet elektrického stroje je nutné znát ztráty, které v něm vznikají, stroj oteplují a je nutné je za pomoci chlazení odvést. Důležitá je jejich velikost,

kde vznikají a na čem jsou závislé. Podle základního rozdělení se rozeznávají ztráty ve vinutí, v železe a mechanické.

1.1.1 Ztráty ve vinutí

Jedná se o ztráty vznikající průchodem elektrického proudu vodičem, někdy se nazývají Joulovy nebo ztráty v mědi. Jejich velikost závisí na druhé mocnině protékajícího proudu a odporu vinutí, který je dále závislý na teplotě a skin efektu, případně proximity efektu, tyto jevy jsou dále zahrnuty v pojmu střídavý odpor. Skin efekt je vytlačování proudové hustoty k okraji vodiče vlivem střídavého proudu a proximity efekt je vliv blízkosti, který se projevuje v drážkách, kdy na sebe působí jednotlivé vodiče:

$$P_j = R_{AC,\theta} * I_f^2 * N_f, \quad (1.1)$$

- P_j jsou Joulovy ztráty ve vinutí [W],
- $R_{AC,\theta}$ je střídavý odpor přepočítaný na teplotu vodiče [Ω],
- I_f je efektivní hodnota proudu [A],
- N_f je počet fází [-].

1.1.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe, tedy v magnetickém obvodu statoru a rotoru, je možné dělit na hysterezní a vířivé:

$$P_{Fe} = P_{Hy} + P_V, \quad (1.2)$$

- P_{Fe} jsou ztráty v železe [W],
- P_{Hy} jsou hysterezní ztráty [W],
- P_V jsou ztráty vířivými proudy [W].

Hysterezní ztráty jsou úměrné frekvenci a velikosti hysterezní smyčky, která je dána materiálovými vlastnostmi a odpovídají hysterezní energii akumulované v jednotce objemu feromagnetika [1]:

$$P_{Hy} = w_{Hy} V_{Fe} f, \quad (1.3)$$

- w_{Hy} je plocha hysterezní smyčky [J/m^3],
- V_{Fe} je objem feromagnetika [m^3],
- f je frekvence magnetické indukce [Hz].

Ztráty vířivými proudy jsou úměrné druhé mocnině frekvence a maximální hodnoty magnetické indukce. Zásadní vliv na velikost těchto ztrát má tloušťka plechů a jejich odpor [1]:

$$P_V = \frac{V_{Fe} \pi^2 f^2 d^2 B_m^2}{6 \rho}, \quad (1.4)$$

- d je tloušťka plechů [m],
- B_m je maximální hodnota magnetické indukce [T],
- ρ je měrný elektrický odpor plechů [Ω m].

1.1.3 Mechanické ztráty

Mezi neelektrické ztráty v točivých strojích se řadí ztráty mechanické, které je možné rozdělit na ztráty třením v ložiscích a ventilační. Ztráty třením jsou závislé na rychlosti otáčení hřídele, typu ložisek, vlastnostech maziva a zátěži na ložiscích. Velikost ztrát třením je možné vypočítat analyticky podle [1]:

$$P_{\rho, \text{bearing}} = 0,5 \Omega \mu F D_{\text{bearing}}, \quad (1.5)$$

- $P_{\rho, \text{bearing}}$ jsou třecí ztráty v ložiscích [W],
- Ω úhlová rychlost hřídele [rad^{-1}],
- F zátěž ložisek [N],
- D_{bearing} vnitřní průměr ložisek [m].

Ventilační ztráty jsou způsobeny aerodynamickým odporem rotujících částí stroje a rostou s třetí mocninou otáčivé rychlosti. Při modelových výpočtech lze rotor v části vzduchové mezery uvažovat jako rotující válec v uzavřeném prostoru a dle [1] je ztráty možné vypočítat následovně:

$$P_{\rho w1} = \frac{1}{32} k C_M \pi \rho \Omega^3 D_r^4 l_r, \quad (1.6)$$

- k je koeficient drsnosti povrchu [-],
- C_M empirický koeficient, závislý na Couette Reynoldsovo čísla velikosti vzduchové mezery a vnějším průměru rotoru [-],
- ρ hustota chladiva [kg/m^3],
- Ω úhlová rychlost [rad^{-1}],
- D_r vnější průměr rotoru [m],
- l_r délka rotoru [m].

Čela vinutí rotoru způsobují také ztráty a je možné je modelovat jako rotující disk ve volném prostoru a odpovídající ztráty jsou potom rovné dle [1]:

$$P_{\rho w2} = \frac{1}{64} C_M \rho \Omega^3 (D_r^5 - D_n^5), \quad (1.7)$$

- D_r je vnější průměr rotoru [m],
- D_n je průměr hřídele [m].

Výsledné mechanické ztráty jsou dány součtem rovnic (1.5), (1.6) a (1.7):

$$P_\rho = P_{\rho, \text{bearing}} + P_{\rho w1} + P_{\rho w2}. \quad (1.8)$$

1.2 Odvod ztrátového tepla

Ztráty vzniklé ve stroji je pro udržení dovoleného oteplení potřeba ze stroje odvádět. V případě, že ztrátový výkon je stejně velký jako tepelný tok odvádějící teplo, nastává ustálení teploty. Jestliže chladicí systém odvádí více tepla, dochází k ochlazování, v opačném případě, kdy ve stroji vznikají větší ztráty než je chladicí systém schopný odvést, se stroj otepluje. Existují tři druhy odvodu tepla a to vedení, proudění a sálání. Pro různé části stroje a různé typy chlazení se uplatňují rozdílné mechanismy odvodu tepla.

1.2.1 Vedení

Vedení tepla se uplatňuje uvnitř pevných látek. Zásadní problém je skutečnost, že dobrý elektrický vodič je i dobrý tepelný vodič a naopak. V technické praxi by byl výhodný materiál, který by byl izolant s dobrou tepelnou vodivostí. Odborníci na materiály se snaží takový materiál vyvinout nebo upravit používané materiály tak, aby tepelnou vodivost měli nejlepší. Taková úprava může být například impregnace, nejlépe vakuová. Je známo, že vzduch je tepelný izolant, dokonce jeden z nejlepších, a proto je pro zvýšení tepelné vodivosti výhodné ho v co největší míře vyčerpat, případně vzduchové prostory vyplnit vhodným materiálem. To se taky nazývá „potting“ (z angličtiny: vyplňování). To je například možné využít v oblastech čel vinutí. Tato oblast se vyplní vhodným materiálem, který zlepší odvod

ztrátového tepla z této oblasti vinutí přímo do pláště, a tedy chladicího obvodu. Tímto je možné snížit teplotu v daném místě dle [2] o 6 – 8 %.

Tepelný tok předávaný vedením neboli kondukcí lze vyjádřit rovnicí (1.9). Je přímo úměrný tepelné vodivosti, která může být anizotropní, tedy rozdílná v různých směrech a závislá na teplotě, velikosti plochy, kterou tepelný výkon prochází a teplotnímu gradientu [1].

$$\overline{\phi_{th}} = -\lambda S \nabla T, \quad (1.9)$$

- $\overline{\phi_{th}}$ je tepelný tok [W],
- λ tepelná vodivost [W/m K],
- S plocha, kterou tepelný výkon prochází [m²],
- ∇T gradient teploty [K/m].

V případě výpočtu tepelného toku v jednom směru je možné na místo gradientu teploty počítat s derivací v daném směru a pro prvek s danou plochou a délkou je možné vyjádřit:

$$\phi_{th} = -\lambda S \frac{dT}{dx} \approx -\lambda S \frac{\Delta T}{l}, \quad (1.10)$$

- ΔT je rozdíl teploty na začátku a na konci prvku [K],
- l délka prvku [m].

V analogii s elektrickým odporem, který je dán podílem rozdílu napětí a proudu, je možné stanovit tepelný odpor jako podíl rozdílu teploty a tepelného toku [1]:

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\phi_{th}} = \frac{l}{\lambda S}, \quad (1.11)$$

- R_{th} je tepelný odpor [K/W].

1.2.2 Proudění

Odvod tepla prouděním neboli konvekcí probíhá pomocí tekutin (plynů a kapalin). V elektrických strojích obvykle přestupuje teplo z teplejšího povrchu pevného materiálu do tekutého chladicího média s nižší teplotou a tím probíhá ochlazování stroje.

Konvekci je možné dělit na volnou a nucenou. K volné konvekci dochází pomocí vztlakové síly při změně hustoty v závislosti na teplotě. Nucená konvekce je způsobená vnějšími silami například od ventilátoru nebo pumpy. Výsledná hodnota je dána součtem třetích mocnin obou konvekci [2]:

$$\alpha_{th}^3 = \alpha_{th,volná}^3 + \alpha_{th,nucená}^3, \quad (1.12)$$

Koeficient přestupu tepla lze popsat pomocí čtyř bezrozměrných parametrů, Nusseltovým číslem, Reynoldsovým číslem, Prandtlovým číslem a Grashofovým číslem. Tato čísla jsou funkcemi vlastností tekutiny, rozměrů, rychlosti tekutiny u nucené konvekce, teploty a gravitace u volné konvekce [2].

Pomocí Nusseltova čísla lze vyjádřit koeficient přestupu tepla. Toto číslo vyjadřuje efektivnost odvodu tepla proudění v porovnání s vedením [1].

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \quad (1.13)$$

- Nu je Nusseltovo číslo [-],
- α koeficient přestupu tepla [$W/m^2 K$],
- L charakteristická délka povrchu [m],
- λ tepelná vodivost chladiva [$W/K m$].

Reynoldsovo číslo vyjadřuje poměr mezi setrvačnými a viskózními silami. Podle jeho velikosti lze stanovit, zda se jedná o laminární nebo turbulentní proudění [1].

$$Re = \frac{vL}{\nu}, \quad (1.14)$$

- Re je Reynoldsovo číslo [-],
- v rychlost proudění tekutiny [m/s],
- L charakteristická délka povrchu [m],
- ν kinematická viskozita [m^2/s].

Prandtlovo číslo udává vztah mezi přestupem tepla konvekci a kondukcí v tekutině.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}, \quad (1.15)$$

- Pr je Prandtlovo číslo [-],
- c_p měrná tepelná kapacita [$J/kg K$],
- μ dynamická viskozita [$kg/s m$],
- λ tepelná vodivost chladiva [$W/K m$].

Grashofovo číslo udává poměr mezi vztlakovou a viskózní silou, které působí na tekutinu.

$$\text{Gr} = \frac{\beta g \theta \rho^2 L^3}{\mu^2}, \quad (1.16)$$

- Gr je Grashofovo číslo [-],
- β koeficient kubické expanze [1/K],
- g tíhové zrychlení [m/s^2],
- θ teplota mezi povrchem a chladičem [K],
- ρ hustota chladiva [kg/m^3],

Z koeficientu přestupu tepla se vypočítá měrný tepelný tok a podobně jako u vedení tepelný odpor reprezentující přestup tepla konvekcí.

$$q_{\text{th}} = \frac{\phi_{\text{th}}}{S} = \alpha_{\text{th}} \Delta T, \quad (1.17)$$

$$R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{\phi_{\text{th}}} = \frac{1}{\alpha_{\text{th}} S}. \quad (1.18)$$

1.2.3 Sálání

Sálání (radiace) je přenos tepla pomocí elektromagnetických vln. Teplejší těleso vyzařuje energii do svého okolí, ve kterém tuto energii absorbují chladnější tělesa. Na rozdíl od vedení a proudění může probíhat ve vakuu, takže není potřeba žádné médium. Je závislé na rozdílu teplot, barvě povrchu, a tedy na jeho vlastnostech určující rozdělení absorbované, odražené a propuštěné energie a velikosti plochy vyzařujícího tělesa. Koeficient přestupu tepla sáláním je možné vyjádřit ze Stefan-Boltzmannova zákona rovnicí [2]:

$$h_R = \frac{\varepsilon \sigma_{\text{SB}} F_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2}, \quad (1.19)$$

- h_R je koeficient přestupu tepla sáláním [$\text{W/m}^2 \text{K}$],
- ε emisivita povrchu [-],
- σ_{SB} Stefan-Boltzmannova konstanta [$\text{W/m}^2/\text{K}^4$],
- F_{1-2} faktor zobrazení [-],
- T_1 termodynamická teplota vyzařujícího povrchu [K],

- T_2 termodynamická teplota absorbujícího povrchu [K].

Tepelný odpor respektující přestup tepla sáláním je dán vztahem:

$$R_{th} = \frac{1}{h_{RS}}. \quad (1.20)$$

1.3 Tepelný výpočet

Tepelný výpočet může být proveden dvěma způsoby. První způsob je metoda CFD (Computational Fluid Dynamics; výpočetní dynamika tekutin), která aplikuje metodu konečných prvků (FEM). Druhá je metoda ekvivalentního tepelného obvodu. Metodou CFD lze dosáhnout veliké přesnosti, ale vyžaduje veliké zkušenosti v této oblasti při zadávání parametrů tekutiny, okrajových podmínek simulace a vytváření výpočetní sítě. Také je značně výpočetně náročná. Metoda ekvivalentního tepelného obvodu dává méně přesné výsledky, ale je více intuitivní. Jelikož se jedná o analytickou metodu, výpočet trvá řádově kratší dobu.

1.3.1 CFD

Tato metoda se využívá k numerickému řešení problémů, které obsahují proudění tekutin (kapaliny, plyny). Výpočtem se provádí simulace volného proudění tekutiny a její interakce s povrchy. S dostatečným výkonem počítače je možné řešit složité problémy například v oblasti aerodynamiky, letecké analýzy, simulace počasí a přenosu tepla, což je právě oblast, kterou se tato práce zabývá.

V [3] je pomocí softwaru ANSYS Fluent simulováno proudění vzduchu a rozložení teplot v synchronním generátoru s permanentními magnety pro větrnou elektrárnu. Jsou porovnány tři různé rychlosti obtékání a vliv na maximální teplotu jednotlivých částí, rozložení teplot a rozdíl mezi nejteplejším a nejstudenějším bodem. Tímto způsobem je možná kontrola míst s nejvyšší teplotou tzv. hot spot bodů zejména v magnetech a izolaci vinutí. V [4] je porovnání různých výpočetních strategií a jejich vliv na výsledek a výpočetní čas u vodního generátoru. Metodou konečných prvků je v [5] vypočítáno rozložení teploty v lineárním synchronním stroji s permanentními magnety. V [6] je provedena simulace proudění vzduchu, který je určený pro chlazení generátoru, návrh ventilátoru a porovnání vypočítaného objemového průtoku, celkového tlaku a rozvržení rychlosti s experimentálně naměřenými hodnotami.

1.3.2 Ekvivalentní tepelný obvod

Na rozdíl od CFD je metoda ekvivalentního tepelného obvodu analytická, proto je mnohem méně náročná na výpočetní výkon a simulace trvají kratší dobu. Z toho důvodu je vhodná pro tepelný návrh, u kterého je nutná kontrola různých možností uspořádání chladicího okruhu, případně parametrická analýza pro optimalizaci návrhu. Při vytváření tepelného schématu je nutné provést mnohá zjednodušení a některé jevy zanedbat. Na těchto zjednodušeních a na tom, jak přesně jsou známy materiálové vlastnosti jednotlivých materiálů, jejich rozměry a další parametry, je závislá přesnost výpočtu.

Tepelné obvody vycházejí z analogie s elektrickými obvody. Tvoří je tepelné odpory mezi jednotlivými částmi stroje od zdroje tepla, což jsou v tomto případě elektrické ztráty, které jsou v obvodu jako zdroje tepelného toku, až po chladicí okruh a okolí. Stejně jako v elektrickém obvodu mezi dvěma body s rozdílným potenciálem protéká elektrický proud, který je nepřímo úměrný velikosti odporu mezi těmito body, tak v tepelném obvodu protéká tepelný tok mezi body s rozdílnou teplotou nepřímo úměrný tepelnému odporu. V Tab. 1.2 jsou porovnány veličiny tepelného a elektrického obvodu včetně jejich symbolů a jednotky.

Tepelný obvod	Symbol	Jednotka	Elektrický obvod	Symbol	Jednotka
Teplo	Q_{th}	J	Elektrický náboj	Q	C
Tepelný tok	Φ_{th}	W	Elektrický proud	I	A
Hustota tepelného toku	q_{th}	W/m ²	Proudová hustota	J	A/m ²
Teplota	T	K	Elektrické potenciál	V	V
Teplotní spád	ΔT	K	Napětí	U	V
Tepelná vodivost	λ	W/m K	Elektrická vodivost	σ	S/m = A/V m
Tepelný odpor	R_{th}	K/W	Elektrický odpor	R	$\Omega = V/A$
Tepelná vodivost	G_{th}	W/K	Elektrická vodivost	G	S = A/V
Tepelná kapacita	C_{th}	J/K	Kapacita	C	F = C/V

Tab. 1.2 – Analogie veličin tepelného a elektrického obvodu (přeloženo z [1])

1.4 Návrh chladicího systému

1.4.1 Objemový průtok

U vodního chlazení pláště rozhoduje o velikosti odvedeného ztrátového tepla objemový průtok chladicího média a jeho vlastnosti. Minimální objemový průtok se vypočítá podle [7]:

$$Q_{min} = \frac{\sum P_{loss}}{\rho_c C_{pc} \Delta T} \quad (1.21)$$

- Q_{min} je minimální objemový průtok [l/min],
- $\sum P_{loss}$ součet všech ztrát ve stroji [W],
- ρ_c hustota chladicího média [kg/m³],
- C_{pc} tepelná kapacita chladicího média [J/kg/K],
- ΔT dovolený teplotní spád [K].

1.4.2 Rozměry chladicích kanálů

Podle [8] je přestup tepla značně vyšší v případě, když je proudění média v turbulentní oblasti. To je dosaženo v případě, že Reynoldsovo číslo je vyšší než 4000, proto platí:

$$Re = \frac{v_{water} D_h}{\nu} = \frac{Q_{water} D_h}{A_{duct} \nu} \geq 4000, \quad (1.22)$$

- Re je Reynoldsovo číslo [-],
- v_{water} rychlost proudění chladiva [m/s]
- D_h hydraulický průměr [m],
- ν kinematická viskozita [m²/s],
- Q_{water} objemový průtok chladiva [m³/s],
- A_{duct} plocha kanálu kanálu [m²].

Z (1.22) lze stanovit kritérium pro výšku a šířku kanálu:

$$w_{water,ch} + h_{water,ch} < \frac{Q_{water}}{2000 \nu} \quad (1.23)$$

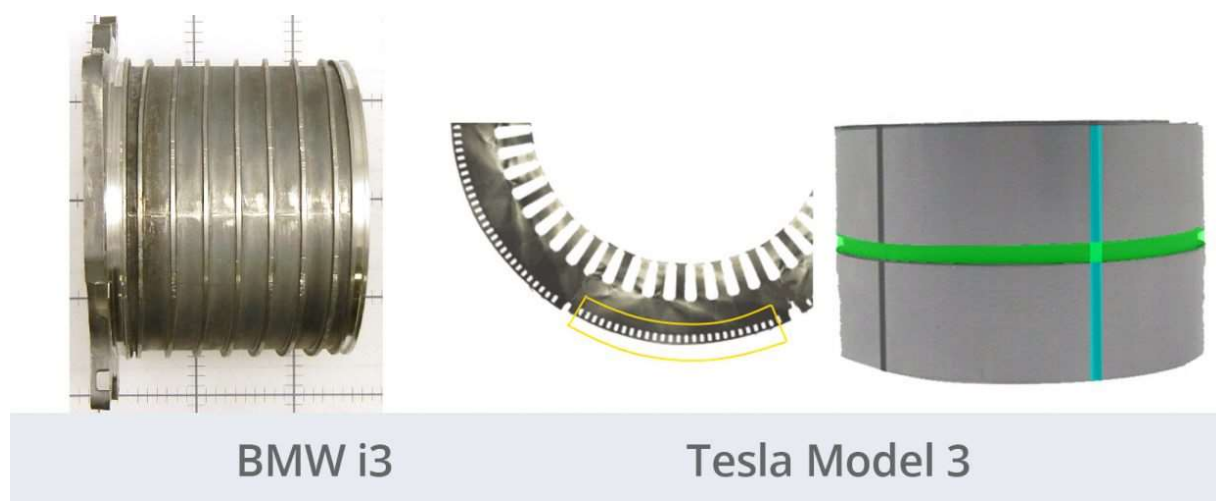
- $w_{water,ch}$ je šířka vodního kanálu [m],
- $h_{water,ch}$ je výška vodního kanálu [m].

2 Literární řešerše v oblasti techniky chlazení

Chladicí systémy v současných elektromobilech plní více účelů. Slouží k chlazení motoru, výkonové elektroniky, baterií a ztrátové teplo může být využito na zahřívání osobního prostoru vozidla nebo předehřívání akumulátorů na optimální teplotu. K tomu je zapotřebí propracovaný systém s tepelnými výměníky, odparníky, kondenzátory apod. Z důvodu stabilního odvodu tepla ze zahříváných částí a kompaktnosti se převážně využívá vodní chlazení.

Detailní informace o aktuálních řešeních této problematiky jsou těžko dostupné a výrobci je většinou uchovávají v tajnosti pro zachování vlastního know how. Částečně je možné získat informace z technických webů, které se na tuto problematiku zaměřují. Vědecké články přinášejí nová technická řešení, která mohou vést ke zvýšení efektivity chlazení nebo zlepšení jiných vlastností. Takové metody mohou být prověřeny teoreticky i prakticky, ale stále jsou dost vzdálené například od řadového využití v dostupných bateriových vozidlech.

V [9] je porovnání nových přístupů k chlazení, které využívají Tesla Model 3 a BMW i3. V BMW i3 má trakční motor dvoudílný plášť, který umožňuje chlazení velkými kanály plášť, který následně ochlazuje statorové plechy a celý motor. Tesla Model 3 má motor chlazený olejem, který protéká drážkami a kanály přímo ve svazku statorových plechů. Proto musí mít na svém plášti umístěn výměník chladicí kapaliny a oleje. BMW i3 má sice výrobně náročnější plášť, ale nepotřebuje tepelný výměník a tím se eliminují také ztráty způsobené přestupem tepla mezi oběma kapalinami. U konstrukce Tesla Model 3 je výhodou přímé chlazení statorových plechů, ale vyžaduje tepelný výměník a olejové čerpadlo.



Obr. 2.1 - Porovnání chladičového systému BMW i3 a Tesla Model 3 [9]

Nové přístupy chlazení hybridních elektrických vozidel (HEV) a bateriových elektrických vozidel (BEV) jsou zaznamenány v [10]. Pro chlazení statoru využívají vírové trubice (z angl., vortex tube) a porovnávají výsledky s vodním chlazením při otáčkách 3000 a 8000 ot/min. Výpočty jsou prováděny numerickými metodami v sw ANSYS Fluent. Výsledkem studie je, že vírové trubice mohou být levnou a efektivní cestou chlazení strojů. Při nízkých rychlostech je rozložení teploty ve vinutí stejné, ale teplota statoru může být až o 60 % nižší než u vodního chlazení [10].

Srovnávací studii moderních principů trakčních pohonů v elektrických vozidlech se zabývali v Oak Ridge National Laboratory [11] a na University of Sheffield [12]. Cílem bylo navrhnout trakční stroj s co největší účinností, bez využívání vzácných zemin s ohledem na pořizovací náklady a váhu stroje.

3 ANSYS

Vývojové prostředí ANSYS je mnohoúčelový software určený pro inženýrské simulace napříč obory. Do této skupiny patří desítky sw produktů s rozdílnou specializací a možností vzájemného propojení. Jedním z nich je ANSYS Electronics, který je vhodný na návrh a simulaci elektrických, elektronických a elektromagnetických součástí, zařízení a systémů. Pod tento software spadají moduly RMXprt, Maxwell 2D a 3D, Icepak a další.

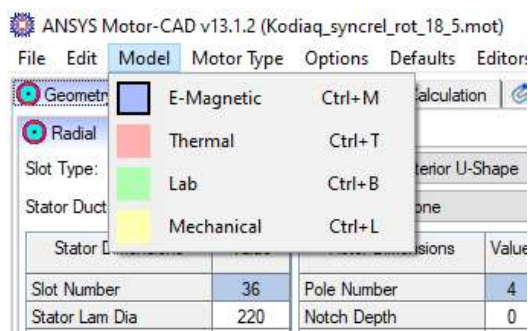
RMXprt (Rotational Machines expert) umožňuje provést analytický návrh základních točivých elektrických strojů na základě zadání geometrie stroje, materiálových vlastností aktivních materiálů, pohybového stavu a parametrů mechanické soustavy. Výsledkem návrhu jsou kromě tabelárně uvedených parametrů rovněž základní grafické charakteristiky a 2D resp. 3D modely pro MKP simulace např. v modulech Maxwell a Icepack.

3.1 ANSYS Motor-CAD

Nově společnost Ansys zakoupila rovněž sw modul Motor-CAD, který je určen kromě elektromagnetického a mechanického návrhu také na tepelný návrh elektrického motoru, resp. generátoru. Jedná se o komplexní nástroj, který byl navržen předními odborníky v oboru chlazení a je užíván řadou renomovaných firem. Program je založen na analytické metodě náhradního tepelného schématu a jeho hlavní předností jsou nízké nároky na výpočetní čas a kapacitu paměti. Jednou z největších komplikací metody náhradního tepelného schématu je nutnost znalosti potřebných koeficientů. Velikou výhodou tohoto softwaru je, že se v něm tyto koeficienty převážně počítají automaticky.

3.1.1 Výpočetní model

Motor-CAD obsahuje čtyři výpočetní modely: E-Magnetic, Thermal, Lab a Mechanical (Obr. 3.1). Tyto modely jsou vzájemně propojeny a nastavené vlastnosti navrhovaného stroje jsou mezi sebou převáděny. Tak je možné operativně přecházet na jednotlivé modely, provádět návrh a ověřovat stroj ve všech čtyřech oblastech viz Obr. 3.1.



Obr. 3.1 - Výběr výpočetního modelu

E-magnetic slouží k výpočtu elektromagnetických vlastností stroje pomocí metody konečných prvků (FEM) a analytické metody. Je zde prováděn návrh geometrie statoru a rotoru, návrh vinutí, nastavení použitých materiálů a dalších vlastností.

Thermal využívá 3-dimenzionální tepelný obvod se soustředěnými prvky k výpočtům ustáleného stavu a přechodových jevů.

Lab je kombinací E-magnetic a Thermal umožňuje provádět další výpočty, které usnadňují návrh a optimalizaci stroje.

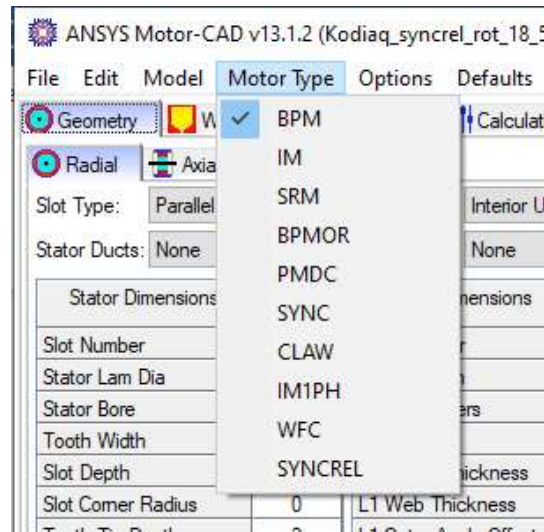
Mechanical umožňuje stanovit namáhání rotoru metodou konečných prvků odstředivými silami.

3.1.2 Typy motoru

Sw prostředí Motor-CAD podporuje návrh 10 typů motoru (Obr. 3.2):

- BPM (brushless permanent magnet motors) – návrh bezkartáčového motoru s permanentními magnety s vnitřním i vnějším rotorem,
- IM (induction machines) – návrh asynchronního stroje,
- SRM (switched reluctance motors) – návrh spínaného reluktančního motoru s vnitřním rotorem,
- BPMOR (outer rotor brushless permanent magnet motors) – tepelný návrh bezkartáčového motoru s permanentními magnety s vnějším rotorem,
- PMDC (permanent magnet dc commutator motors) – návrh stejnosměrného motoru s permanentními magnety,
- SYNC (synchronous machines) – návrh synchronního stroje,
- CLAW (claw pole machines) – tepelný návrh,
- IM1PH (single-phase induction machines) – návrh jednofázového asynchronního stroje,
- WFC (wound field commutator machines),

- SYNCREL (synchronous reluctance motors) – návrh synchronního reluktančního motoru s vnitřním rotorem.



Obr. 3.2 - Výběr typu motoru

3.1.3 Typy chlazení

V sw prostředí Motor-CAD existuje velké množství různých typů chlazení. Je možné je dělit podle:

- chladicího média,
- způsobu jak je k chlazené části médium přiváděno,
- části stroje, která je chlazená,
- toho, jestli jsou chlazeny přímo místa, kde ztráty vznikají nebo je teplo odváděno do pláště.

V případě využití vzduchu jako chladiva se dělí chlazení na vlastní a nucené, jak je popsáno v kapitole 1.2.2. U nuceného chlazení je pomocí ventilátoru možné přivádět vzduch na plášť nebo prohánět skrz stroj. V případě chlazení pláště vzduchem jsou součástí pláště žebra, která umožňují odvést větší množství ztrátového tepla konvekci. Počet žeber, jejich rozměry, nasměrování v axiální nebo v radiálním směru je vhodné pomocí analytických i numerických metod optimalizovat pro maximalizaci odvedeného tepla. Ventilátor může být montován na hřídeli stroje nebo mít vlastní pohon.

Pro vnitřní chlazení stroje se běžně využívá vzduch, ale je možné použít jiné tekutiny. Médium je možné vhánět dovnitř nebo vnitřní prostor vyčerpávat. Výhoda druhé možnosti je rovnoměrnější proudění média uvnitř stroje a menší možnost zanášení slepých částí případnými nečistotami. Chladivo prochází chladicími kanály ve statoru a rotoru a vzduchovou mezerou.

Výrazně lepší vlastnosti pro odvod tepla mají kapaliny. Například se často používá voda v kombinaci s glykolem nebo vhodné oleje. Vodní chlazení je realizováno prostřednictvím kanálů, které mohou být rozvedeny v plášti stroje, ale také přímo v drážkách statoru případně rotoru, hřídeli nebo v magnetickém obvodu stroje.

4 Praktická část

4.1 Zadání

Tepelný návrh bude proveden na elektrickém motoru/generátoru určeném pro aplikaci v elektrickém vozidle typu SUV s aerodynamickými vlastnostmi odpovídající vozidlu Škoda Kodiaq (Tab. 4.1). Poháněna je zadní osa s jednostupňovou převodovkou, hmotnost vozidla je 2000 kg. Požadována je maximální rychlost 180 km/h a zrychlení z 0 na 100 km/h za 8,1 s. Typ motoru je synchronní s permanentními magnety o rozměrech: průměr 270 mm x délka 220 mm včetně chlazení a obálky. Napětí soustavy je stanoveno na 400 V.

Hmotnost [kg]	2000
Koeficient valivého odporu [-]	0,015
Čelní plocha [m ²]	2,76
Koeficient aerodynamického odporu [-]	0,33
Poloměr kola [m]	0,3
Součinitel vlivu rotačních částí [-]	1,1

Tab. 4.1 – Aerodynamické vlastnosti vozidla

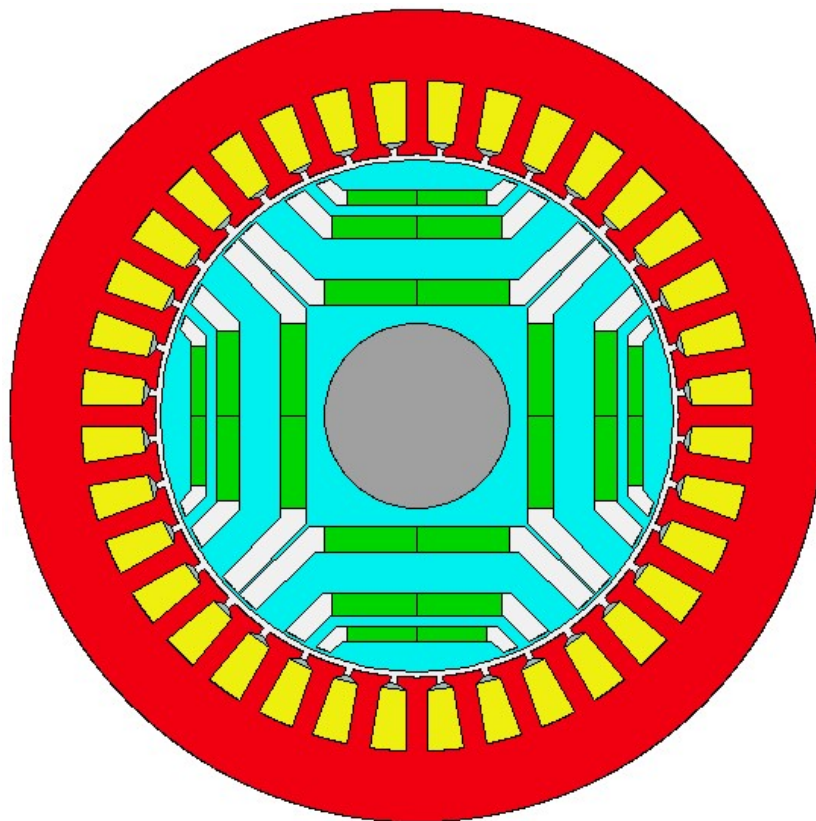
4.2 Elektromagnetický návrh

Návrhu systému chlazení stroje nutně předchází návrh elektromagnetický. V daném případě bylo na základě požadovaných jízdních vlastností zadaného vozidla nejprve provedeno stanovení jmenovitého a špičkového výkonu. Jmenovitý výkon byl vypočítán podle požadavku na maximální rychlost vozidla a výkon špičkový podle stanoveného zrychlení z 0 na 100 km/h. Z převodového poměru jednostupňové převodovky a poloměru kola byly určeny maximální a jmenovité otáčky stroje.

P_{\max} – špičkový výkon [kW]	163
P_n – jmenovitý výkon [kW]	102
i – převodový poměr	8:1
n_{\max} – maximální otáčky [km/h]	12000
n_n – jmenovité otáčky [km/h]	4000
m_f – počet fází	3

Tab. 4.2 - Parametry pro elektromagnetický návrh

Prvotní elektromagnetický návrh byl proveden dle [1], kde byly stanoveny hlavní rozměry stroje, navrženo satorové vinutí, rozměry zubů, jha a satorových drážek a geometrie rotoru. Na Obr. 4.1 je zobrazena výsledná geometrie stroje včetně pláště a v Tab. 4.3 jsou uvedeny základní parametry a rozměry aktivních částí v radiálním řezu.

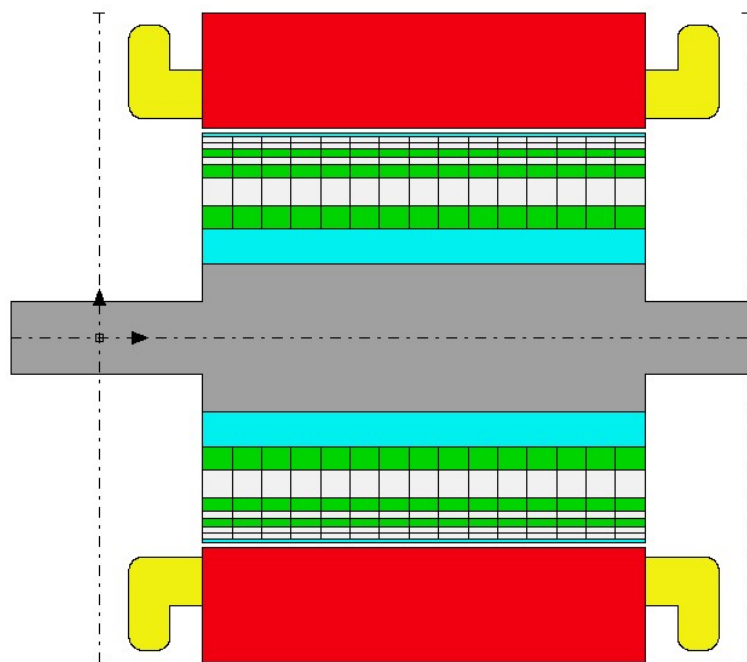


Obr. 4.1 – Geometrie stroje v radiálním řezu

Vnější průměr satoru [mm]	220
Vnitřní průměr satoru [mm]	141,6
Vnější průměr rotoru [mm]	140
Průměr hřídele [mm]	50
Šířka vzduchové mezery [mm]	1,6
Počet drážek	36
Počet pólů	4
Typ rotoru	Interior U-Shape (Vnitřní tvaru U)

Tab. 4.3 - Základní rozměry stroje v radiálním řezu

Geometrie stroje v axiálním řezu je na Obr. 4.2 a základní rozměry v Tab. 4.4. Délka satorového a rotorového paketu je stejná, právě tak celková délka magnetů, které jsou rozděleny do 15 segmentů.

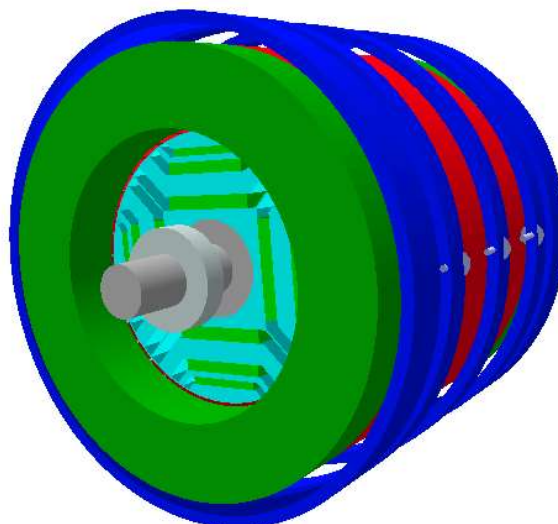


Obr. 4.2 - Geometrie stroje v axiálním řezu

Délka statorového paketu [mm]	220
Délka rotorového paketu [mm]	220
Délka hřídele [mm]	300
Počet segmentů magnetu	15

Tab. 4.4 - Základní rozměry stroje v axiálním řezu

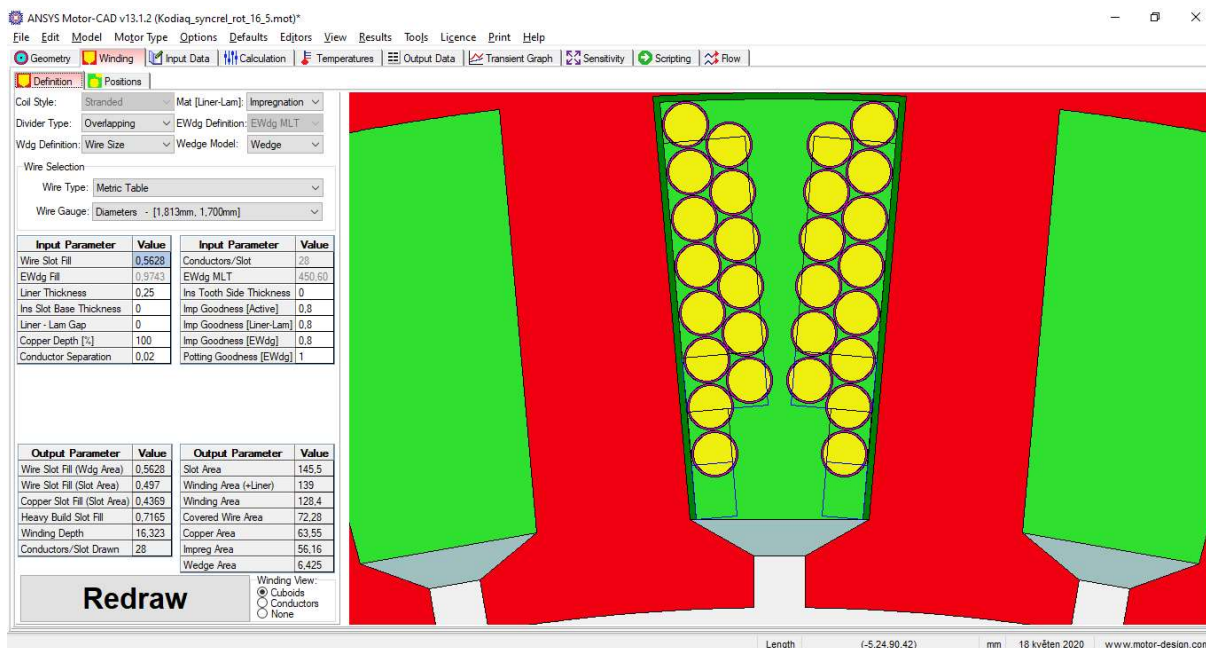
Další možností je zobrazení modelovaného stroje ve 3D (Obr. 4.3). 3D model lze ve vývojovém prostředí natáčet ve všech směrech a stanovit, které části budou viditelné. Na Obr. 4.3 lze vidět hřídel včetně ložisek, čela vinutí, magnety v drážkách statoru a kanály vodního chlazení.



Obr. 4.3 - Geometrie stroje ve 3D zobrazení

4.2.1 Vinutí

Rozložení a počet vodičů v drážce, jejich izolace a izolace drážky mají vliv na odvod tepla z této části a na bod s maximální teplotou. Vinutí stroje je jedno z kritických míst tepelného návrhu. V Motor-CADu je editor vinutí, kde je možné provést podrobné nastavení a ověřit činitel plnění drážky apod. (Obr. 4.4).



Obr. 4.4 - Rozhraní Motor-CAD pro návrh vinutí statoru (číselné údaje viz Příloha B Thermal – 3)

4.2.2 Materiály

Knihovny Motor-CAD obsahují rozsáhlé množství materiálů použitelných v návrhu elektrického stroje s definovanými elektromagnetickými i tepelnými vlastnostmi. V daném případě za materiály byly zvoleny: elektrovedná měď pro vinutí, pro magnetický obvod neorientované plechy typového označení JFE_35JNE230 a hliník pro plášť. Tepelné vlastnosti jsou zobrazeny na Obr. 4.5, mezi které patří měrná tepelná vodivost, měrné teplo, hustota a váha.

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiak_syncrel_rot.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

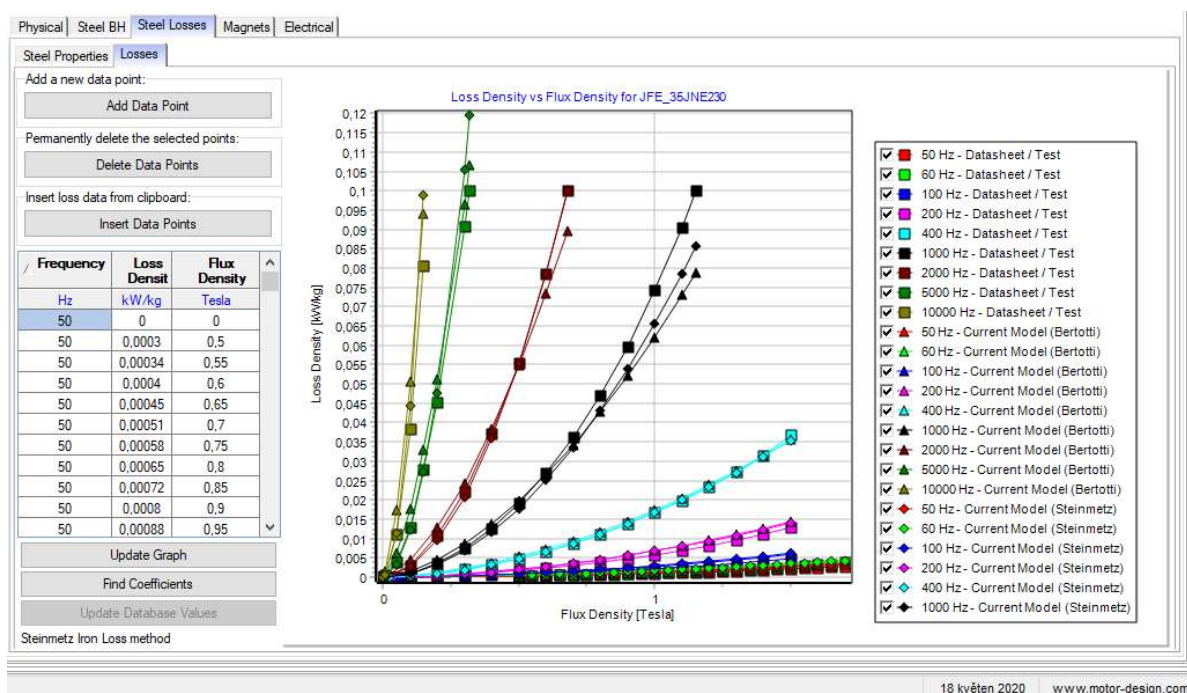
Component	Material from Database	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Weight Internal	Weight Multiplier	Weight Addition	Weight Total	Notes
Units		W/m ² /C	J/kg/C	kg/m ³	kg		kg	kg	
Housing [Active]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	6,969	1	0	6,969	
Housing [Front]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	1,162	1	0	1,162	
Housing [Rear]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	1,162	1	0	1,162	
Housing [Total]					9,292			9,292	
Endcap [Front]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	1,057	1	0	1,057	
Endcap [Rear]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	1,057	1	0	1,057	
Stator Lam (Back Iron)	JFE_35JNE230	30	450	7650	13,48	1	0	13,48	
Inter Lam (Back Iron)		0,02723	1007	1,127	6,143E-05	1	0	6,143E-05	
Stator Lam (Tooth)	JFE_35JNE230	30	450	7650	5,313	1	0	5,313	
Inter Lam (Tooth)		0,02723	1007	1,127	2,421E-05	1	0	2,421E-05	
Stator Lamination [Total]					18,8			18,8	
Amature Winding [Active]	Copper (Pure)	401	385	8933	3,066	1	0	3,066	
Amature EWdg [Front]	Copper (Pure)	401	385	8933	2,302	1	0	2,302	
Amature EWdg [Rear]	Copper (Pure)	401	385	8933	2,302	1	0	2,302	
Amature Winding [Total]					7,671			7,671	
Wire Ins. [Active]		0,21	1000	1400	0,066	1	0	0,066	
Wire Ins. [Front-End-Wdg]		0,21	1000	1400	0,04956	1	0	0,04956	
Wire Ins. [Rear-End-Wdg]		0,21	1000	1400	0,04956	1	0	0,04956	
Wire Ins. [Total]					0,1651			0,1651	
Impreg. [Active]		0,2	1700	1400	0,3397	1	0	0,3397	
Impreg. [Front-End-Wdg]		0,2	1700	1400	0,03209	1	0	0,03209	
Impreg. [Rear-End-Wdg]		0,2	1700	1400	0,03209	1	0	0,03209	
Impreg. [Total]					0,4038			0,4038	
Potting [Front Endcap]	LORD CoolThem EP-3500	3,5	733	2720	0,9985	1	0	0,9985	
Potting [Rear Endcap]	LORD CoolThem EP-3500	3,5	733	2720	0,9985	1	0	0,9985	
Slot Wedge		0,2	1200	1000	0,03469	1	0	0,03469	

Update materials from the Database Material Help

Housing [Active] 17 duben 2020 www.motor-design.com

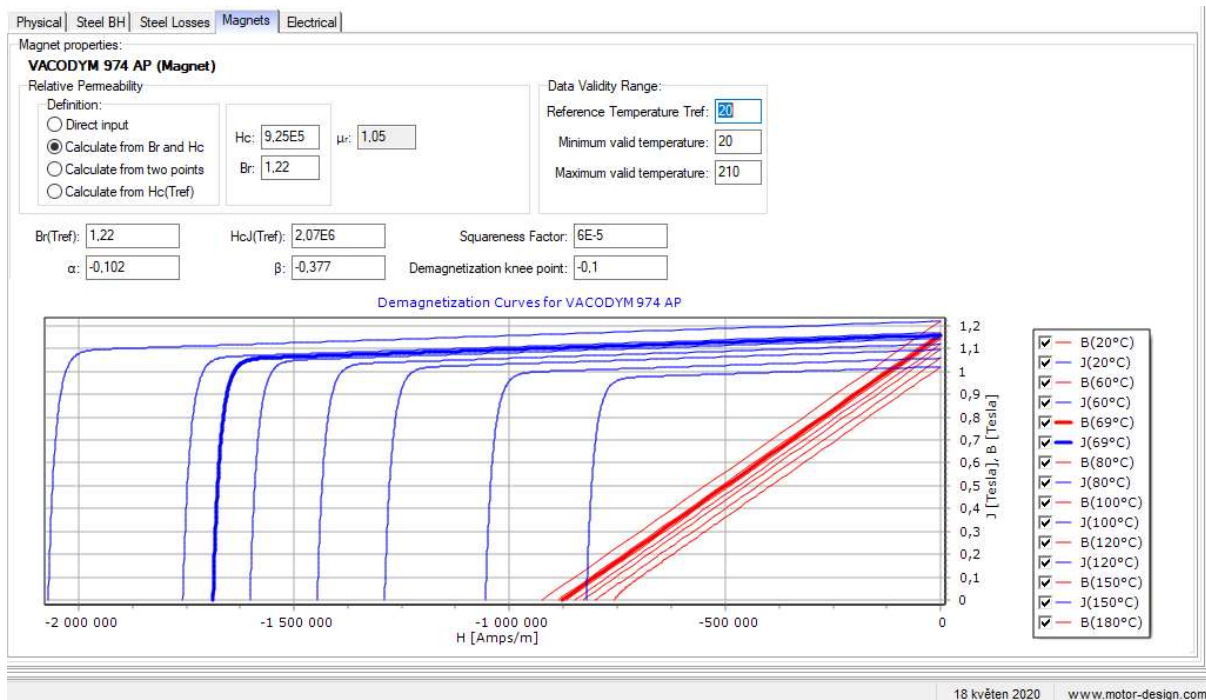
Obr. 4.5 - Použité materiály ve stroji (číselné údaje viz Příloha B Thermal – 8 – 10)

Velikost ztrát v magnetickém obvodu se vypočítá z charakteristik uvedených výrobcem, kde pro frekvence od 50 Hz do 10 kHz jsou vyneseny závislosti měrných ztrát na magnetické indukci (Obr. 4.6).



Obr. 4.6 - Vlastnosti použitých plechů magnetického obvodu

Pro permanentní magnety byly zvoleny NdFeB magnety typového označení Vacodym 974 AP, jejichž vlastnosti jsou charakterizovány pomocí BH křivek (Obr. 4.7).



Obr. 4.7 - Vlastnosti použitých magnetů

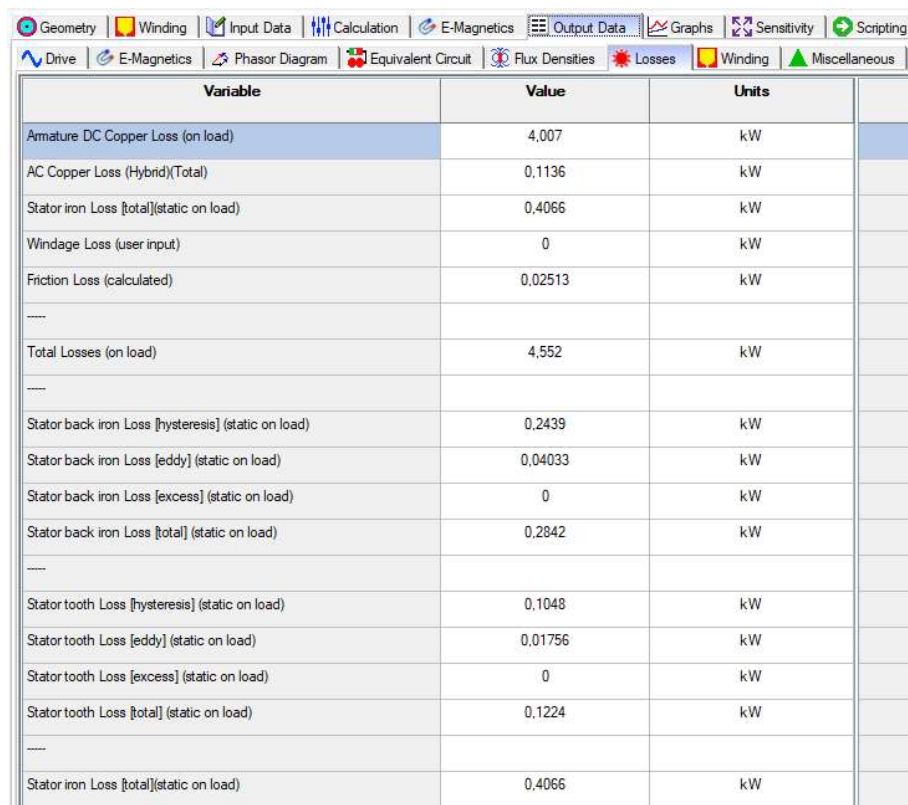
Pro výsledný tepelný odpor nejsou důležité jen tepelné odpory jednotlivých materiálů, ale také dokonalost provedení styčných ploch, resp. technologických mezer mezi nimi. Čím dokonalejší rozhraní, tím bude menší tepelný odpor. Software má přednastavené velikosti mezer založené na zkušenostech vývojářů, takže není potřeba nastavovat každý detail. Velikost jednotlivých mezer a vliv na tepelný odpor, respektive vodivosti, při teplotě 100 °C je zobrazena na Obr. 4.8.

Component	Gap	Interface Material	Thermal Conductivity	Details	Resistance @T=100,0°C	Conductance @T=100,0°C
Units	mm		W/m°C		m2.C/W	W/m2/C
Stator Lam - Housing	0,01	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Lamination-Metal - Good surface Contact	0,0003153	3172
Housing - OHang [F]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Housing - OHang [R]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Housing - Endcap [F]	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Housing - Endcap [R]	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Magnet - Rotor Lam	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Magnet - Magnet	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Rotor Lam - Shaft	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Bearing Effective Gap [F]	0,4	Air (Motor-CAD model)	0,03171	High Effective Gap [Torino Testing]	0,01261	79,3
Bearing Effective Gap [R]	0,4	Air (Motor-CAD model)	0,03171	High Effective Gap [Torino Testing]	0,01261	79,3
Bearing - Endcap [F]	0,0073	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Stainless-Aluminium - Medium surface Contact	0,0002302	4344
Bearing - Endcap [R]	0,0073	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Stainless-Aluminium - Medium surface Contact	0,0002302	4344
Bearing - Shaft [F]	0,0112	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Stainless-Stainless - Medium surface Contact	0,0003532	2831
Bearing - Shaft [R]	0,0112	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Stainless-Stainless - Medium surface Contact	0,0003532	2831
Potting-Housing [F]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Potting-Endcap [F]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Potting-Housing [R]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Potting-Endcap [R]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09

Obr. 4.8 - Nastavení rozhraní mezi jednotlivými částmi stroje

4.2.3 Ztráty

Výsledkem elektromagnetického návrhu jsou rovněž velikosti ztrát v jednotlivých částech aktivního obvodu stroje a pro definované statické zatížení, resp. v daném pracovním bodě (Obr. 4.9). Tyto ztráty je možné převést do tepelného výpočtu, kde slouží jako vstupní hodnoty.



Variable	Value	Units
Armature DC Copper Loss (on load)	4,007	kW
AC Copper Loss (Hybrid)(Total)	0,1136	kW
Stator iron Loss [total](static on load)	0,4066	kW
Windage Loss (user input)	0	kW
Friction Loss (calculated)	0,02513	kW

Total Losses (on load)	4,552	kW

Stator back iron Loss [hysteresis] (static on load)	0,2439	kW
Stator back iron Loss [eddy] (static on load)	0,04033	kW
Stator back iron Loss [excess] (static on load)	0	kW
Stator back iron Loss [total] (static on load)	0,2842	kW

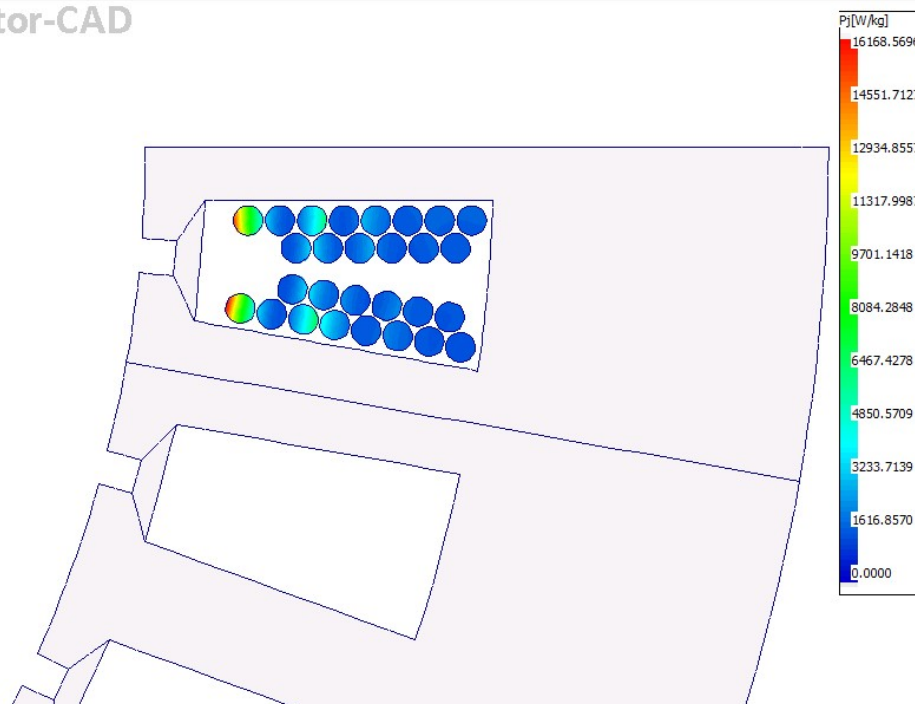
Stator tooth Loss [hysteresis] (static on load)	0,1048	kW
Stator tooth Loss [eddy] (static on load)	0,01756	kW
Stator tooth Loss [excess] (static on load)	0	kW
Stator tooth Loss [total] (static on load)	0,1224	kW

Stator iron Loss [total](static on load)	0,4066	kW

Obr. 4.9 - Vypočtené hodnoty ztrát stroje

4.2.3.1 AC loss

Metody, jakými se počítají ztráty ve vinutí, jsou tři. Nejméně přesná a výpočetně náročná je metoda DC, kdy se ztráty počítají pouze ze stejnosměrného proudu a je úplně zanedbán vliv proudu střídavého. Nejpřesnější je výpočet metodou konečných prvků, kde se v každé interakci vypočítá proudová hustota v jednotlivých vodičích, která vlivem vířivých proudů a vlivu blízkosti není rovnoměrná (Obr. 4.10). Jelikož je tato metoda výpočetně náročná, tak je k dispozici kombinovaná metoda, ta spočívá ve výpočtu na základě koeficientu, který se získá jako poměr ztrát stejnosměrným proudem a střídavým proudem (FEM). Kombinovaná metoda dosahuje dostatečně přesných výsledků a za krátký výpočetní čas.



Obr. 4.10 - Ztráty vířivými proudy ve vinutí statoru

Veškeré zadané vstupní hodnoty do sw Motor-CAD v E-magnetic modulu jsou v příloze A.

4.3 Návrh chladicího systému

4.3.1 Objemový průtok

Prvním krokem pro návrh chladicího systému je určení objemového průtoku chladiva pomocí rovnice (1.21). Odhadovaný jmenovitý ztrátový výkon stroje se v daném případě určil z potřebného výkonu pro maximální rychlost vozidla 180 km/h tj. 105 kW a účinnosti při otáčkách odpovídajících max. rychlosti tj. 95 %. V daném případě celkové ztráty činí 5,1 kW, které je nutné prostřednictvím chladicího systému ze stroje odvést.

Jako chladicí médium byla zvolena kapalina, typové označení EGW 50/50, směs etylenglykolu a vody běžně využívaná jako chladicí kapalina automobilů. Vlastnosti této kapaliny jsou uvedeny v Tab. 4.5. V této části návrhu je důležitá hustota a tepelná kapacita. Detailní vlastnosti kapaliny viz příloha B – 35 – 38)

Teplotní rozdíl chladiva na vstupu a výstupu systému byl stanoven na 9 °C. Z rovnice (1.21) je vypočítán objemový průtok 9,2 l/min.

Fluid Properties:

EGW 50/50

Thermal Conductivity: 0,399

Density: 1065

Cp: 3364

Kinematic Viscosity: 2,25E-6

Dynamic Viscosity: 0,002396

Pr - Prandtl Number: 20,2

Tab. 4.5 Vlastnosti kapaliny EGW 50/50

4.3.2 Rozměry chladicích kanálů

Dalším důležitým krokem návrhu chladicího systému je určení rozměrů chladicích kanálů. Na těchto rozměrech závisí, jakého typu bude proudění chladiva. V kapitole 1.4.2 bylo uvedeno, že je vhodné, aby proudění bylo v turbulentní oblasti. Šířka pláště je 25 mm a výška chladicího kanálu byla zvolena na 8 mm. V sw Ansys Motor-CAD je ze zadaných parametrů vypočítáno Reynoldsovo číslo a dále určeno, zdali se jedná o laminární ($0 < Re < 4000$), přechodné ($4000 < Re < 5000$) a turbulentní ($Re > 5000$). Proto je do rovnice (1.23) zadán požadavek na Reynoldsovo číslo $Re = 5000$, poté šířka kanálů vychází 41 mm. Na Obr. 4.11 jsou uvedeny vypočtené parametry proudění vodního chlazení a je ověřeno, že se jedná o turbulentní proudění. Dále jsou zde uvedeny veličiny jako rychlost chladiva, tlakový rozdíl, objemový průtok, délka potrubí a koeficienty potřebné pro další výpočty. Na Obr. 4.12 jsou uvedeny veličiny týkající se odvodu tepla vodním chlazením, mezi které patří Reynoldsovo číslo, aktivní plocha kanálů, koeficient přestupu tepla, náhradní teplotní odpor a další.

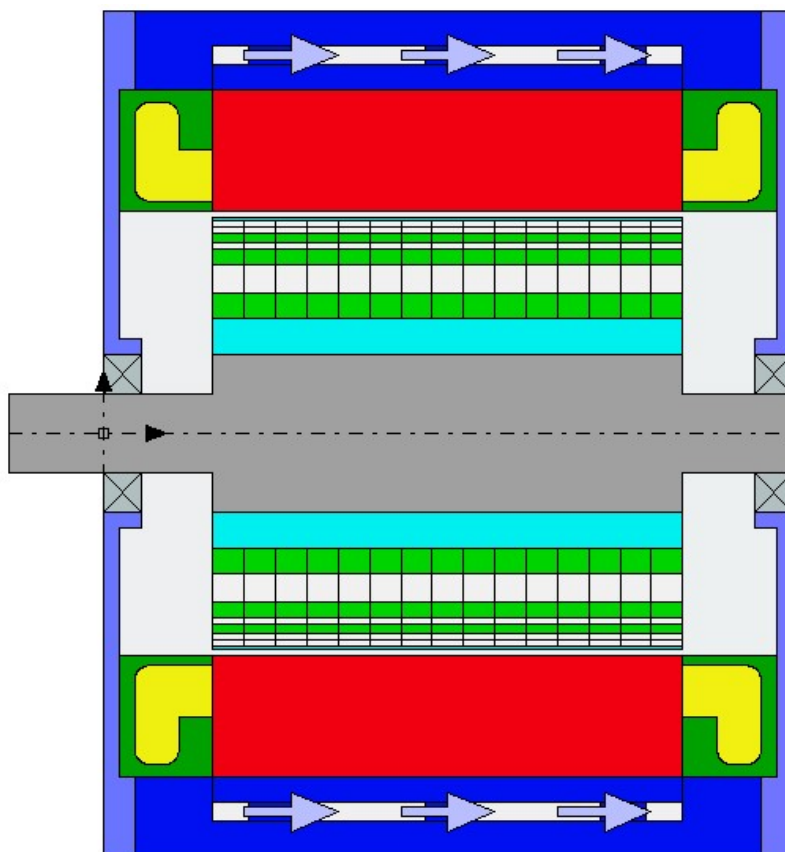
Flow Path Component	Flow Type	Cross Section Area Calculated	Cross Section Area Adjustment	Cross Section Area	Length Calculated	Length Adjustment	Length	k	R	Q	P	Velocity
Units		mm ²	mm ²	mm ²	mm	mm	mm		kg/m ³	l/min	Pa	m/s
Housing [Active]	Turbulent	246	0	246	2246,14	0	2246,14	8,181	7,106E10	9,2	1677	0,6246

Obr. 4.11 - Parametry proudění vodního chlazení

Component	Input h?	Convection Correlation	h[input] or h[adjust]	Local Velocity Multiplier	Local Fluid Velocity	Re Number	%Re(crit)	Surface Area	h	Rt
Units			W/m ² /°C	pu	m/s		%	mm ²	W/m ² /°C	°C/W
Housing [Active]	<input type="checkbox"/>	Channel Correlation [Turbulent]	1	1	0,6246	5010	217,8	2,111E05	1891	0,002505

Obr. 4.12 - Parametry odvodu tepla vodního chlazení

Výsledná geometrie včetně pláště je zobrazena na Obr. 4.13. Veškeré zadané vstupní hodnoty do sw Motor-CAD v Thermal modulu jsou v příloze B.



Obr. 4.13 - Geometrie stroje v axiálním řezu včetně pláště

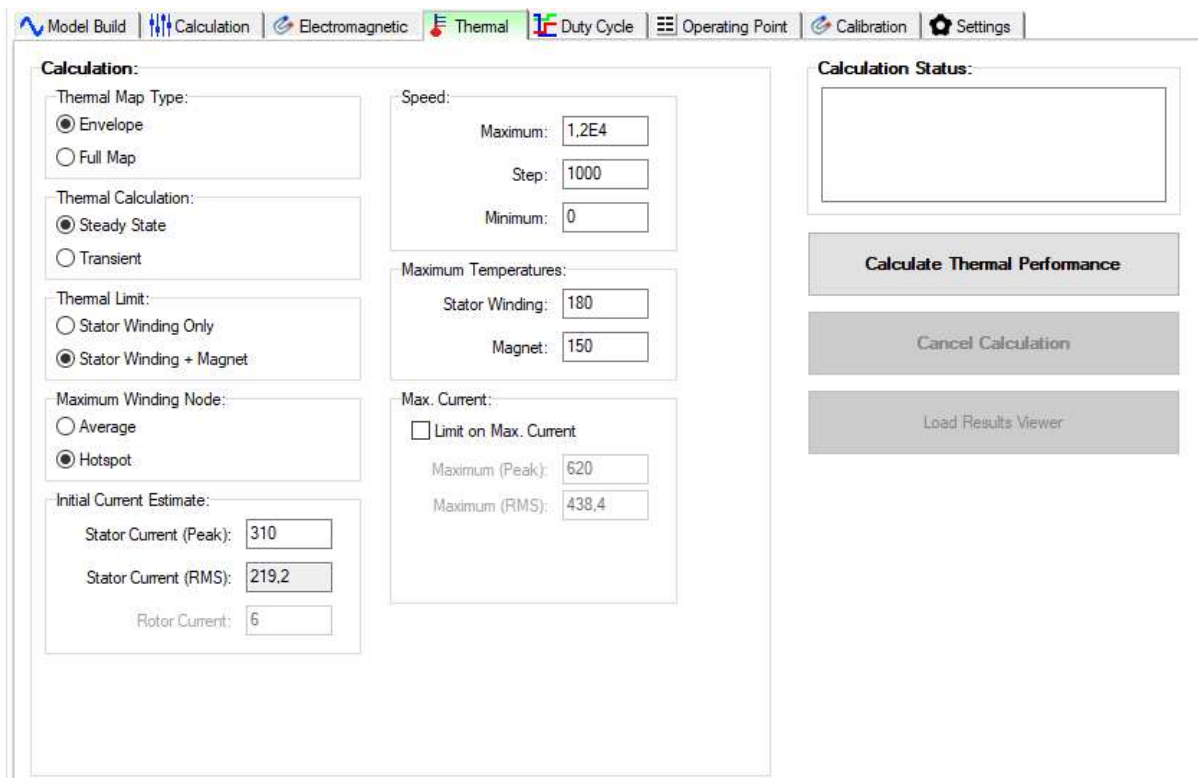
4.4 Simulace

Po ukončení elektromagnetického návrhu a návrhu chladicího systému stroje je možné v sw prostředí Motor-CAD vygenerovat 3D resp. 2D geometrické modely a provést simulace chování stroje jak ve stacionárních tak přechodných režimech.

4.4.1 Momentová a výkonová křivka

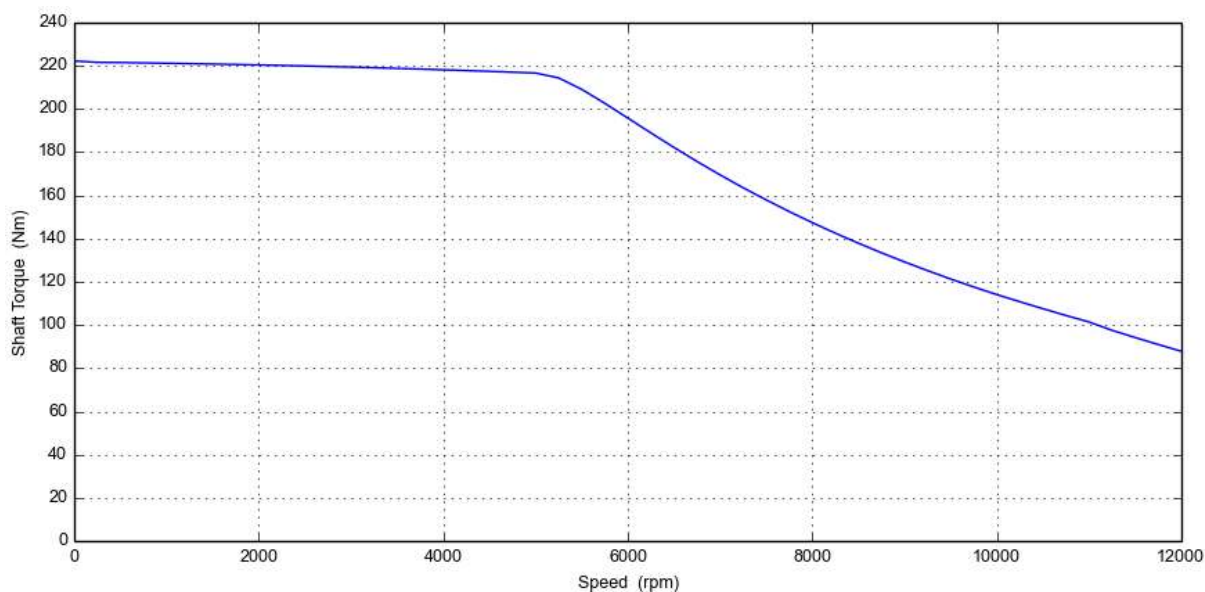
Zásadní význam pro posouzení vlastností trakčního pohonu mají momentové a výkonové charakteristiky. To jsou závislosti daných veličin na otáčkách stroje. Motor-CAD umožňuje vypočítat tyto křivky s nastavenou maximální teplotou na kritických místech, jež jsou izolace vinutí a permanentní magnety. Na Obr. 4.14 je zobrazeno nastavení tohoto výpočtu s uvedenými maximálními, minimálními otáčkami a krokem, maximální možné teploty magnetů a nejteplejšího místa ve vinutí

(tzv. hotspot bodu). Na těchto křivkách a v oblasti pod nimi je možné vybrat pracovní bod, ve kterém může stroj běžet v trvalém chodu a nemělo by dojít k překročení dovolené teploty.



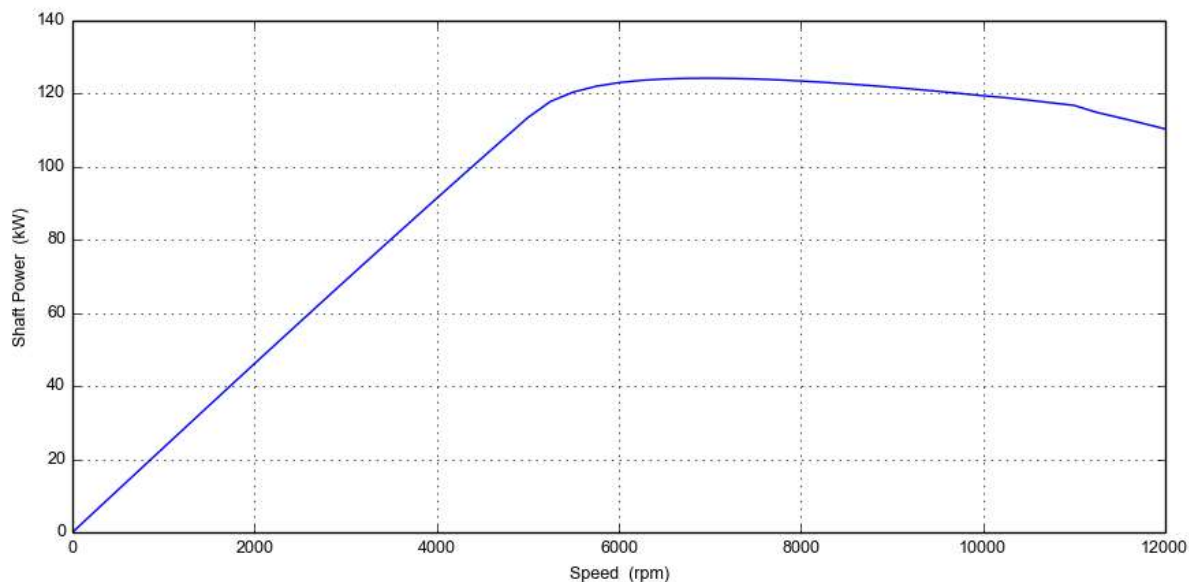
Obr. 4.14 - Nastavení tepelného výpočtu výkonové a momentové křivky

Výsledkem této simulace je křivka momentu (Obr. 4.15), kde je zřejmé, že omezený moment teplotou při nulových otáčkách je převyšující hodnotu 220 Nm. Do rychlosti 4700 ot/min je moment konstantní a při maximálních otáčkách odpovídající rychlosti vozidla 180 km/h je moment 89 Nm.



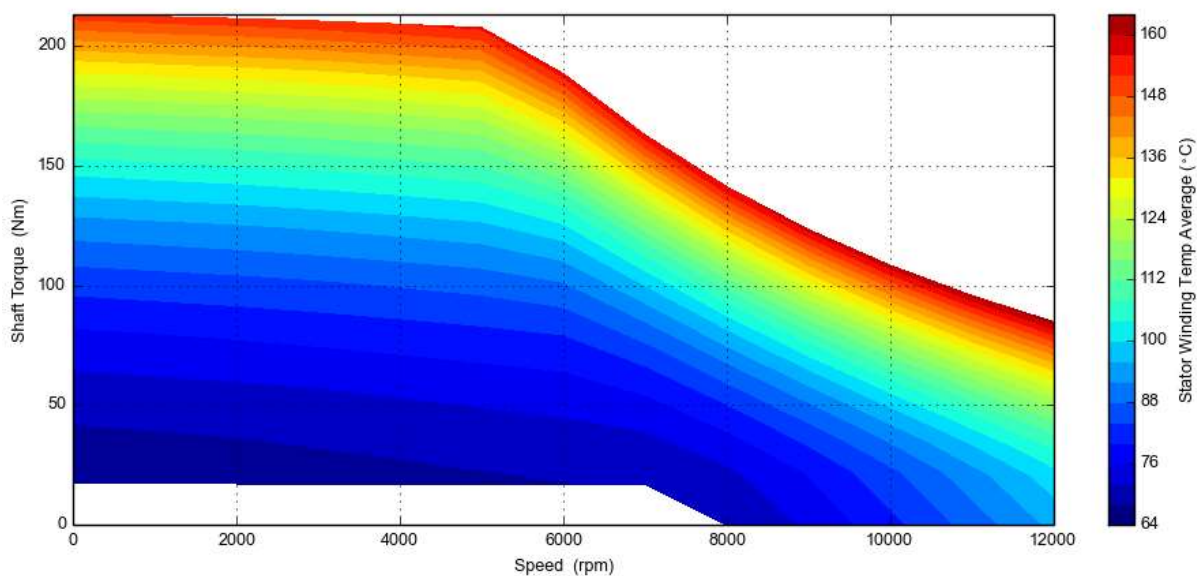
Obr. 4.15 - Křivka momentu omezená teplotou vinutí a magnetů

Na Obr. 4.16 je křivka výkonu, která dosahuje maximální hodnoty 124 kW při 7000 ot/min a při maximálních otáčkách je výkon 111 kW. Tímto bylo ověřeno, že chladicí systém je navržen tak, že je možné provozovat vozidlo v požadované maximální rychlosti, aby za daných podmínek nedošlo k přehřátí motoru.

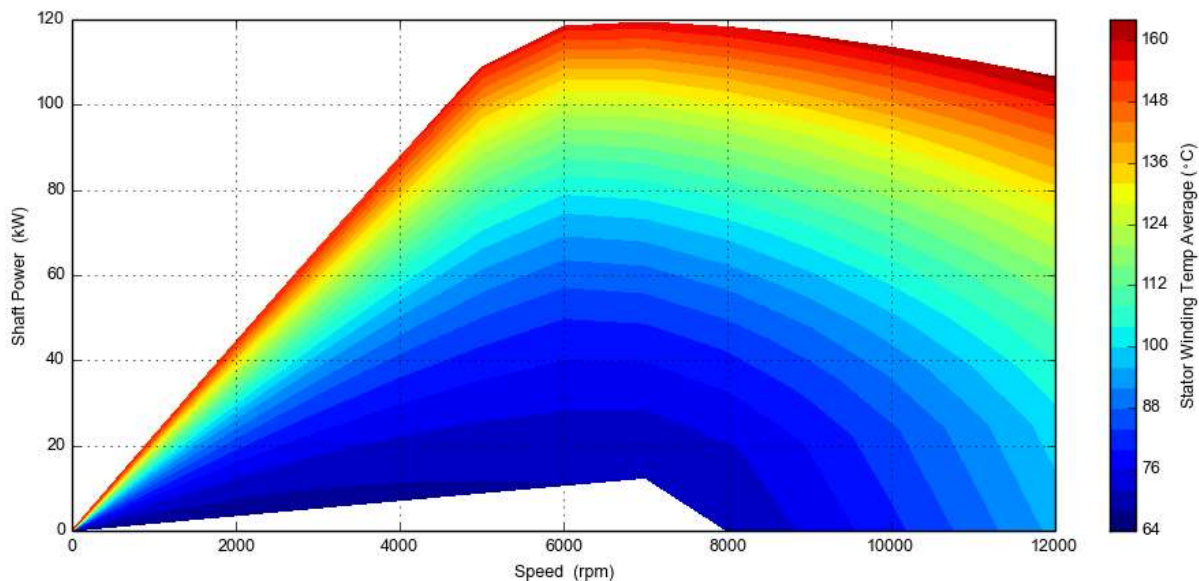


Obr. 4.16 - Křivka výkonu omezená teplotou vinutí a magnetů

Možné je zobrazit teplotu vybrané části stroje v pracovních bodech pod teplotně omezenými křivkami momentu a výkonu. Na Obr. 4.17 a Obr. 4.18 jsou zobrazeny mapy průměrné teploty vinutí, kde je možné odhadnout velikost ustálené teploty v případě provozu stroje s danými otáčkami a momentem, resp. výkonem.



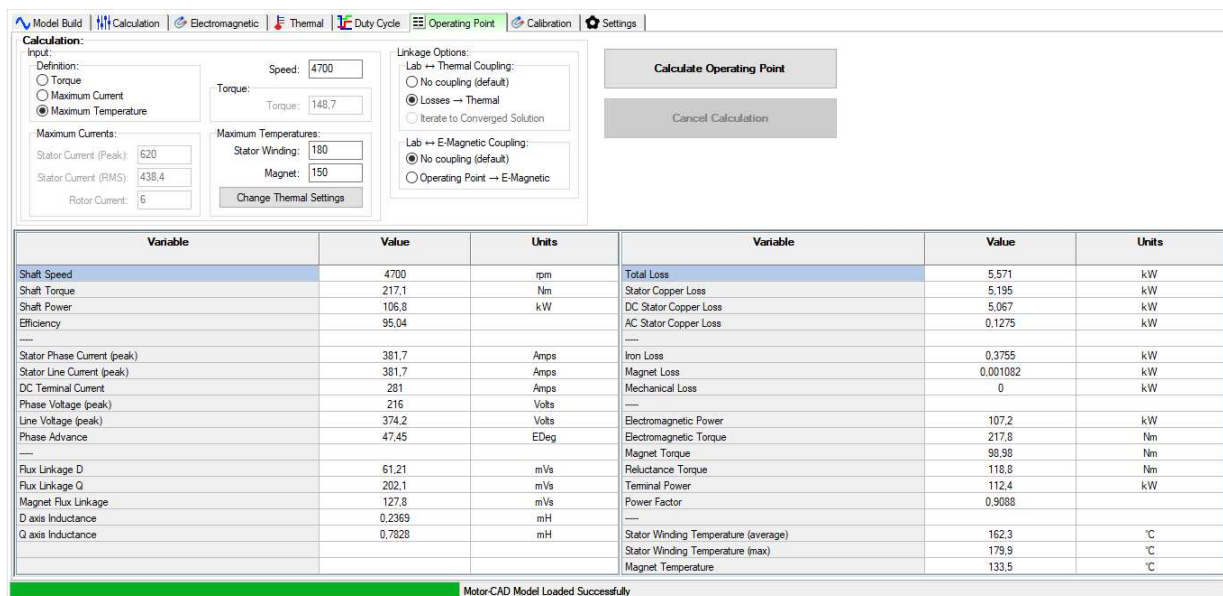
Obr. 4.17 - Mapa průměrné teploty statorového vinutí v pracovních bodech momentové křivky



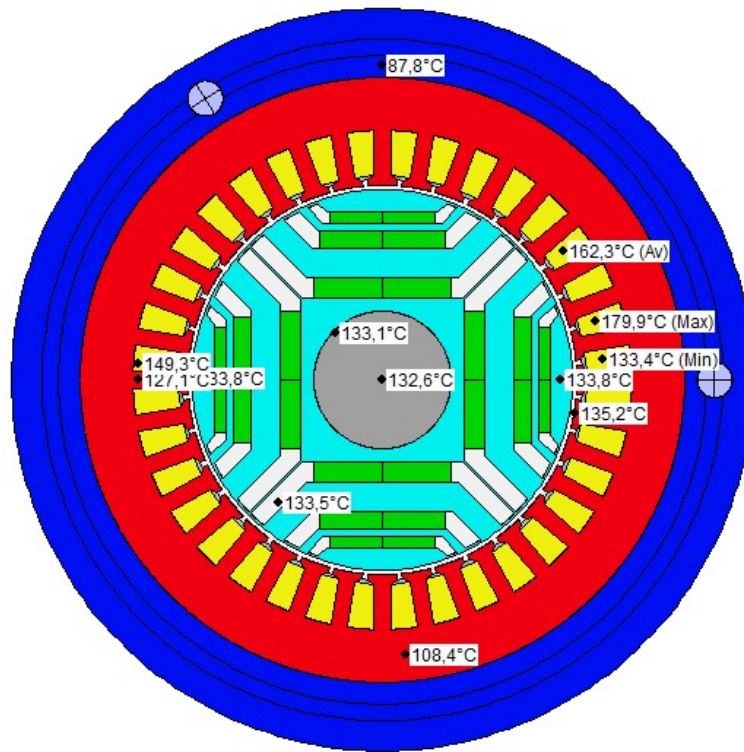
Obr. 4.18 - Mapa průměrné teploty statorového vinutí v pracovních bodech výkonové křivky

4.4.2 Ustálený stav

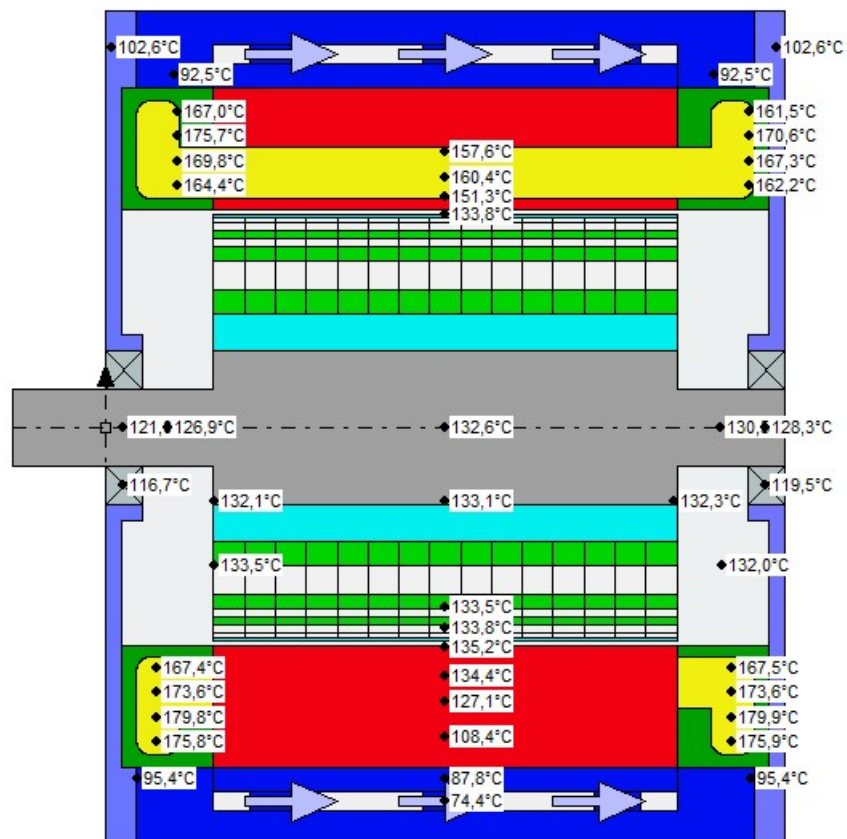
V charakteristikách uvedených v kapitole 4.4.1 je možné vybrat pracovní režim, pro který bude vypočítáno rozložení teploty ve stroji. Tento bod je dán otáčkami, které byly zvoleny na 4700 ot/min a maximálními teplotami, které zůstaly nezměněny. Na Obr. 4.19 je dokumentován numerický výpočet pro daný režim, kde jsou uvedeny veličiny potřebné pro posouzení správnosti návrhu, zejména ztráty a dosažené teploty. Celkové ztráty odpovídají přibližně velikosti odváděných ztrát vodním chlazením, což potvrzuje správnost prvotního odhadu v kapitole 4.3.



Obr. 4.19 – Ilustrace výpočet pro pracovního bodu 4700 ot/min, 217 Nm (číselné údaje viz příloha C – 8)



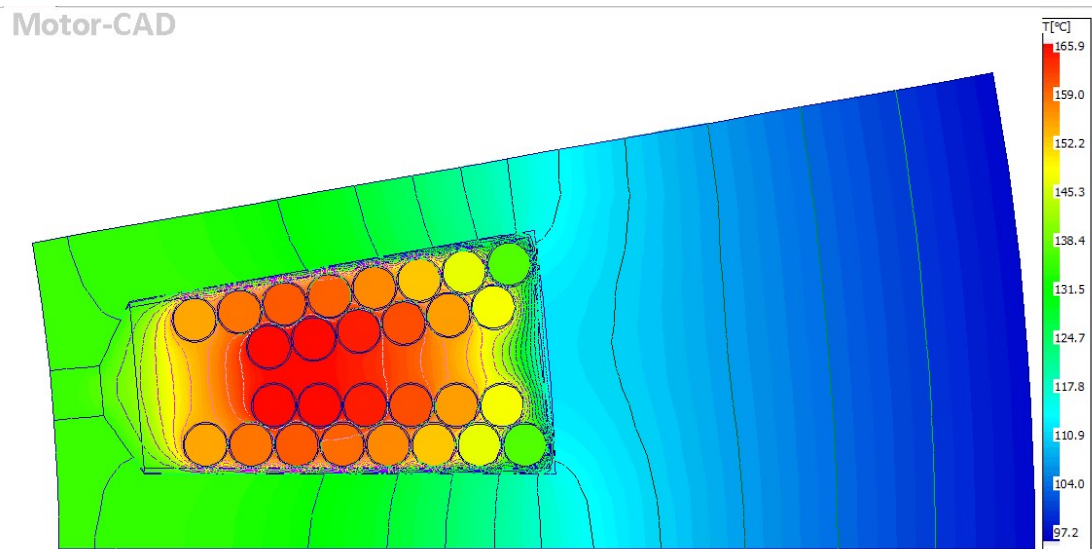
Obr. 4.21 - Rozložení teploty v příčném řezu



Obr. 4.22 - Rozložení teploty v podélném řezu

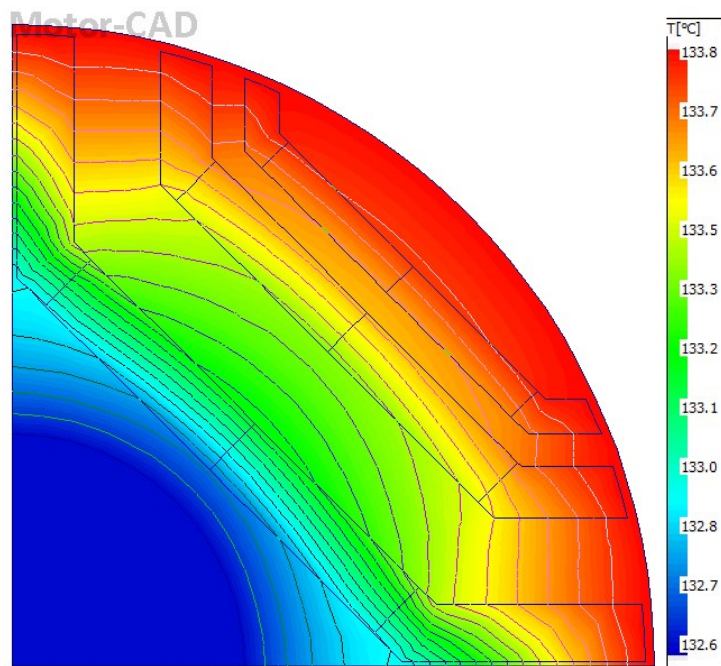
4.4.2.1 Metoda konečných prvků (MKP resp. FEA)

Motor-CAD obsahuje modul pro analýzy metodou konečných prvků, která z dosavadních výsledků vytvoří rychlým způsobem mapu teploty vybrané části. Na Obr. 4.23 je zobrazena statorová drážka, kde je možné provést kontrolu, zdali nedochází v nějakém bodě k přesáhnutí povolené teploty. V tomto případě je maximální teplota 165,9 °C uprostřed drážky, což splňuje požadavky na teplotu izolace teplotní třídy H.

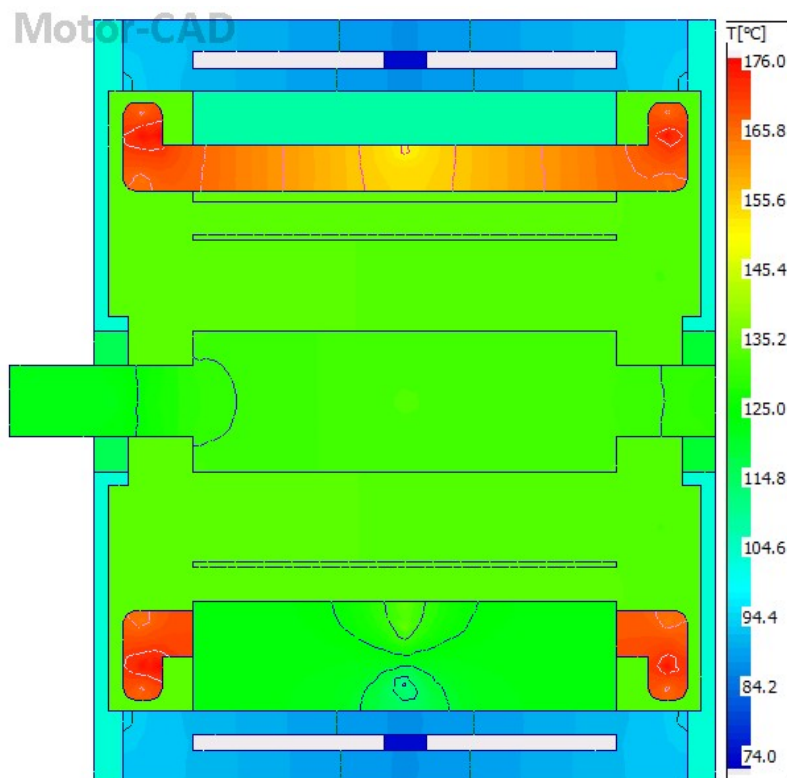


Obr. 4.23 - Rozložení teploty ve statorové drážce

Teplota rotoru se zvyšuje směrem ke vzduchové mezeře (Obr. 4.24). Teplota hřídele je 132,6 °C a rozložení teploty závisí na bariérách a v nich vložených magnetech. Méně tepelně namáhané jsou magnety blíže k ose stroje, ale rozdíl mezi magnety se pohybuje řádově v desetinách °C. Obr. 4.25 potvrzuje předpoklad, že nejvyšší teplota je v čelech vinutí.



Obr. 4.24 - Rozložení teploty v čtvrtinovém řezu rotoru



Obr. 4.25 - Rozložení teploty v podélném řezu

4.4.3 Transientní simulace

Motor-CAD umožňuje pro transientní simulace využít předdefinované jízdní cykly, mezi které patří celosvětově harmonizovaný jízdní cyklus WLTP nebo ho může definovat uživatel. Jízdní cyklus je v jednotlivých bodech dán otáčkami a momentem, které si v případě předdefinovaného cyklu vypočítá software sám z modelu vozidla (Obr. 4.26). V daném případě byla zvolena metoda „Coupled Transient Solution“, při které je v každém kroku vypočten tepelný model, a výsledné teploty jsou použity pro výpočet tepelně závislých veličin.

The image shows a software configuration window with two main sections: 'Duty Cycle' and 'Vehicle Model'.

Duty Cycle:

- Duty Cycle Type:** Radio buttons for 'Custom Duty Cycle' (unselected) and 'Automotive Drive Cycle' (selected).
- Automotive Drive Cycle:** A dropdown menu showing 'WLTP Class 3'.
- Thermal Transient Coupling:** Radio buttons for 'No coupling (default)' (unselected), 'Losses → Thermal' (unselected), and 'Coupled Transient Solution' (selected).
- Duty Cycle Data:** A table of input fields:

Number of Cycles:	10
Transient Period:	1,8E4
Number of Points:	1,8E4
RMS Torque:	46,83
RMS Torque [pu]:	0,1334
Average Speed:	3292

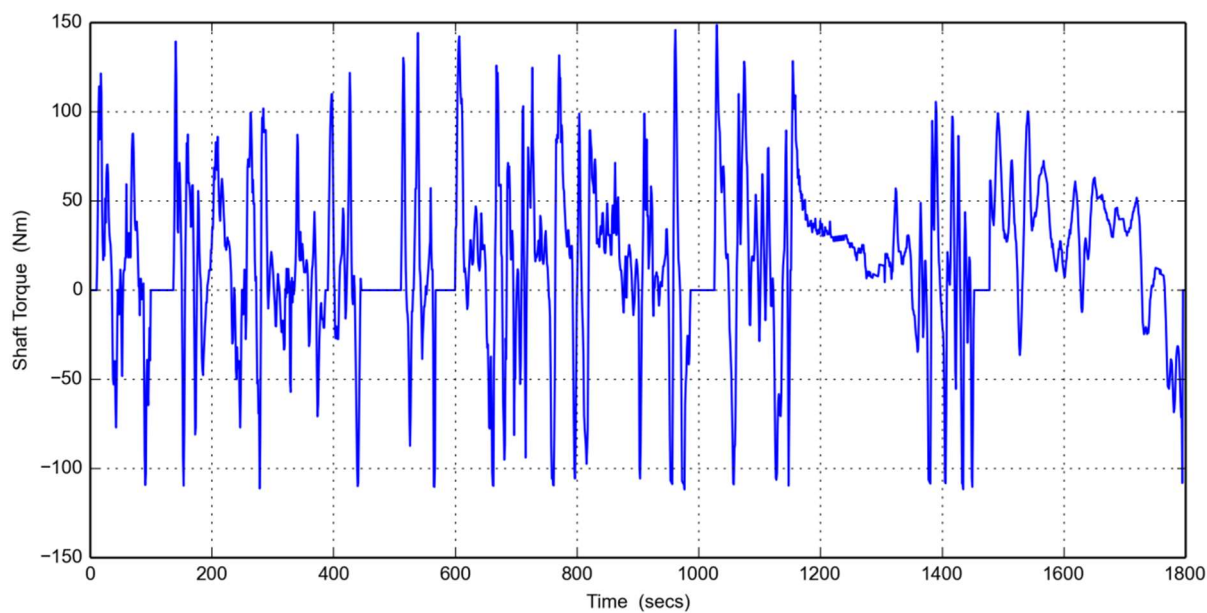
Vehicle Model:

Mass:	2000	Frontal Area (m²):	2,76	Wheel Radius (m):	0,3
Rolling Resistance Coefficient:	0,015	Drag Coefficient:	0,33	Mass Correction Factor:	1,1
Air Density:	1,225	Final Drive Ratio:	8	Motoring Torque Ratio:	1
Generating Torque Ratio:	1	Max. Torque:	<input type="checkbox"/> 500	Max. Speed:	<input type="checkbox"/> 2E4

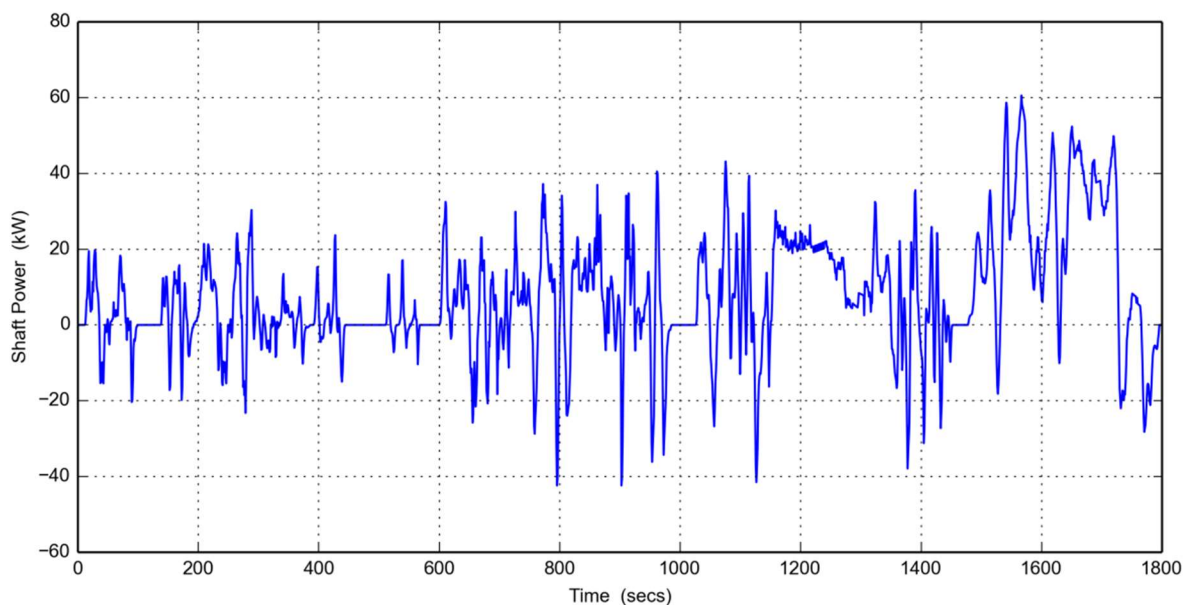
Obr. 4.26 - Nastavení transientního výpočtu

4.4.3.1 Jízdní cyklus WLTP

Cyklus WLTP je celosvětovým standardem pro testování malých a užitkových vozů, který poskytuje údaje o spotřebě paliva, množství znečišťujících látek a emisí CO₂. V tomto případě bude využit cyklus WLTP class 3 pro tepelnou analýzu elektrického stroje. Jeden cyklus trvá 30 minut, průběh momentu na hřídeli je zobrazen na Obr. 4.27 a průběh výkonu na Obr. 4.28.

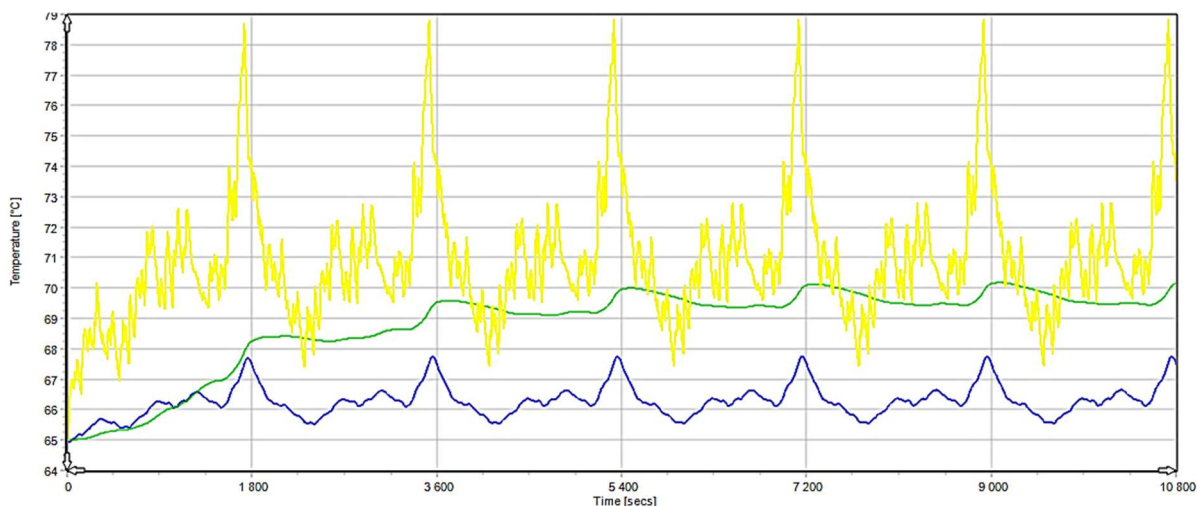


Obr. 4.27 - Průběh momentu na hřídeli jednoho WLTP cyklu



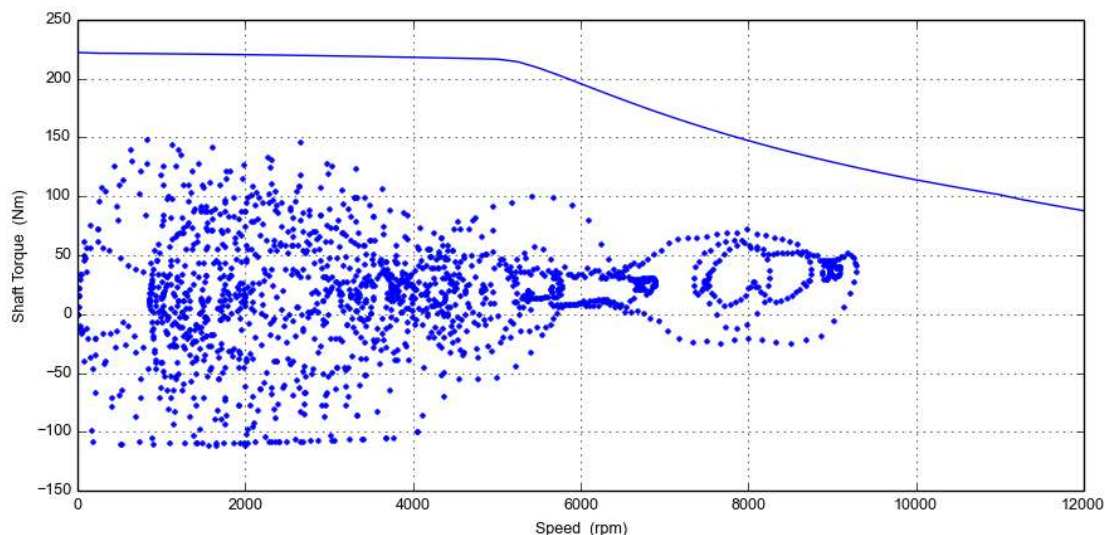
Obr. 4.28 - Průběh výkonu na hřídeli jednoho WLTP cyklu

V daném případě bylo simulováno 10 cyklů. Výsledkem simulace je zjištění, že po 6 cyklech se teploty všech pozorovaných částí ustálí a periodicky se opakují (Obr. 4.29). Maximální teploty dosahuje vinutí 79 °C v oblasti vysokých rychlostí a v oblasti nízkých rychlostí klesá na 68 °C. Teplota magnetů se po ustálení pohybuje mezi 69 a 70 °C, teplota pláště 65 a 68 °C.



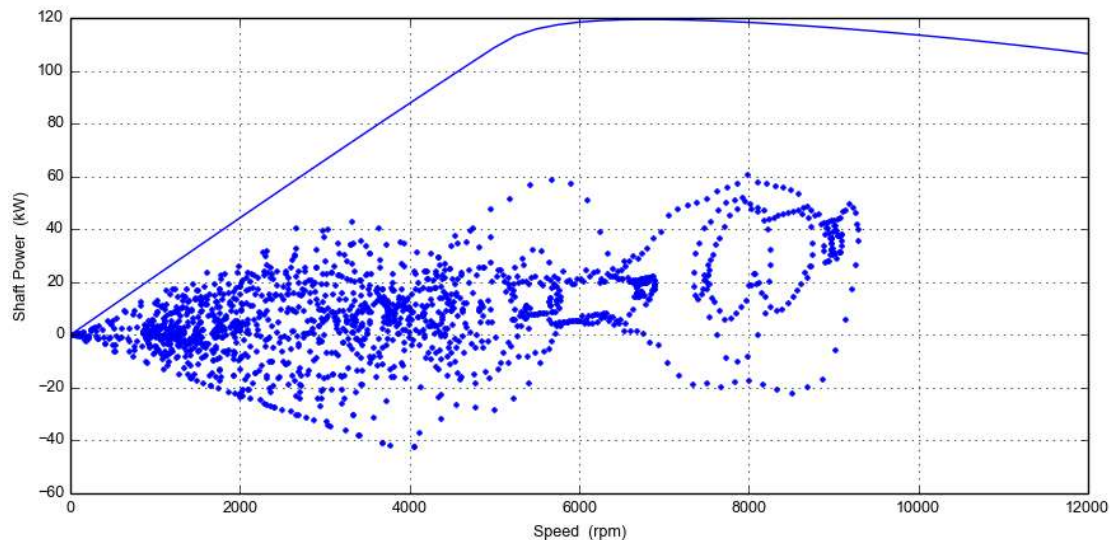
Obr. 4.29 - Průběh teploty pláště (modrá), magnetů (zelená) a maximální teploty vinutí (žlutá) pro 6 WLTP cyklů

Výše popsaná simulace potvrzuje, že v tomto jízdním cyklu nedochází k přehřátí motoru, což lze rovněž ověřit na rozmístění pracovních bodů (Obr. 4.30). Všechny body se pohybují pod teplotně omezenou křivkou výkonu, a to znamená, že v žádném okamžiku nedochází k přetěžování stroje.



Obr. 4.30 - Pracovní body WLTP cyklu a křivka momentu omezená teplotou

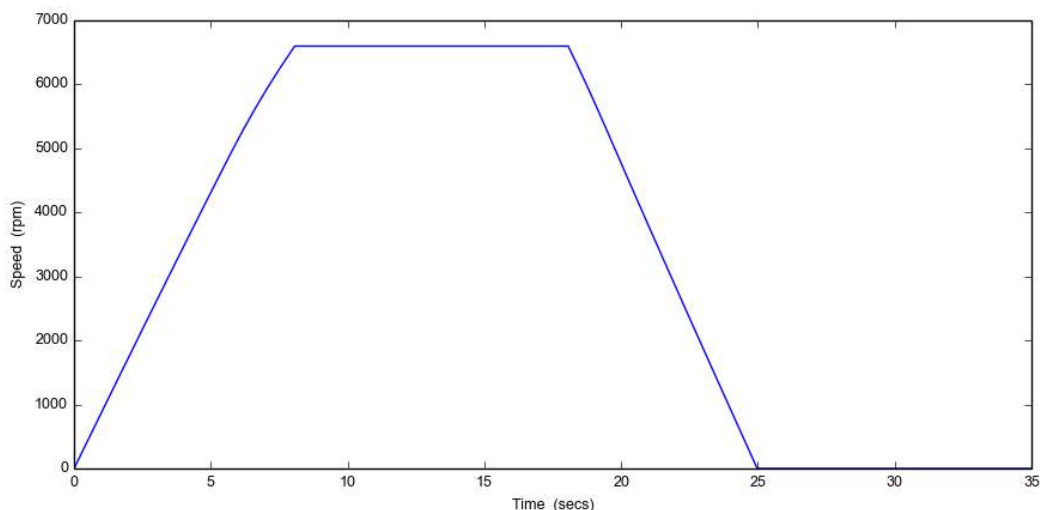
Podobně to lze zobrazit i v porovnání s výkonovou křivkou (Obr. 4.31). Stejně jako u momentové charakteristiky zde nedochází k výskytu pracovních bodů WLTP cyklu nad křivkou výkonu, která je omezena maximálními teplotami. V části s vyššími otáčkami má motor/generátor v chodu v tomto režimu cyklus přibližně 100% rezervu. V případě, že by vozidlo bylo provozováno pouze ve výše definovaném WLTP cyklu, byl by motor/generátor několikanásobně předimenzován, což by byla chyba návrhu, která by zapříčinila nadbytečnou hmotnost i cenu stroje.



Obr. 4.31 - Pracovní body WLTP cyklu a křivka výkonu omezená teplotou

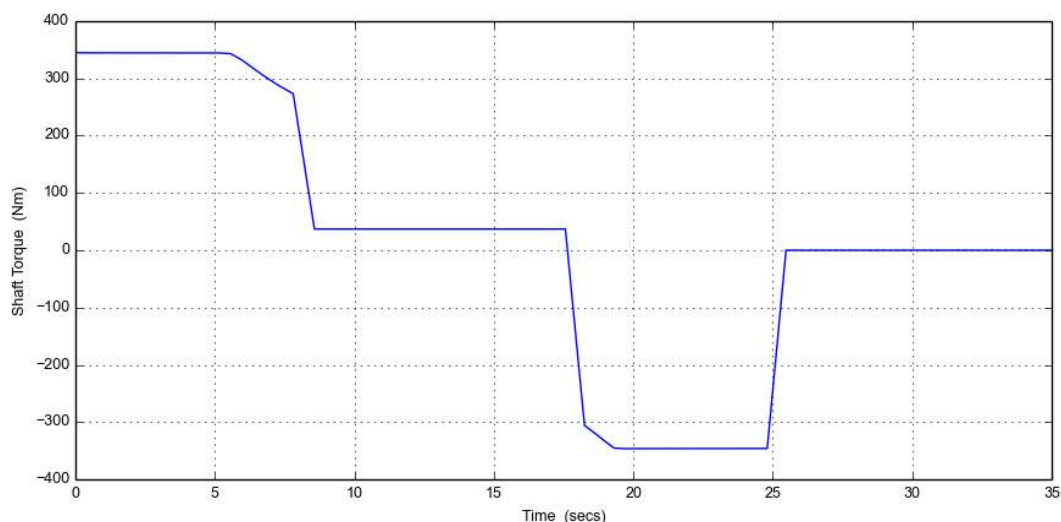
4.4.3.2 Zrychlení z 0 na 100 km/h

Další provedenou simulací je opakované zrychlení vozidla na rychlost 100 km/h a následné brzdění na 0 km/h. Cyklus trvá 35 s, z čehož 8,1 s probíhá rozběh, následuje 10 s provoz na otáčkách odpovídající rychlosti 100 km/h. Dále probíhá brzdění 6,9 s a setrvání vozidla v klidu 10 s (Obr. 4.32). Jelikož pro dosažení požadovaného zrychlení je nutný výkon větší než jmenovitý, očekává se, že vodní chlazení nebude schopné odvést všechno vznikající teplo a po určitém počtu opakování může dojít k přehřátí stroje.



Obr. 4.32 - Průběh rychlosti hřídele jednoho cyklu zrychlení a brzdění 0 – 100 – 0 km/hod

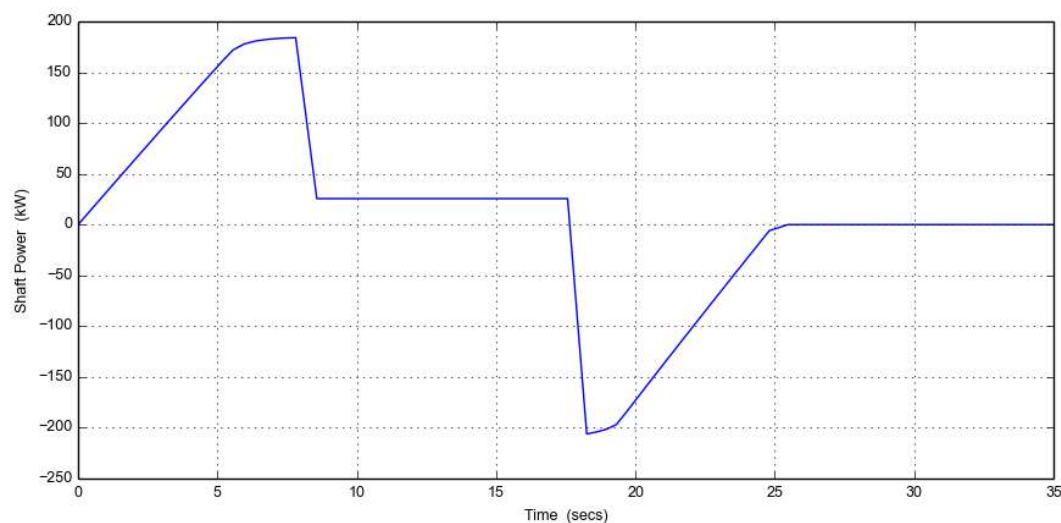
Potřebný moment pro daný rozběh je 356 Nm a stejným momentem opačného směru probíhá brzdění. Při rychlosti 100 km/h je zátěžný moment 37 Nm, který musí motor vytvářet pro udržení této rychlosti (Obr. 4.33).



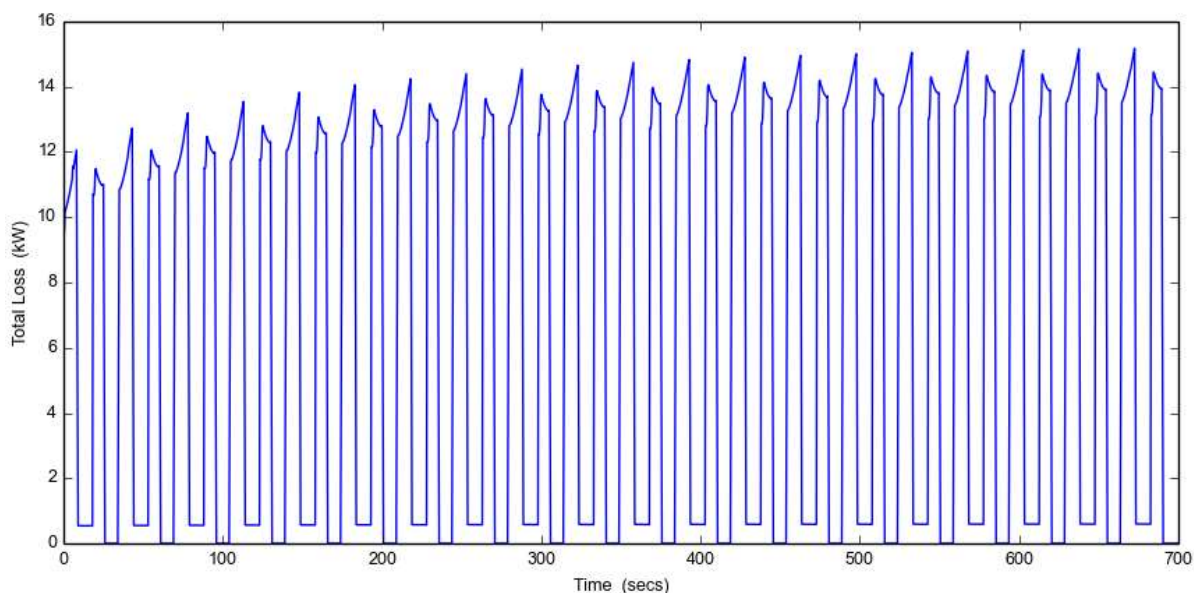
Obr. 4.33 - Průběh momentu na hřídeli jednoho cyklu zrychlení a brzdění 0 – 100 – 0 km/hod

Průběh výkonu na hřídeli jednoho cyklu je na Obr. 4.34. Maximální výkon je okolo 180 kW při rozběhu a - 200 kW při brzdění. Potřebný výkon pro udržení rychlosti 100 km/h je 25 kW.

Jelikož se jedná o *Coupled Transient Solution* metodu, celkové ztráty se v průběhu výpočtu zvyšují (Obr. 4.35). Nárůst ztrát odpovídá nárůstu teploty na vinutí stroje, z důvodu tepelné závislosti elektrického odporu na teplotě. Při teplotě vinutí 70 °C dosahuje špičková hodnota celkových ztrát 12 kW a při zahřátí vinutí na maximální povolenou teplotu 180 °C jsou celkové ztráty ve špičkové hodnotě 14 kW.

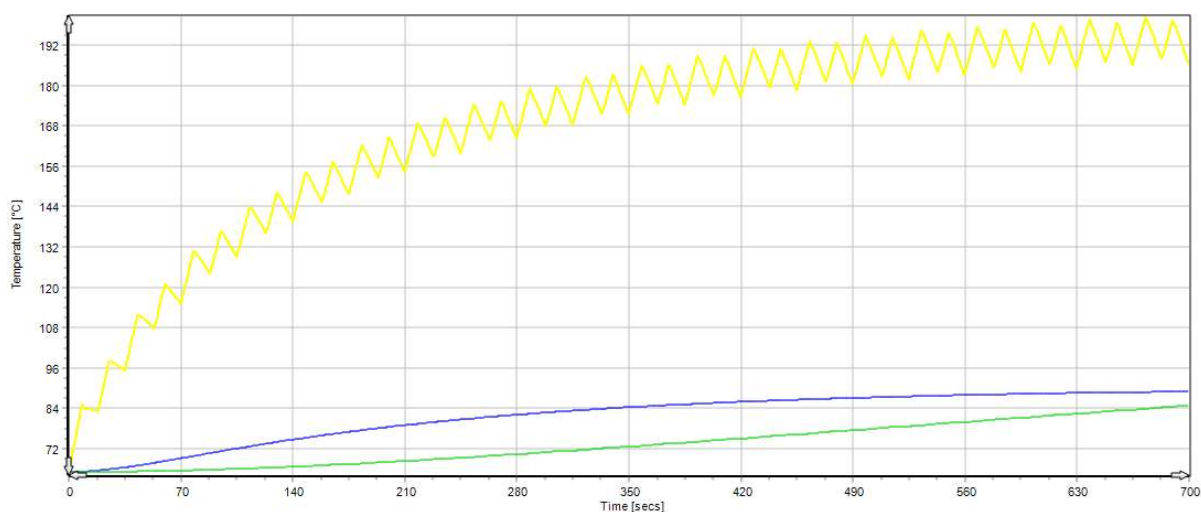


Obr. 4.34 - Průběh výkonu na hřídeli jednoho cyklu zrychlení a brzdění 0 – 100 – 0 km/hod



Obr. 4.35 - Průběh celkových ztrát stroje dvaceti cyklů zrychlení a brzdění 0 – 100 – 0 km/hod

Při prudkém zrychlování a brzdění vznikají největší ztráty ve vinutí, to odpovídá rychlému nárůstu teploty v této části, viz Obr. 4.36. Při udržování konstantních otáček 0 a 100 km/h dochází ke snižování teploty, protože jsou ztráty menší než teplo odváděné chladicím systémem. Teplota vinutí se ustaluje přibližně po 16 cyklech mezi teplotami 186 a 194 °C, což je teplota přesahující stanovený limit. Do dosažení teploty 180 °C nejteplejšího bodu vinutí z počáteční teploty 70 °C je možné cyklus zopakovat 8 x. V případě následného provozování tohoto cyklu by došlo k přehřátí a možnému poškození izolace vinutí. Dále by bylo nutné snížit výkon, kterým se motor rozbíhá a generátor brzdí, čímž by došlo k prodloužení dob rozběhu a brzdění nebo zvýšit prodlevy mezi akceleracemi.



Obr. 4.36 - Průběh teploty pláště (modrá), magnetů (zelená) a maximální teploty vinutí (žlutá) pro dvacet cyklů zrychlení a brzdění 0 – 100 – 0 km/hod

Závěr

V této práci jsem uvedl teoretické základy v oboru vzniku a odvodu ztrátového tepla, metody výpočtu oteplení, výpočet objemového průtoku a rozměrů chladicích kanálů vodního chlazení pláště trakčního pohonu elektromobilu.

Dále jsem dokumentoval seznámení s vývojovým prostředím ANSYS a jeho moduly. Jako nejvhodnější software z nabídky ANSYS pro tepelný návrh elektrického stroje jsem zvolil sw Motor-CAD. Uvedl jsem základní možnosti tohoto programu a popsal jeho uživatelské rozhraní.

Návrh chladicího systému jsem provedl pro synchronní reluktanční motor s permanentními magnety PMSRM, který byl navržen jako trakční pohon vozidla typu SUV s aerodynamickými vlastnostmi vozu Škoda Kodiaq tak, aby splňoval požadavky na maximální rychlost, dobu zrychlení z 0 na 100 km/h a měl maximální rozměry dle zadání v kapitole 4.

Z uvedených typů chlazení z nabídky sw Motor-Cad jsem na základě provedené analýzy aktuálního stavu techniky v oboru chlazení trakčních pohonů lehkých elektrických bateriových vozidel vybral vodní chlazení pláště. Jako chladicí médium jsem zvolil směs vody a etylenglykolu EGW 50/50 a vypočítal jsem potřebný objemový průtok 9,2 l/min. Rozměry chladicích kanálů jsem zvolil tak, aby umožnily intenzivní přestup tepla, resp. vznik turbulentního proudění chladiva.

Stanovené parametry chladicího systému jsem zavedl do sw Motor-CAD a následně jsem ověřil splnění kritéria pro vznik turbulence (Reynoldsovo číslo) a další parametry vodního chlazení, jako je aktivní plocha kanálů, koeficienty přestupu tepla, náhradní tepelné odpory apod.

Posuzovaný stroj včetně chlazení jsem prověřil simulacemi jak v ustálených, tak přechodných stavech. Pomocí Motor-CAD Lab jsem vypočítal teplotně omezené křivky momentu a výkonu v závislosti na otáčkách v oblasti od 0 do 12000 ot/min. Teplotní limity byly dány teplotou statorového vinutí a permanentních magnetů. U vinutí jsem stanovil maximální teplotu dle třídy izolace H na 180 °C a u magnetů dle charakteristik uvedených výrobcem na 150 °C.

Rozložení teploty jsem prověřil jak v příčném, tak v podélném řezu při otáčkách 4700 ot/min. Při těchto otáčkách je maximální trvalý výkon, při kterém nedojde k přesažení limitních teplot, 107 kW a moment 217 Nm. Z rozložení teploty v jednotlivých řezech je patrné, že ve stanoveném pracovním bodě je limitující teplota vinutí, která dosahuje v oblasti čel 179,9 °C. Teplota permanentních magnetů dosahuje 133,5 °C, což ještě nezpůsobuje ohrožení v podobě demagnetizace.

Pomocí analýzy metodou konečných prvků, která je součástí sw Motor-CAD, jsem dále vygeneroval mapy rozložení teploty v prostoru drážky a v řezu rotoru a statoru. Vizualní kontrolou míst s nejvyšší teplotou byla zjištěna dostatečná shoda s analytickým výpočtem.

Simulace chování navržené chladičí soustavy v přechodných režimech jsem prováděl na standardizovaném cyklu WLTP class 3, který obsahuje oblasti nižších, středních a vyšších rychlostí a je dlouhý 30 minut. Bylo zjištěno, že z počáteční teploty všech částí, která byla 65 °C, se teploty ustálí po 6 cyklech, po kterých se průběh teploty periodicky opakuje. Vinutí dosahuje maximálně 79 °C a magnety 68 °C při teplotě okolí 40 °C. Skutečnost, že v žádném bodě cyklu nedochází k přetěžování stroje, jsem dokumentoval formou rozmístění pracovních bodů pod teplotně omezenou křivkou momentu a výkonu.

Dále jsem simuloval zatěžování stroje opakovaným maximálním zrychlením z 0 na 100 km/h a následným maximálním brzděním rekuperací do zastavení. Zjistil jsem, že při splnění požadavku na zrychlení v daném čase dochází k přetěžování stroje a je ho možné opakovaně zatěžovat tímto cyklem jen omezenou dobu. Při počáteční teplotě stroje 70 °C a teplotě okolí 40 °C dojde k dosažení maximální povolené teploty vinutí 180 °C po osmi opakovaných cyklech. Aby nedošlo k tepelnému přetěžování izolace vinutí, které vede ke snížení životnosti nebo v horším případě ke zničení, se musí v tomto případě omezit výkon, a tedy doba zrychlení a brzdění vozidla, nebo zvýšit prodlevy mezi akceleracemi.

Literatura

- [1] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. 2nd. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 1118581571;9781118581575;.
- [2] STATON, David. Improving motor efficiency and motor miniaturization and the role of thermal simulation. In: Tutorial presented at ICEM'2012, Marseille, France. 2012.
- [3] MAZUR, D. Thermal analysis of the permanent magnet synchronous generator with the use of ansys fluent [online]. IEEE, 2013. 75-76 s.
- [4] KLONBERG, S. et al. Comparison of CFD analyzing strategies for hydro generators [online]. IEEE, 2014. 1990-1995 s.
- [5] CHEN, Yi et al. Thermal modeling and analysis of double-sided water-cooled permanent magnet linear synchronous machines. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. 2016, vol. 35, no. 2, s. 695-712. ISSN 0332-1649.
- [6] JAMASHIDI, H. CFD-based design and analysis of the ventilation of an electric generator model, validated with experiments, Int. J. Fluid Mach. Syst. 8 (2015) 113–123.
- [7] FAN, Jinxin et al. Thermal analysis of water cooled surface mount permanent magnet electric motor for electric vehicle [online]. IEEE, 2010. 1024-1028 s.
- [8] SATRÚSTEGUI, Marco et al. Design criteria for water cooled systems of induction machines. Applied Thermal Engineering. 2017, vol. 114, s. 1018-1028. ISSN 1359-4311.
- [9] ALISTAIR, Munro. Comparing the Cooling Strategy / Housings of Motors for Tesla Model 3 vs BMW i3, 2020, dostupné na: <https://leandesign.com/tearing-down-tesla-segment-8-comparing-the-cooling-strategy-housings-of-motors-for-tesla-model-3-vs-bmw-i3/>
- [10] NOLLAU, A. a D. GERLING. A new cooling approach for traction motors in hybrid drives [online]. IEEE, 2013. 456-461 s. ISBN 9781467349758;1467349755;.
- [11] MILLER M. John, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting, Oak Ridge National Laboratory, 2013
- [12] CHEN L., WANG J., LOMBART P., LAZARI P., LECONTE V. High – Efficiency Motor Design for Electric Vehicles, University of Sheffield, 2012
- [13] FAN, Jinxin et al. Thermal analysis of water cooled surface mount permanent magnet electric motor for electric vehicle [online]. IEEE, 2010. 1024-1028 s. ISBN 1424477204;9781424477203;.

Příloha A

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation E-Magnetics Output Data Graphs Sensitivity Scripting

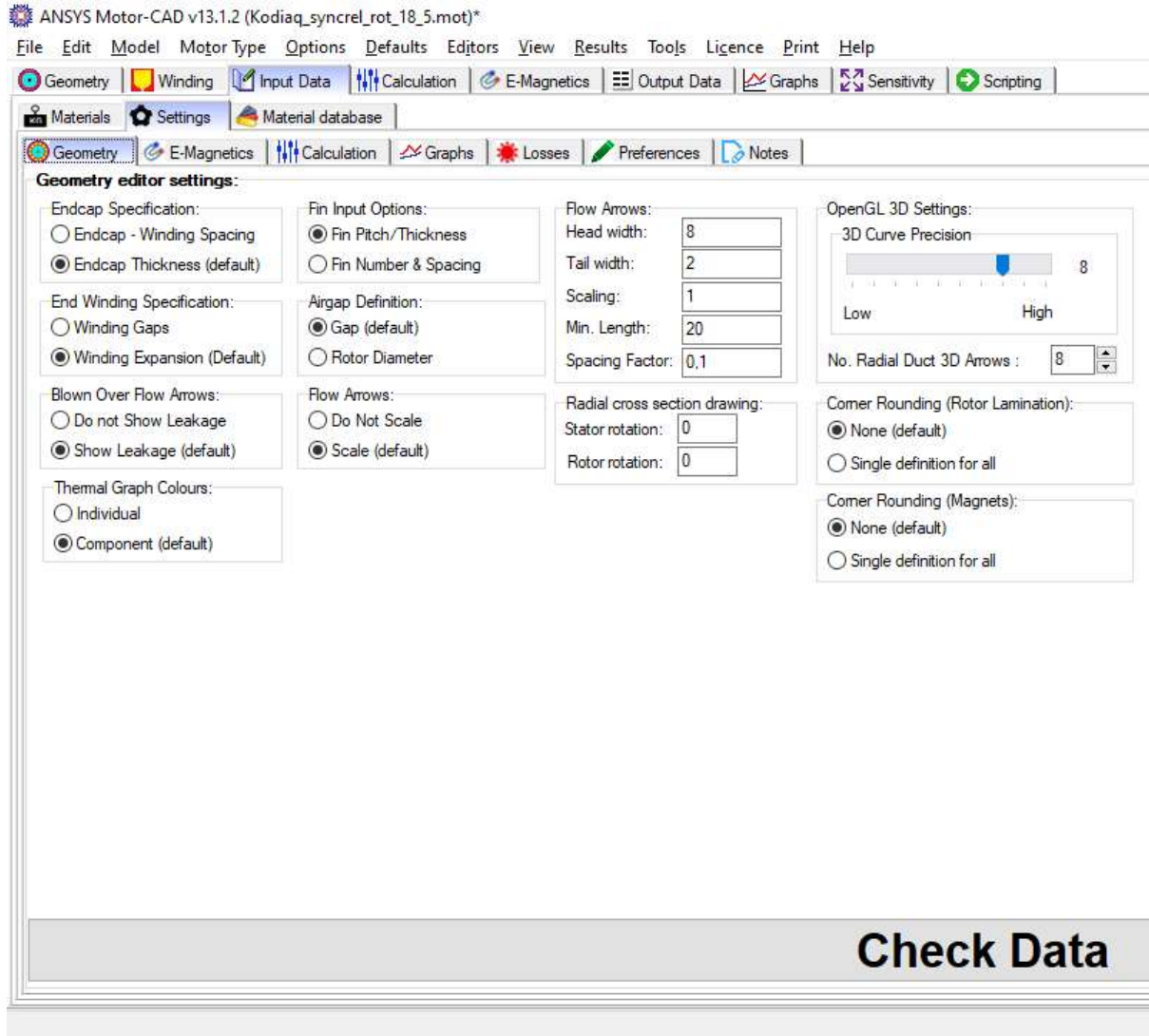
Materials Settings Material database

Component	Material from Database	Electrical Resistivity	Temp Coef Electrical Resistivity	Magnet Br at 20°C	Magnet Relative Permeability	Temp Coef Br	Density	Weight	
Units		Ohm.m		Tesla		%/°C	kg/m³	kg	
Stator Lam (Back Iron)	JFE_35JNE230	5.5E-07	0				7650	13.48	
Stator Lam (Tooth)	JFE_35JNE230	5.5E-07	0				7650	5.313	
Stator Lamination [Total]								18.8	
Armature Winding [Active]	Copper (Pure)	1.724E-08	0.003862				8933	3.066	
Armature EWdg [Front]	Copper (Pure)	1.724E-08	0.003862		Armature Winding [Front End-Winding]			2.302	
Armature EWdg [Rear]	Copper (Pure)	1.724E-08	0.003862				8933	2.302	
Armature Winding [Total]								7.671	
Slot Wedge		0	0				1000	0.03469	
Rotor Lam (Back Iron)	JFE_35JNE230	5.5E-07	0				7650	0.1881	
Rotor Lam (IPM Magnet Pole)	JFE_35JNE230	5.5E-07	0				7650	5.954	
Rotor Lamination [Total]								8.604	
Magnet	VACODYM 974 AP	1.5E-06	0	1.22	1.05	-0.102	7600	3.548	
Shaft [Active]		0	0				7800	2.297	
Shaft [Front]		0	0				7800	0.2489	
Shaft [Rear]		0	0				7800	0.134	
Shaft [Total]								2.68	
Total								41.3	Weight [Total]

Update materials from the Database

Armature Winding [Front End-Winding]

Příloha A



Příloha A

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation E-Magnetics Output Data Graphs Sensitivity Scripting

Materials Settings Material database

Geometry E-Magnetics Calculation Graphs Losses Preferences Notes

Magnetics settings:

Cores:

Rotor Iron:
 Laminated (default)
 Solid
 Non Magnetic

Lamination Stacking Factor [Rotor]: 0.97

Stator Iron:
 Laminated (default)
 Solid
 Non Magnetic

Lamination Stacking Factor [Stator]: 0.97

Stacking factor calculation:
 Ignore Stacking Factor
 Stacking Factor (axial length)
 Stacking Factor (saturation)(default)

Manufacturing Factors:

Amature EWdg length multiplier: 1
EWdg Inductance multiplier: 1
Magnet Br multiplier: 1

Length Adjustment Factors:

Stator saturation multiplier: 1
Rotor saturation multiplier: 1
Magnetic axial length multiplier: 1

Eccentricity:

Eccentricity Type:
 None (default)
 Static
 Dynamic
 Static + Dynamic

Shaft Centre Offset:
Distance: 0
Angle: 0

Rotor Centre Offset:
Distance: 0
Angle: 0

End Winding Inductance Calculation:

Rosa and Grover (default)
 Hanselman

Sine Drive Modulation:

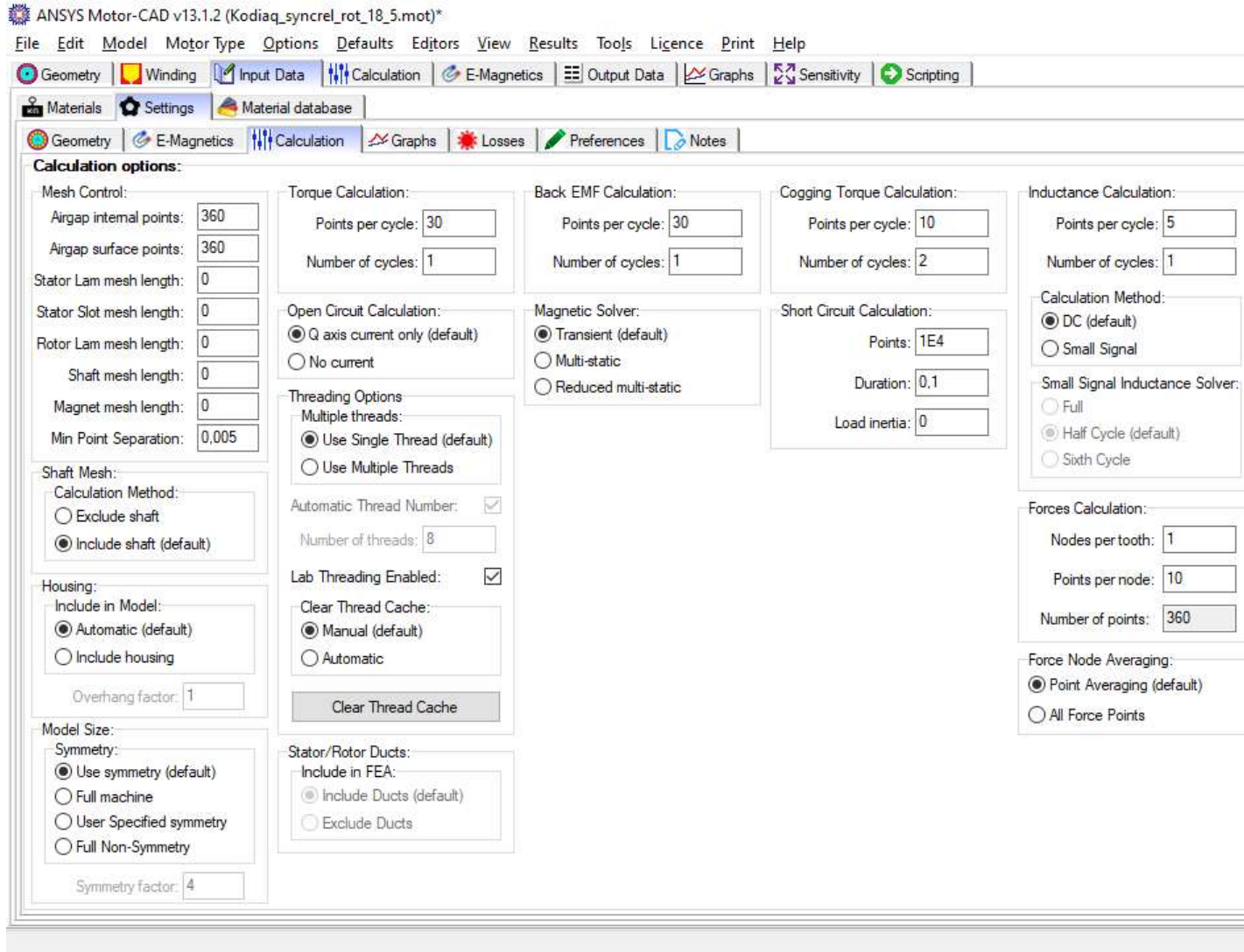
Circle tracking (default)
 SixStep 180
 Hexagon tracking - piecewise linear
 Hexagon tracking - secant
 Sixstep 120
 Maximum linear range of sine/triangle
 Sine/triangle with 3rd hamonic injection

Circuit at input of machine:

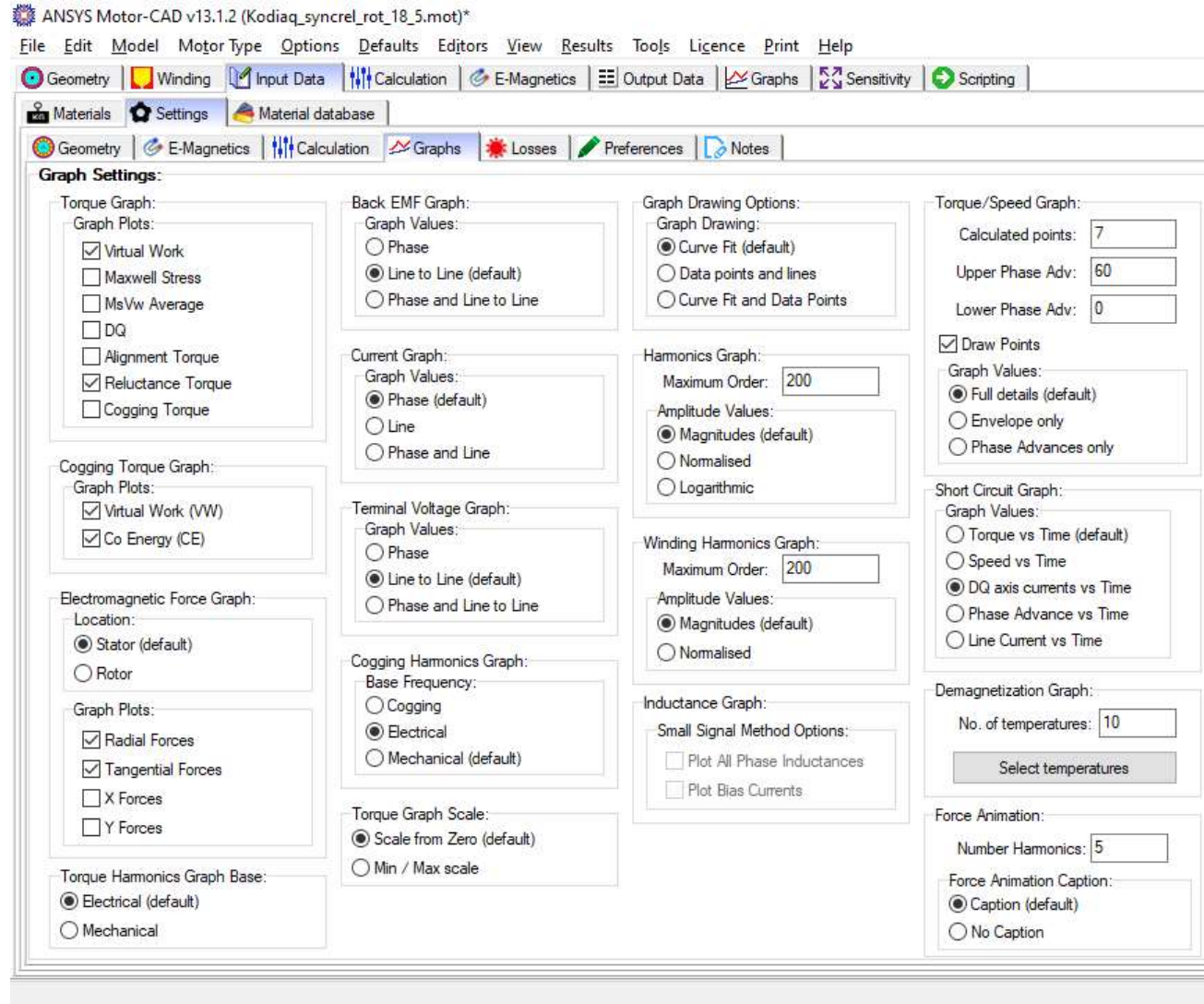
Circuit:
 None (default)
 LC Sine Filter

Inductance: 0 Capacitance: 0

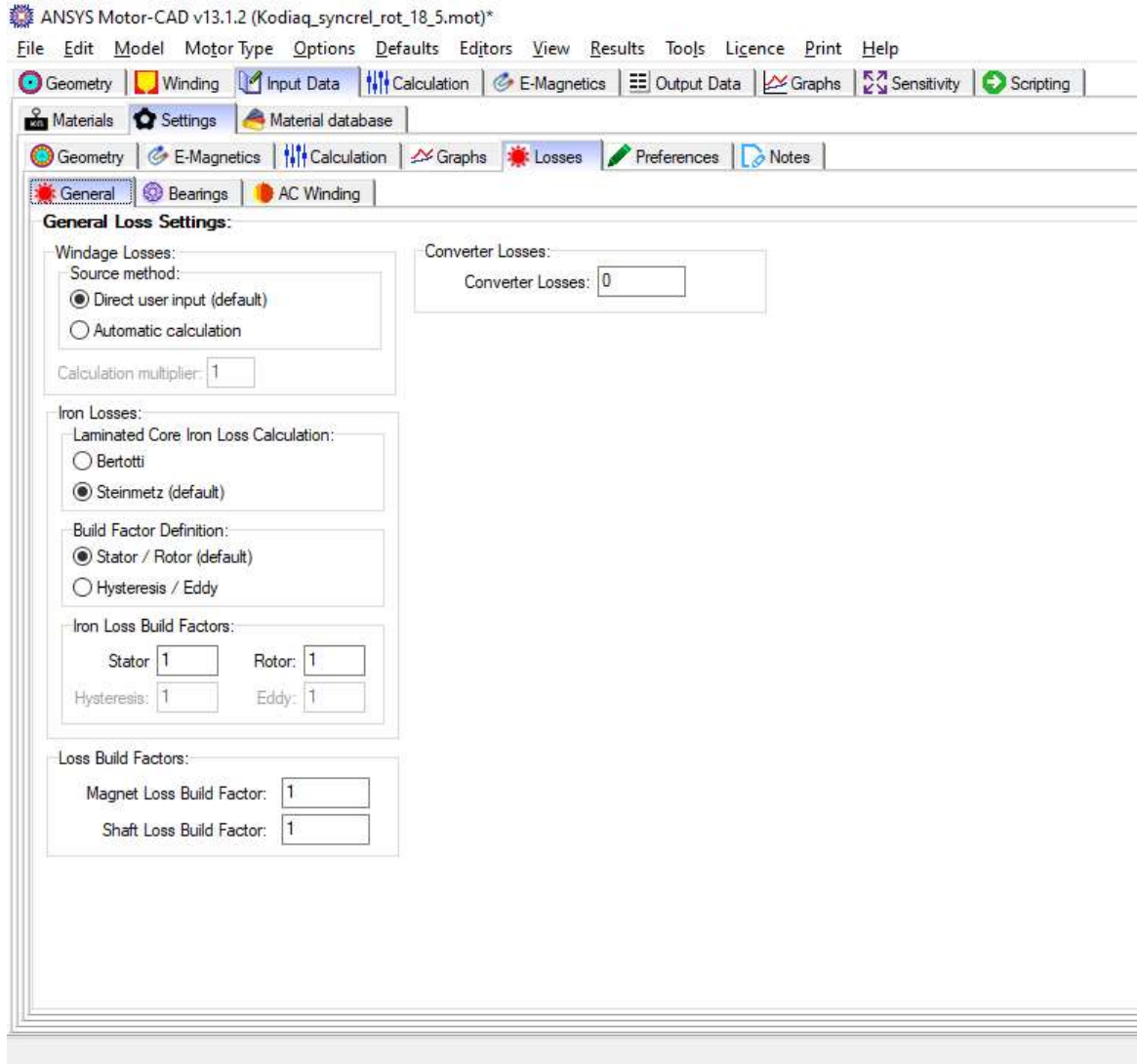
Příloha A



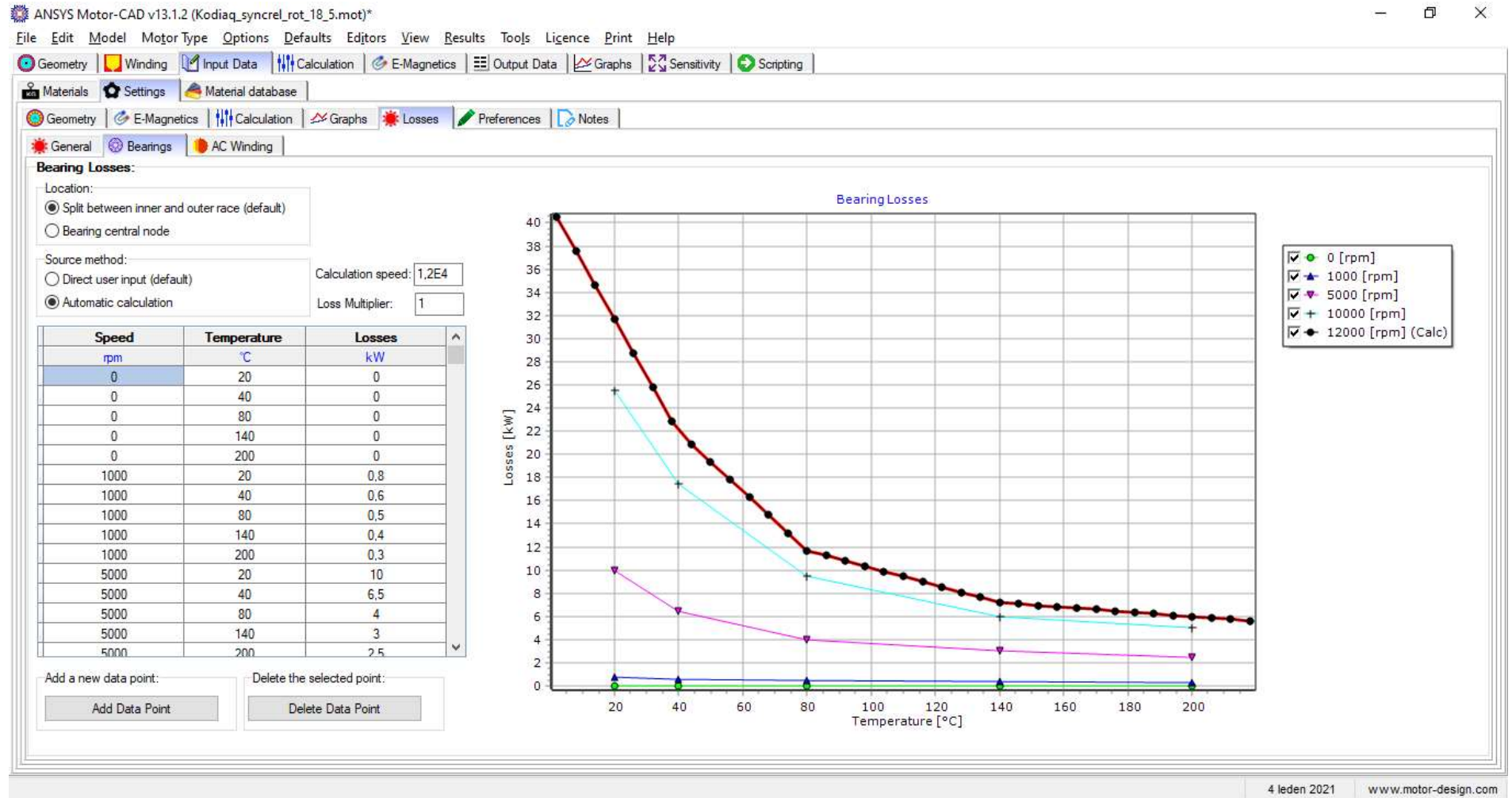
Příloha A



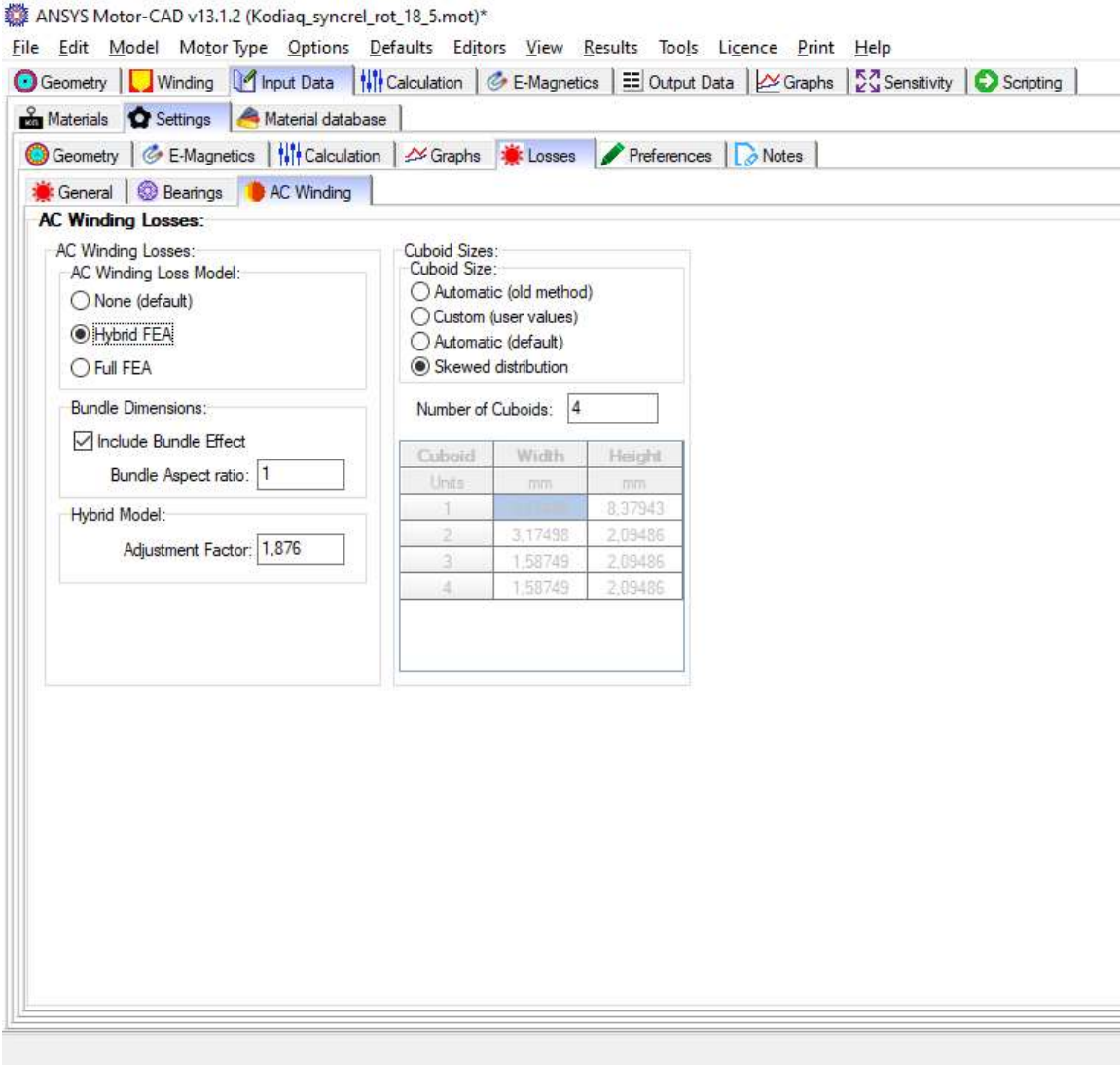
Příloha A



Příloha A



Příloha A



Příloha A

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation E-Magnetics Output Data Graphs Sensitivity Scripting

Drive E-Magnetics Phasor Diagram Equivalent Circuit Flux Densities Losses Winding Miscellaneous Materials Custom

Variable	Value	Units	Variable
Amature DC Copper Loss (on load)	4,007	kW	
AC Copper Loss (Hybrid)(Total)	0,1136	kW	
Stator iron Loss [total](static on load)	0,4066	kW	
Windage Loss (user input)	0	kW	
Friction Loss (calculated)	0,02513	kW	

Total Losses (on load)	4,552	kW	

Stator back iron Loss [hysteresis] (static on load)	0,2439	kW	
Stator back iron Loss [eddy] (static on load)	0,04033	kW	
Stator back iron Loss [excess] (static on load)	0	kW	
Stator back iron Loss [total] (static on load)	0,2842	kW	

Stator tooth Loss [hysteresis] (static on load)	0,1048	kW	
Stator tooth Loss [eddy] (static on load)	0,01756	kW	
Stator tooth Loss [excess] (static on load)	0	kW	
Stator tooth Loss [total] (static on load)	0,1224	kW	

Stator iron Loss [total](static on load)	0,4066	kW	

The total machine losses [Loss_Total]

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Radial Axial 3D

Housing: Water Jacket(Spir) Mounting: Not Mounted

Slot Type: Parallel Tooth Rotor Type: Interior U-Shape

Stator Ducts: None Rotor Ducts: None

Stator Dimensions	Value	Rotor Dimensions	Rotor Dimensions	Value
Slot Number	36	Pole Number	L2 Inner Mag Clearance	0
Housing Dia	270	Notch Depth	L2 Inner Mag Clearance	0
Stator Lam Dia	220	Magnet Layers	L2 Inner Post	0
Stator Bore	141.6	L1 Diameter	L2 Centre Post	0
Tooth Width	6	L1 Bridge Thickness	L3 Diameter	114
Slot Depth	20	L1 Web Thickness	L3 Bridge Thickness	1
Slot Corner Radius	0	L1 Outer Angle Offset	L3 Web Thickness	50
Tooth Tip Depth	2	L1 Outer Thickness	L3 Outer Angle Offset	0
Slot Opening	2	L1 Outer Mag Length	L3 Outer Thickness	3,8
Tooth Tip Angle	30	L1 Outer Mag Segments	L3 Outer Mag Length	0
Sleeve Thickness	0	L1 Outer Mag Offset	L3 Outer Mag Segments	1
WJ Channel-Lam	8	L1 Outer Mag Clearance	L3 Outer Mag Offset	0
WJ Channel Height	6	L1 Outer Mag Clearance	L3 Outer Mag Clearance	0
		L1 Outer Post	L3 Outer Mag Clearance	0
		L1 Inner Thickness	L3 Outer Post	0
		L1 Inner Mag Length	L3 Inner Thickness	4
		L1 Inner Mag Segments	L3 Inner Mag Length	19
		L1 Inner Mag Offset	L3 Inner Mag Segments	1
		L1 Inner Mag Clearance	L3 Inner Mag Offset	0
		L1 Inner Mag Clearance	L3 Inner Mag Clearance	0
		L1 Inner Post	L3 Inner Mag Clearance	0
		L1 Centre Post	L3 Inner Post	0
		L2 Diameter	L3 Centre Post	0
		L2 Bridge Thickness	Airgap	1,6
		L2 Web Thickness	Banding Thickness	0
		L2 Outer Angle Offset	Shaft Dia	50
		L2 Outer Thickness	Shaft Hole Diameter	0

Air or Fluid Length (-213,10,-126,40) mm

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Radial Axial 3D

Housing: Water Jacket () Mounting: Not Mounted

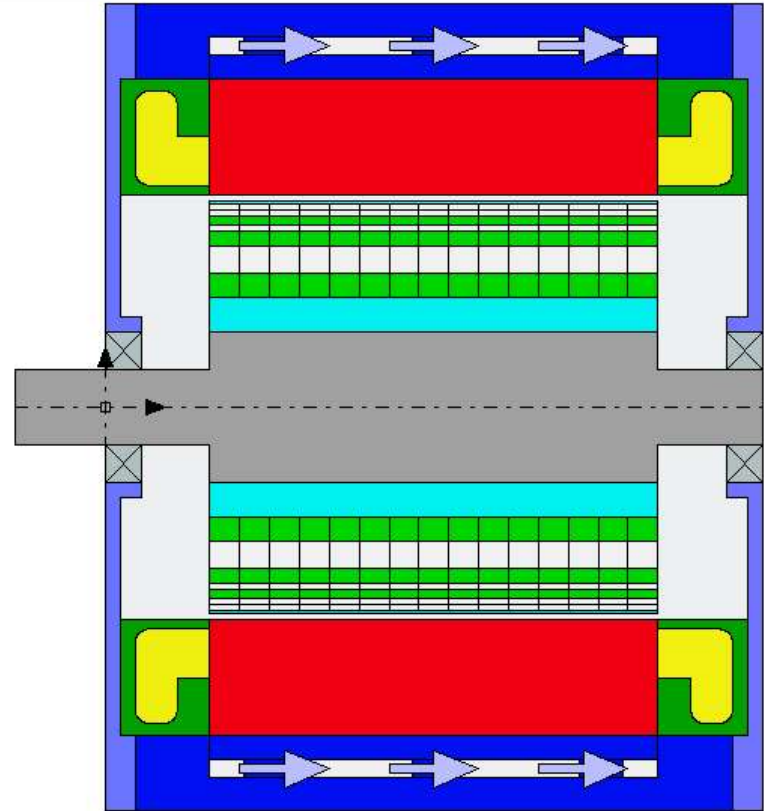
EWdg Cavity: Potted Feedback: Not Fitted

Cowling: Not Fitted Shaft Type: Solid

Fan: No Fan Radial Ducts: None

Radial Dimensions	Value	Axial Dimensions	Value
Housing Dia	270	Stator Axial Offset	0
Housing Add [Inner F]	0	Magnet Axial Offset	0
Housing Add [Inner R]	0	Rotor Axial Offset	0
Stator Lam Dia	220	EWdg Overhang [F]	25
Stator Bore	141,6	EWdg Overhang [R]	25
Airgap	1,6	Wdg Extension [F]	11
Banding Thickness	0	Wdg Extension [R]	11
Sleeve Thickness	0	Endcap Length [F]	10
Wafer Number [F]	0	Endcap Length [R]	10
Wafer Number [R]	0	Endcap Thickness [F]	5
Shaft Dia	50	Endcap Thickness [R]	5
Shaft Dia [F]	25	Shaft Extension [F]	30
Shaft Dia [R]	25	Shaft Extension [R]	0
Shaft Hole Diameter	0	Bearing Width [F]	12
Wdg Add [Outer F]	15	Bearing Width [R]	12
Wdg Add [Outer R]	15	Bearing Offset [F]	0
Wdg Add [Inner F]	0	Bearing Offset [R]	0
Wdg Add [Inner R]	0	Stator Plate Thick [F]	0
EWdg Insulation [F]	0	Stator Plate Thick [R]	0
EWdg Insulation [R]	0	Rotor Plate Thickness	0
Bearing Dia [F]	50	Rotor Plate Thickness	0
Bearing Dia [R]	50	WJ Channel Width	41
WJ Channel-Lam	8	WJ Channel Spacing	15
WJ Channel Height	6	Potting-Endcap [F]	0
Potting-Housing [F]	0	Potting-Endcap [R]	0
Potting-Housing [R]	0		

WJ Channel Width	41
WJ Channel Spacing	15
Potting-Endcap [F]	0
Potting-Endcap [R]	0



Redraw

Air or Fluid

Length (316,30.-72,03) mm 4 leden

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Definition Positions

Coil Style: Stranded Mat [Liner-Lam]: Impregnation
 Divider Type: Overlapping EWdg Definition: EWdg MLT
 Wdg Definition: Wire Size Wedge Model: Wedge

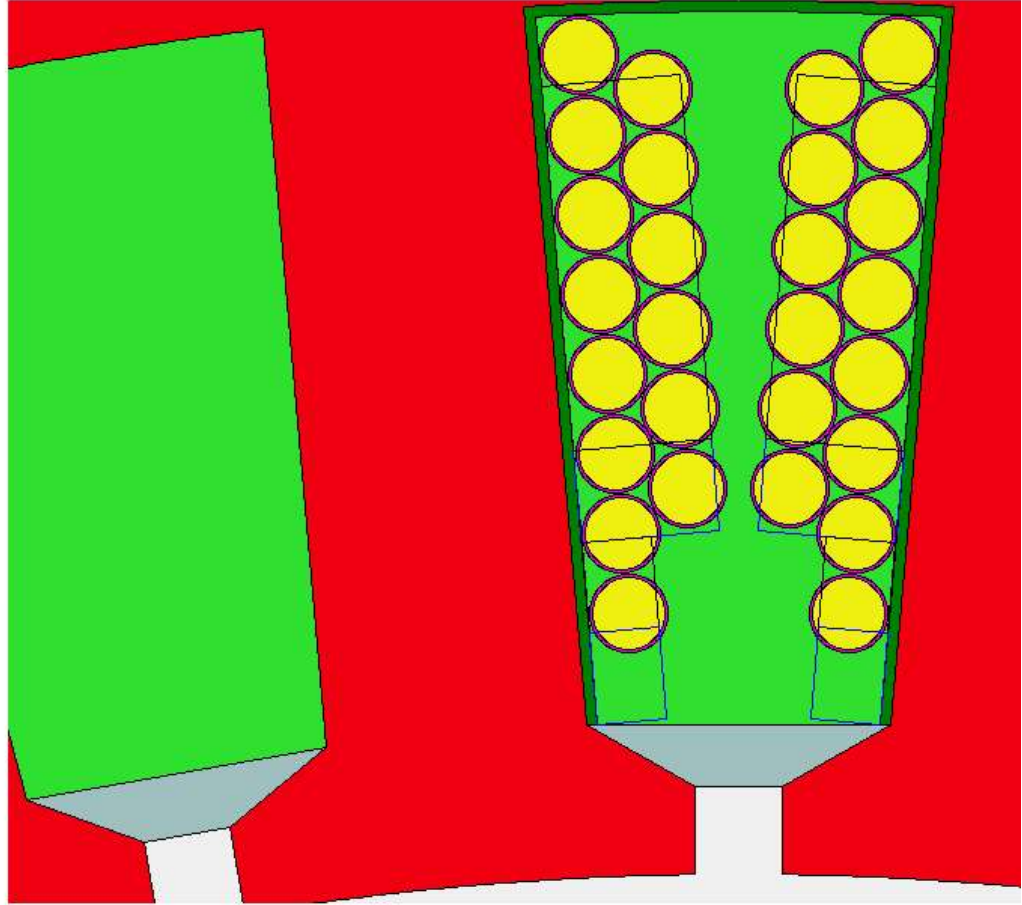
Wire Selection
 Wire Type: Metric Table
 Wire Gauge: Diameters - [1.813mm, 1.700mm]

Input Parameter	Value	Input Parameter	Value
Wire Slot Fill	0.5628	Conductors/Slot	28
EWdg Fill	0.9743	EWdg MLT	450.60
Liner Thickness	0.25	Ins Tooth Side Thickness	0
Ins Slot Base Thickness	0	Imp Goodness [Active]	0.8
Liner - Lam Gap	0	Imp Goodness [Liner-Lam]	0.8
Copper Depth [%]	100	Imp Goodness [EWdg]	0.8
Conductor Separation	0.02	Potting Goodness [EWdg]	1

Output Parameter	Value	Output Parameter	Value
Wire Slot Fill (Wdg Area)	0.5628	Slot Area	145.5
Wire Slot Fill (Slot Area)	0.497	Winding Area (+Liner)	139
Copper Slot Fill (Slot Area)	0.4369	Winding Area	128.4
Heavy Build Slot Fill	0.7165	Covered Wire Area	72.28
Winding Depth	16.323	Copper Area	63.55
Conductors/Slot Drawn	28	Impreg Area	56.16
		Wedge Area	6.425

Redraw

Winding View:
 Cuboids
 Conductors
 None



Length (15.75,90.66)

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Definition Positions

Conductor positions: Conductor placement:

Left Columns Right Columns

Number Columns: 2 Number Columns: 2
 Number Of Conductors: 5 Number Of Conductors: 5

Top Left Conductor Position: Top Right Conductor Position:

x Coordinate: -3,642 x Coordinate: 3,642
 y Coordinate: 89,55 y Coordinate: 89,55

Rotation Angle: 0 Rotation Angle: 0

Fine Position Left Side Right Side

Step Distance: 1

Position Positioning Type: Mouse Mode

Placement

Column	Missing Conductor	Number Conductor	Column	Missing Conductor	Number Conductor
1	0	8	1	0	8
2	1	6	2	1	6

Length (14.41,84,87)

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Cooling Options:

Housing Outer Cooling:
 Natural Convection
 Blown Over

Motor Orientation:
 Horizontal
 Vertical [Shaft Up]
 Vertical [Shaft Down]

Cooling Systems:
 Through Ventilated
 Self Ventilated
 Housing Water Jacket
 Shaft Spiral Groove
 Wet Rotor
 Spray Cooling
 Rotor Water Jacket
 Slot Water Jacket
 Submersible
 Flooded
 Heat Exchanger

Miscellaneous Data:

Lamination Stacking Factor [Stator]:

Lamination Stacking Factor [Rotor]:

Altitude [m]:

Ambient Temperature:

Radiation Emissivity:

Fixed Temperatures:

Fixed Plate Temperature Plate Temperature:

Fixed Base Temperature Base Temperature:

Fixed Shaft[F] Temperature Shaft[F] Temp:

Fixed Shaft[R] Temperature Shaft[R] Temp:

Fixed Endcap[F] Temp. Endcap[F] Temp:

Fixed Endcap[R] Temp. Endcap[R] Temp:

Cooling Options Notes:
Type in user Cooling notes here

Check Data

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Loss Models Loss Distribution

Loss Variation with Speed:

$P[\text{speed}] = P[\text{input}] \times \left[\frac{\text{Shaft Speed}}{\text{Speed}[\text{REF}]} \right]^{\text{coef}[\text{A}]}$

Speed Dependent Losses
 Shaft Speed [rpm]
 Single value of Speed[REF] [rpm]

Component	P[Input]	Speed[REF]	coef[A]	W/kg	P[speed]
Units	kW	rpm		W/kg	kW
Loss [Amature Copper]	5,067	3000	0	660,6	5,067
Loss [Amature Copper Freq Com]	0,1275	4700	2	16,63	0,1275
Loss [Stator Back Iron]	0,2476	4700	1,5	18,36	0,2476
Loss [Stator Tooth]	0,1214	4700	1,5	22,85	0,1214
Loss [Magnet]	0,001082	4700	0	0,3051	0,001082
Loss [Embedded Magnet Pole]	0,006544	4700	0	1,099	0,006544
Loss [Rotor Back Iron]	0	4700	0	0	0
Loss [Friction - F Bearing]	0	4700	1	0	0
Loss [Friction - R Bearing]	0	4700	1	0	0
Loss [Windage]	0	4700	3	0	0
Loss [Windage] (Ext Fan)	0	3000	3	0	0

Copper Loss Variation with Temperature:

Copper Losses Vary with Temperature
 Winding Temperature at which Stator Copper Losses Input:

Losses Notes:
 Type in user Losses notes here

Check Data

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Loss Models Loss Distribution

Slot Loss Area: Full Slot Half Slot

Winding Distribution: Number of slots in phase belt:

Stall Copper Loss Distribution: Equal ($I_a = I_b = I_c$) Sine ($I_a/2 = I_b = I_c$)
 6-step ($I_a = I_b, I_c = 0$) Custom

Normal Operation Copper Loss Distribution:

Use in FEA

Full Slot	Loss Proportion
1	0,3333333333333333
2	0,3333333333333333
3	0,3333333333333333
Total	1

Transient Fault Copper Loss Distribution:

Use in FEA

Full Slot	Loss Proportion
1	0,3333333333333333
2	0,3333333333333333
3	0,3333333333333333
Total	1

Stall Operation Copper Loss Distribution:

Use in FEA

Full Slot	Loss Proportion
1	
2	0,3333333333333333
3	0,3333333333333333
Total	1

Check Data

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Component	Material from Database	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Weight Internal	Weight Multiplier	Weight Addition	Weight Total
Units		W/m ² C	J/kg/°C	kg/m ³	kg		kg	kg
Housing [Active]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	6,655	1	0	6,655
Housing [Front]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	1,109	1	0	1,109
Housing [Rear]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	1,109	1	0	1,109
Housing [Total]					8,874			8,874
Endcap [Front]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	1,057	1	0	1,057
Endcap [Rear]	Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	1,057	1	0	1,057
Stator Lam (Back Iron)	JFE_35JNE230	30	450	7650	13,48	1	0	13,48
Inter Lam (Back Iron)		0,02723	1007	1,127	6,143E-05	1	0	6,143E-05
Stator Lam (Tooth)	JFE_35JNE230	30	450	7650	5,313	1	0	5,313
Inter Lam (Tooth)		0,02723	1007	1,127	2,421E-05	1	0	2,421E-05
Stator Lamination [Total]					18,8			18,8
Amature Winding [Active]	Copper (Pure)	401	385	8933	3,066	1	0	3,066
Amature EWdg [Front]	Copper (Pure)	401	385	8933	2,302	1	0	2,302
Amature EWdg [Rear]	Copper (Pure)	401	385	8933	2,302	1	0	2,302
Amature Winding [Total]					7,671			7,671
Wire Ins. [Active]		0,21	1000	1400	0,066	1	0	0,066
Wire Ins. [Front End-Wdg]		0,21	1000	1400	0,04956	1	0	0,04956
Wire Ins. [Rear End-Wdg]		0,21	1000	1400	0,04956	1	0	0,04956
Wire Ins. [Total]					0,1651			0,1651
Impreg. [Active]		0,2	1700	1400	0,3397	1	0	0,3397
Impreg. [Front End-Wdg.]		0,2	1700	1400	0,03209	1	0	0,03209
Impreg. [Rear End-Wdg.]		0,2	1700	1400	0,03209	1	0	0,03209
Impreg. [Total]					0,4038			0,4038
Potting [Front Endcap]	LORD CoolTherm EP-3500	3,5	733	2720	0,9985	1	0	0,9985
Potting [Rear Endcap]	LORD CoolTherm EP-3500	3,5	733	2720	0,9985	1	0	0,9985
Slot Wedge		0,2	1200	1000	0,03469	1	0	0,03469

Update materials from the Database

Units used in Materials & Weights Input Editor

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Component	Material from Database	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Weight Internal	Weight Multiplier	Weight Addition	Weight Total	
Units		W/m ² /°C	J/kg/°C	kg/m ³	kg		kg	kg	
Wire Ins. [Rear End-Wdg]		0,21	1000	1400	0,04956	1	0	0,04956	
Wire Ins. [Total]					0,1651			0,1651	
Impreg. [Active]		0,2	1700	1400	0,3397	1	0	0,3397	
Impreg. [Front End-Wdg.]		0,2	1700	1400	0,03209	1	0	0,03209	
Impreg. [Rear End-Wdg.]		0,2	1700	1400	0,03209	1	0	0,03209	
Impreg. [Total]					0,4038			0,4038	
Potting [Front Endcap]	LORD CoolTherm EP-3500	3,5	733	2720	0,9985	1	0	0,9985	
Potting [Rear Endcap]	LORD CoolTherm EP-3500	3,5	733	2720	0,9985	1	0	0,9985	
Slot Wedge		0,2	1200	1000	0,03469	1	0	0,03469	
Slot Liner		0,21	1000	700	0,04002	1	0	0,04002	
Housing WJ Duct Wall		0,2	1700	1400	0	1	0	0	
Rotor Lam (Back Iron)	JFE_35JNE230	30	450	7650	0,1881	1	0	0,1881	
Rotor Lam (IPM Magnet Pole)	JFE_35JNE230	30	450	7650	5,954	1	0	5,954	
Rotor Lam (Inter Magnet Gap)	JFE_35JNE230	30	450	7650	2,462	1	0	2,462	
Rotor Inter Lam (Back Iron)		0,02723	1007	1,127	8,569E-07	1	0	8,569E-07	
Rotor Lamination [Total]					8,604			8,604	
Magnet	VACODYM 974 AP	10	450	7600	3,548	1	0	3,548	
Rotor Pocket	Air (Motor-CAD model)	0,03171	1011	0,9461	0,0003	1	0	0,0003	
Shaft [Active]		52	460	7800	2,297	1	0	2,297	
Shaft [Front]		52	460	7800	0,2489	1	0	0,2489	
Shaft [Rear]		52	460	7800	0,134	1	0	0,134	
Shaft [Total]					2,68			2,68	
Bearing [Front]		30	460	7800	0,1378	1	0	0,1378	
Bearing [Rear]		30	460	7800	0,1378	1	0	0,1378	
Motor Weight [Total]					55,2			55,2	Weight [Total]

Update materials from the Database

Shaft [Rear]

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Component	Gap	Interface Material	Thermal Conductivity	Details	Resistance @T=100.0°C	Conductance @T=100.0°C
Units	mm		W/m/°C		m2.C/W	W/m2/C
Stator Lam - Housing	0,01	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Lamination-Metal - Good surface Contact	0,0003153	3172
Housing - OHang [F]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Housing - OHang [R]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Housing - Endcap [F]	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Housing - Endcap [R]	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Magnet - Rotor Lam	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Magnet - Magnet	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Rotor Lam - Shaft	0,005	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Metal-Metal - Average surface Contact	0,0001577	6341
Bearing Effective Gap [F]	0,4	Air (Motor-CAD model)	0,03171	High Effective Gap [Torino Testing]	0,01261	79,3
Bearing Effective Gap [R]	0,4	Air (Motor-CAD model)	0,03171	High Effective Gap [Torino Testing]	0,01261	79,3
Bearing - Endcap [F]	0,0073	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Stainless-Aluminium - Medium surface Contact	0,0002302	4344
Bearing - Endcap [R]	0,0073	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Stainless-Aluminium - Medium surface Contact	0,0002302	4344
Bearing - Shaft [F]	0,0112	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Stainless-Stainless - Medium surface Contact	0,0003532	2831
Bearing - Shaft [R]	0,0112	Air (Motor-CAD model)	0,03171	Stainless-Stainless - Medium surface Contact	0,0003532	2831
Potting-Housing [F]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Potting-Endcap [F]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Potting-Housing [R]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09
Potting-Endcap [R]	0	Air (Motor-CAD model)	0,03171	No Gap - Perfect surface Contact	0	1E09

Check Data

Press F1 for Help

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry
 Winding
 Input Data
 Calculation
 Temperatures
 Output Data
 Sensitivity
 Scripting
 Flow

Cooling
 Losses
 Materials
 Interfaces
 Radiation
 Natural Convection
 Housing Water Jacket
 End Space
 Settings
 Material database

Include Radiation in Lump Circuit Model dT used in table below - External Radiation [degC]:

Include Internal Radiation in Lump Circuit Model dT used in table below - Internal Radiation [degC]:

Single Emissivity value:

Component	Emissivity	View Factor	hr @dT=100,0°C	Area	Rt @dT=100,0°C
Units			W/m ² /°C	mm ²	°C/W
Housing [Front]	0,9	1	9,961	2,12E04	4,734
Housing [Active]	0,9	1	9,961	1,272E05	0,7891
Housing [Rear]	0,9	1	9,961	2,12E04	4,734
Endcap [Front] - Radial Area	0,9	1	9,961	8482	11,84
Endcap [Front] - Axial Area	0,9	1	9,961	5,676E04	1,769
Endcap [Rear] - Radial Area	0,9	1	9,961	8482	11,84
Endcap [Rear] - Axial Area	0,9	1	9,961	5,726E04	1,753

Check Data

Check Radiation Input Data

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry
 Winding
 Input Data
 Calculation
 Temperatures
 Output Data
 Sensitivity
 Scripting
 Flow

Cooling
 Losses
 Materials
 Interfaces
 Radiation
 Natural Convection
 Housing Water Jacket
 End Space
 Settings
 Material database

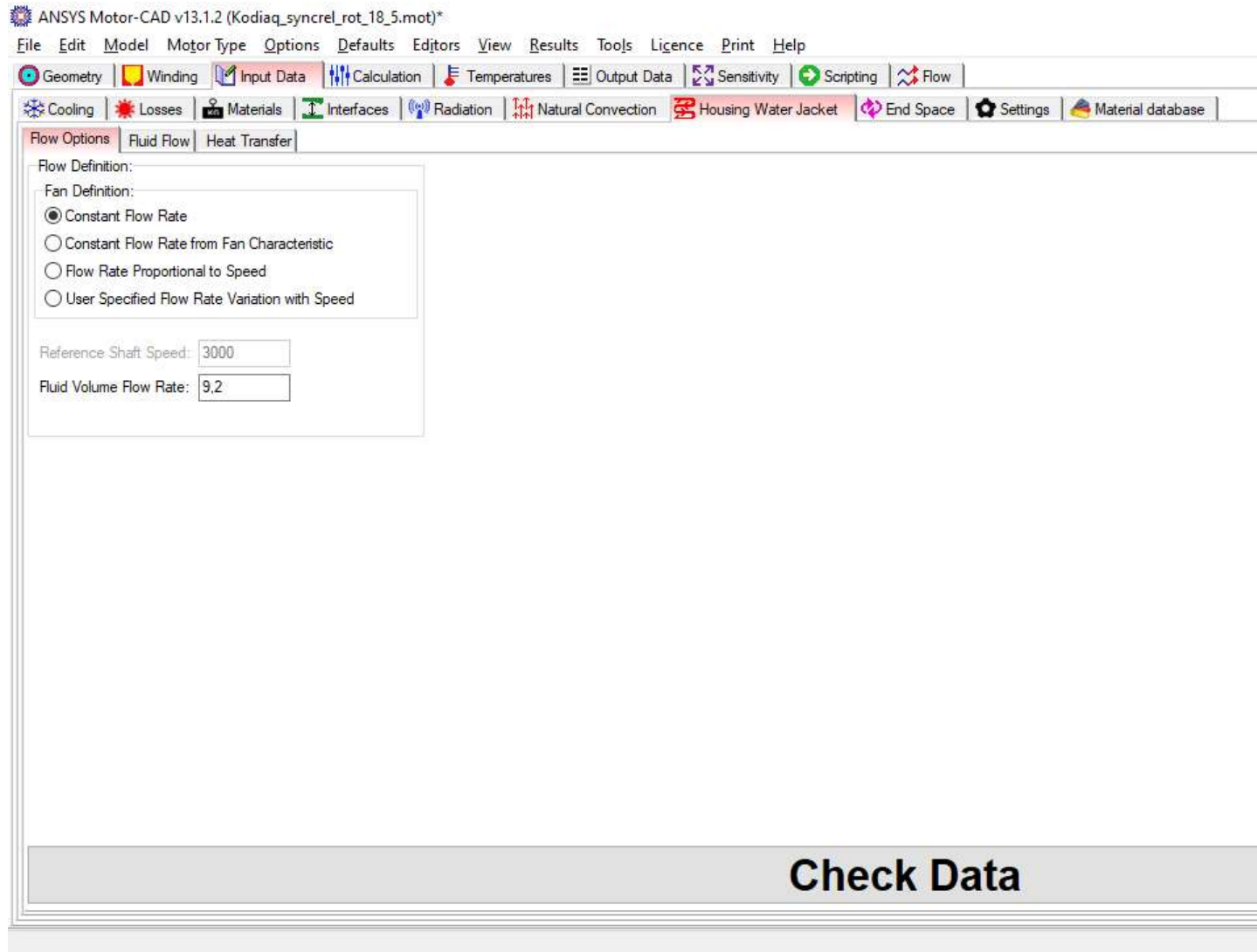
Motor Orientation = Horizontal

dT used in table below [°C]:

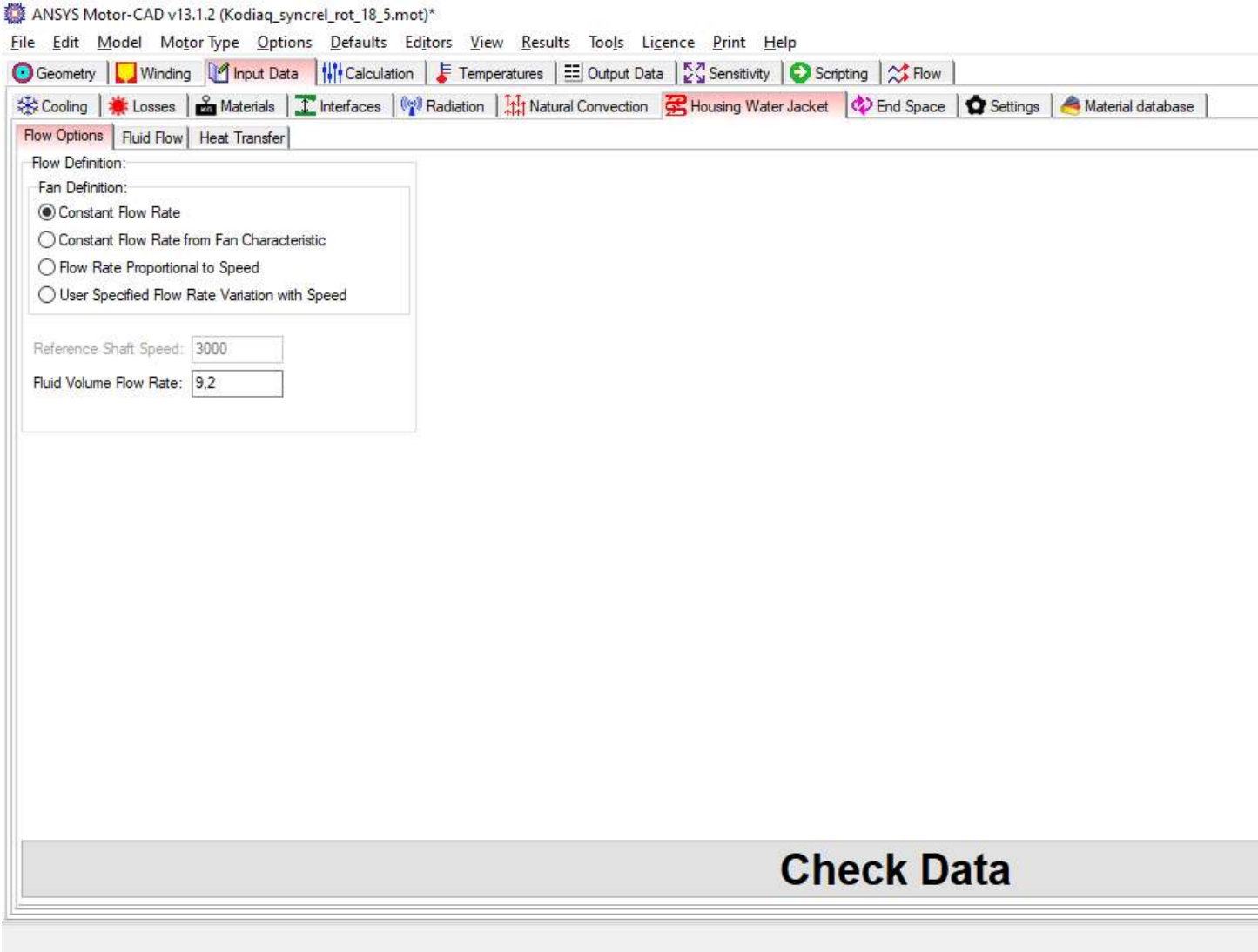
Component	Input h?	Convection Correlation	h[input] or h[adjust]	hnc @ dT=100.0°C	Area	Rt @ dT=100.0°C
Units			W/m ² /°C	W/m ² /°C	mm ²	°C/W
Housing [Active]	<input checked="" type="checkbox"/>	Horizontal Cylinder	1	5,641	1,272E05	1,393
Housing [Front]	<input type="checkbox"/>	Horizontal Cylinder	1	5,641	2,12E04	8,359
Housing [Rear]	<input type="checkbox"/>	Horizontal Cylinder	1	5,641	2,12E04	8,359
Endcap [Front] - Radial Area	<input type="checkbox"/>	Horizontal Cylinder	1	5,641	8482	20,9
Endcap [Front] - Axial Area	<input type="checkbox"/>	Vertical Flat Plate	1	6,34	5,676E04	2,779
Endcap [Rear] - Radial Area	<input type="checkbox"/>	Horizontal Cylinder	1	5,641	8482	20,9
Endcap [Rear] - Axial Area	<input type="checkbox"/>	Vertical Flat Plate	1	6,34	5,726E04	2,755

Check Data

Příloha B



Příloha B



Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Flow Options Fluid Flow Heat Transfer

Fluid Data:

Fluid Volume Flow Rate:

Inlet Temperature:

Fluid Properties:

EGW 50/50

Thermal Conductivity:

Density:

Cp:

Kinematic Viscosity:

Dynamic Viscosity:

Pr - Prandtl Number:

Cooling Options:

Housing Water Jacket Type = Spiral Groove

Active Cooling Only Non Spiral ducts

Endcap Cooling

No Endcap Cooling (default)

Separate Endcap Cooling circuits

Endcap Cooling in Series

Flow Direction:

Rear -> Front

Front -> Rear

Calculate or Input Number Flow Channels:

Calculate

Input

Parallel Flow Paths:

Number Flow Channels:

Channel Data:

Duct Wall Thickness:

Cutout Width (Average):

Cutout Height (Average):

Flow Area (total):

Flow Area (per channel):

Channel Width (Average):

Channel Height (Average):

Component	Input h?	Convection Correlation	h[input] or h[adjust]	Local Velocity Multiplier	Local Fluid Velocity	Re Number	%Re(crit)	Surface Area	h	Rt
Units			W/m ² /°C	pu	m/s		%	mm ²	W/m ² /°C	°C/W
Housing [Active]	<input type="checkbox"/>	Channel Correlation [Turbulent]	1	1	0,6246	5010	217,8	2,111E05	1891	0,002505

Check Data

Príloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow
 Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Front End Space:
 End Space Velocity Multiplier [Front]: Normal Rotor 0,5
 End Space Reference Velocity [Front]: 17,03
 End winding roughness [Front]: 1
 Endcap Ventilation [Front]: Closed Vented Fully Open

Rear End Space:
 End Space Velocity Multiplier [Rear]: Normal Rotor 0,5
 End Space Reference Velocity [Rear]: 17,03
 End winding roughness [Rear]: 1
 Endcap Ventilation [Rear]: Closed Vented Fully Open

Shaft Speed [rpm]: 4700

Internal Surface	k1	k2	k3	Air Velocity Multiplier	Air Velocity	h	Area Multiplier	Area	Rt	
Units				pu	m/s	W/m ² /°C	pu	mm ²	°C/W	
Endcap [Front]	15	0,4	0,9	0,7	11,92	70,82	1	1,378E04	1,024	
Endcap [Rear]	15	0,4	0,9	0,7	11,92	70,82	1	1,378E04	1,024	
Bearing [Front]	15	0,4	0,9	1	17,03	91,95	1	1473	7,385	
Bearing [Rear]	15	0,4	0,9	1	17,03	91,95	1	1473	7,385	
Shaft [Front]	15	0,4	0,9	1	6,152	45,78	1	1806	12,09	
Shaft [Rear]	15	0,4	0,9	1	6,152	45,78	1	1806	12,09	
Rotor [Front]	15	0,4	0,9	1	23,18	116,6	1	1,144E04	0,7498	
Rotor [Rear]	15	0,4	0,9	1	23,18	116,6	1	1,144E04	0,7498	
Magnet [Front]	15	0,4	0,9	1	23,18	116,6	1	3112	2,756	
Magnet [Rear]	15	0,4	0,9	1	23,18	116,6	1	3112	2,756	
EWdg Inner [Front]	15	0,4	0,9	1	17,03	91,95	1	1,166E04	0,9327	
EWdg Inner [Rear]	15	0,4	0,9	1	17,03	91,95	1	1,166E04	0,9327	
Shaft Extension (Outer) [Front]	15	0,4	0,9	1	6,152	45,78	1	2356	9,27	
Shaft Extension (End) [Front]	0	0,4	0,9	1	3,076	0	1	490,9	1E09	default = shaft end not exposed (k1 = 0)
Shaft Extension (End) [Rear]	15	0,4	0,9	1	3,076	31,5	1	490,9	64,68	

Check Data

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry | Winding | Input Data | Calculation | Temperatures | Output Data | Sensitivity | Scripting | Flow

Cooling | Losses | Materials | Interfaces | Radiation | Natural Convection | Housing Water Jacket | End Space | Settings | Material database

Models | Geometry | Winding | Cooling | Losses | Preferences | End Space | Convergence | Transient | Miscellaneous | Notes

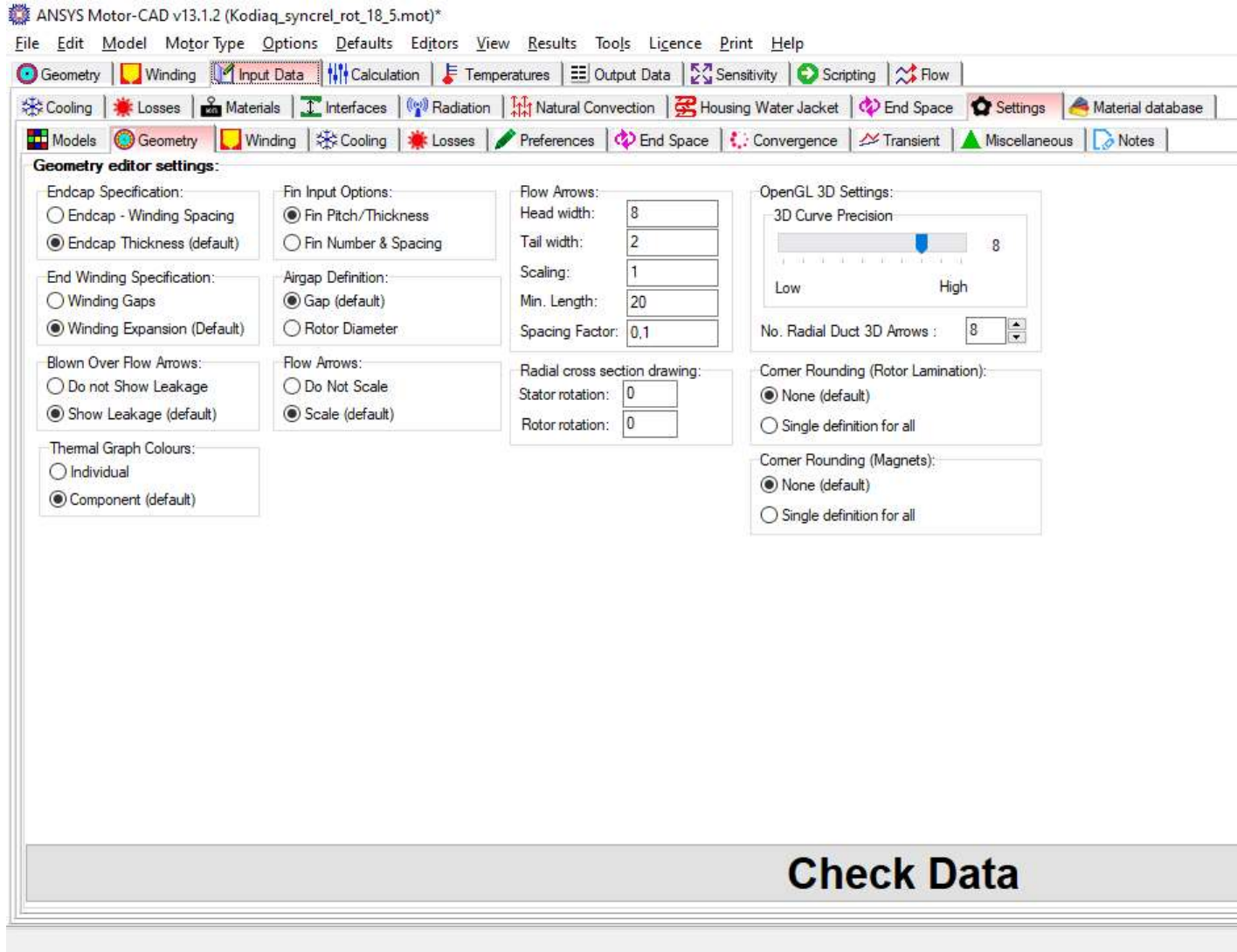
Model settings:

Airgap Model: <input type="radio"/> Conduction Only <input checked="" type="radio"/> Conduction & Convection <input checked="" type="checkbox"/> Include Rt(Endcap) Radial <input checked="" type="checkbox"/> Include Rt(Endcap) Axial <input checked="" type="checkbox"/> Include Fin Efficiency	Axial Slices: <input checked="" type="radio"/> 1 Slice <input type="radio"/> 3 Slices <input type="radio"/> 5 Slices <input type="radio"/> 7 Slices <input type="radio"/> 9 Slices	Magnet Model: <input checked="" type="radio"/> Normal (default) <input type="radio"/> Distributed Loss Interior U-Rotor Thermal Circuit: <input checked="" type="radio"/> Original <input type="radio"/> Improved (Experimental)	FEA Model: Slot Fixed Temperature: <input checked="" type="radio"/> Housing and Stator Surface (default) <input type="radio"/> Housing <input type="radio"/> Stator Surface <input type="radio"/> None Pole Fixed Temperature: <input checked="" type="radio"/> Shaft and Rotor Surface (default) <input type="radio"/> Shaft <input type="radio"/> Rotor Surface <input type="radio"/> None Radial / Axial Node Sizing Node Radius: <input type="text" value="0,2"/>
--	--	---	---

Check Data

Model settings

Příloha B



Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Models Geometry Winding Cooling Losses Preferences End Space Convergence Transient Miscellaneous Notes

Winding Settings:

Wedge Model:
 Conductive (default)
 Non conductive

Liner:
 Liner Layers: Single Layer
 Liner Data

Active-End winding thermal resistance multipliers:
 Rt[Active- Front EWdg] Multiplier: 1
 Rt[Active- Rear EWdg] Multiplier: 1

Winding Termination:
 Termination [F] Termination [R]
 Termination Wires [F]: 3 Termination Wires [R]: 3
 Termination Wire Diameter [F]: 2 Termination Wire Diameter [R]: 2
 Termination Wire Length [F]: 200 Termination Wire Length [R]: 200

Winding Model:
 Cuboidal Model k Value Definition:
 Automatic (default)
 User Defined

Active Winding:
 Effective Radial k Value: 1,644
 Effective Tangential k Value: 1,644
 Effective Axial k Value: 319,3

Front End Winding:
 Effective Radial k Value: 1,644
 Effective Tangential k Value: 1,644
 Effective Axial k Value: 319,3

Rear End Winding:
 Effective Radial k Value: 1,644
 Effective Tangential k Value: 1,644
 Effective Axial k Value: 319,3

Thermal Conductivity Model:
 Conductor, Insulation, Impreg (default)
 Conductor only

Cuboid Sizes:
 Cuboid Size:
 Automatic (old method)
 Custom (user values)
 Automatic (default)
 Skewed distribution
 Number of Cuboids: 4

Cuboid	Width	Height
Units	mm	mm
1		8,37943
2	3,17498	2,09486
3	1,58749	2,09486
4	1,58749	2,09486

Winding Editor View:
 Show Conductors
 Automatic Separation
 Automatic Placement Settings:
 Bitmap Size Factor: 1
 Position Checking: 5

Conductor Positions:
 Save Conductor Positions Data In .mot File
 External Conductor Positions Data:
 File: No Datafile selected
 Load Data Save Data Save Data As

Form Wound conductor placement:
 Even spacing
 Custom Separation (default)

Insulation Lifetime Calculation:
 Method:
 None (default)
 Montsinger (preferred)
 Dakin
 Dakin and Montsinger

Lifetime Points:
 Ref Temp1: 180
 Ref Temp1 Lifetime [hours]: 2E4
 Ref Temp2: 190

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry | Winding | Input Data | Calculation | Temperatures | Output Data | Sensitivity | Scripting | Flow

Cooling | Losses | Materials | Interfaces | Radiation | Natural Convection | Housing Water Jacket | End Space | Settings | Material database

Models | Geometry | Winding | Cooling | Losses | Preferences | End Space | Convergence | Transient | Miscellaneous | Notes

Cooling settings:

Cooling Circuit Connections:

Proportion of flow down slot:

TVent airgap inlet || Slot WJ inlet

Proportion of flow down slot:

TVent outlet -> Housing WJ inlet

Shaft Spiral Groove Outlet -> Rotor WJ Inlet

Rotor WJ Outlet -> Spray Cooling Inlet

Slot WJ Outlet -> Housing WJ Inlet

Housing WJ Outlet -> Slot WJ Inlet

Through Ventilation Model:

Rotor Duct heat transfer calculation:

Rotating Channel Correlation - Morris (default)

Rotating Channel Correlation - Morris_Woods

Channel Correlation

Duct flow condition:

Developing flow (default)

Fully developed flow

TVent Shaft cooling:

Shaft Overhang node (default)

Shaft node next to bearings

Airgap Laminar Flow with Vortices Correlation:

Tachibana and Fukui (default)

Simmers and Coney

Airgap Turbulent Flow Correlation:

Kuzay and Scott (default)

Childs and Turner

Airgap Turbulent Flow with Vortices Correlation:

Gazley (default)

Kosterin and Finatov

Ambient Temperature:

Single Ambient (default)

Separate Ambient for convection and radiation

Transition limit for Laminar to Turbulent flow:

Transition upper limit:

Transition limit for Non-Vortex to Vortex flow:

Transition Lower Limit:

Taylor number

Taylor and Reynolds numbers (default)

Transition upper limit multiplier:

Wet Rotor Fluid properties:

Based on average fluid temperature (default)

Based on fluid inlet temperature

TVent Fluid properties in airgap:

Based on average airgap temperature

Based on fluid inlet temperature (default)

Lamination-Housing duct cooling nodes:

Housing and Lamination (default)

Housing only

Bidirectional Flow Layout:

Simple (Default)

Full

Flow Resistance Tolerance:

Tolerance Value:

Spray cooling correlation:

Submerged Jet

Free-Surface Jet (default)

How the transition limit for non-vortex to vortex airgap flow is calculated [VortexTransition]

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Models Geometry Winding Cooling Losses Preferences End Space Convergence Transient Miscellaneous Notes

General Bearings AC Winding

General Loss Settings:

Windage Losses:
Source method:
 Direct user input (default)
 Automatic calculation
Calculation multiplier:

Stator Copper Losses:
Copper Losses Split Between Active and Endwindings:
 Automatic split (default)
 User specified split
Endwinding Losses Split Between Front and Rear:
Front endwinding proportion:
Active proportion:
Rear endwinding proportion:
Stator Copper Loss Temperature Variation:
 Based on average winding temperature (default)
 Based on local winding temperatures

Rotor Cage Losses:
Loss Split Between Bars and Endrings:
 Automatic split (default)
 User specified split
Front ending proportion:
Rotor bars proportion:

Transient Loss Calculation:
Loss Calculation Method:
 Lab Model (recommended)
 Loss Variation With Temperature and Load Model
Loss Variation with Temperature & Load:
Iron Loss Flux To Power Ratio:

Resistivity:
Stator copper temperature coefficient of resistivity:
Stator copper (Freq Comp) temperature coefficient of resistivity:
Rotor cage temperature coefficient of resistivity:

Stray Load Temperature Coefficients of Resistivity:
Stator Iron coefficient:
Rotor Iron coefficient:
Stator Copper coefficient:
Rotor Copper coefficient:

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Material database

Models Geometry Winding Cooling Losses Preferences End Space Convergence Transient Miscellaneous Notes

General Bearings AC Winding

Bearing Losses:

Location:

Source method: Calculation speed: Loss Multiplier:

Speed	Temperature	Losses
rpm	°C	kW
0	20	0
0	40	0
0	80	0
0	140	0
0	200	0
1000	20	0,8
1000	40	0,6
1000	80	0,5
1000	140	0,4
1000	200	0,3
5000	20	10
5000	40	6,5
5000	80	4
5000	140	3
5000	200	2,5

Add a new data point: Delete the selected point:

Bearing Losses

Losses [kW]

Temperature [°C]

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Models Geometry Winding Cooling Losses Preferences End Space Convergence Transient Miscellaneous Notes

General Bearings AC Winding

AC Winding Losses:

AC Winding Losses:
AC Winding Loss Model:
 None (default)
 Hybrid FEA
 Full FEA

Bundle Dimensions:
 Include Bundle Effect
Bundle Aspect ratio:

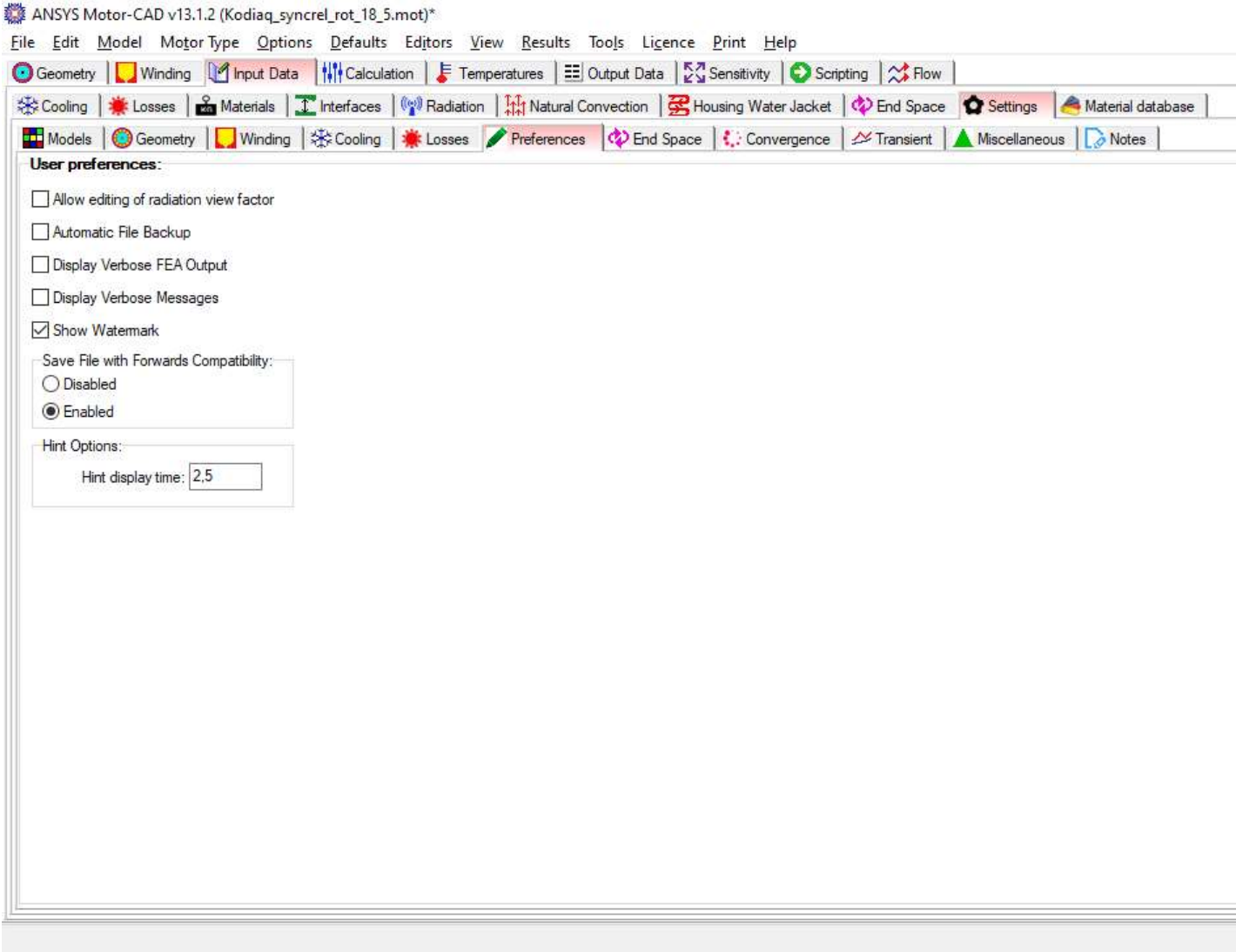
Hybrid Model:
Adjustment Factor:

Variation with temperature:
Temperature Exponent:

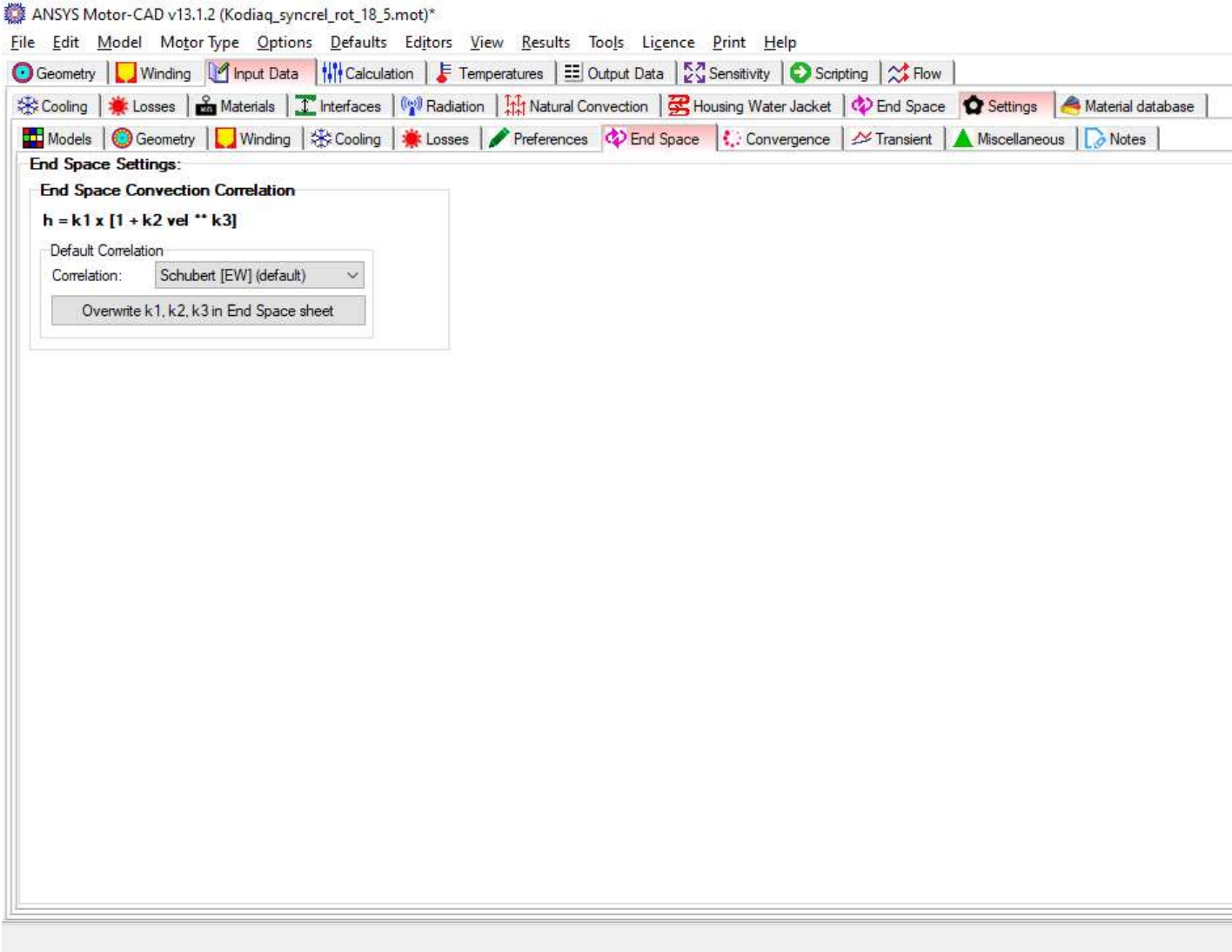
AC Winding Losses:

Cuboid No.	AC Loss Proportion
1	0,309069
2	0,243284
3	0,173531
4	0,274115

Příloha B



Příloha B



Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Models Geometry Winding Cooling Losses Preferences End Space Convergence Transient Miscellaneous Notes

Convergence settings:

Steady State Convergence:
 dT [Percent]
 dT [Value]

Steady State Max Iterations:

Steady State Min Iterations:

Steady State Max Convergence Error [dT]:

Number of ramp steps:

Steady State iterations before averaging:

Steady State cycles at each average:

Steady State Iteration Average Cycles:

Averaging Method:
 Automatic (Default)
 Forced
 Disabled

Steady State Power Flow:
 Include Power Flow Error

Transient Convergence:
Absolute Error:
Relative Error:
Minimum Tolerance:

Transient Iterations:
Transient Max Iterations:
 Cancel Transient at Max Iterations limit

End Space Fluid Flow:
Maximum change rate:

Fluid Paths convergence:
Fluid Compensation Factor:
 Enabled (default)
 Disabled

Max compensation factor:
Scale factor:

Temperature Integration Variation:
Settings:
 Disabled
 Enabled
 Automatic (Default)
 Allowed Variation

Allowed Time Variation
Allowed Temperature Variation

Show results during solving:
 Show updated results during solving

Check Data

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Models Geometry Winding Cooling Losses Preferences End Space Convergence Transient Miscellaneous Notes

Transient settings:

Transient Fluid Nodes:
 Include Capacitance
 Neglect Capacitance (Default)

Transient Graph Update:
 Dynamic update enabled
Periods per update:

Transient Running Conditions:
 Housing WJ Flow Removed

Capacitance Adjustment
DAE Minimum Capacitance:
 Calculated Values (default)
 Limit Minimum Values
Minimum Capacitance:

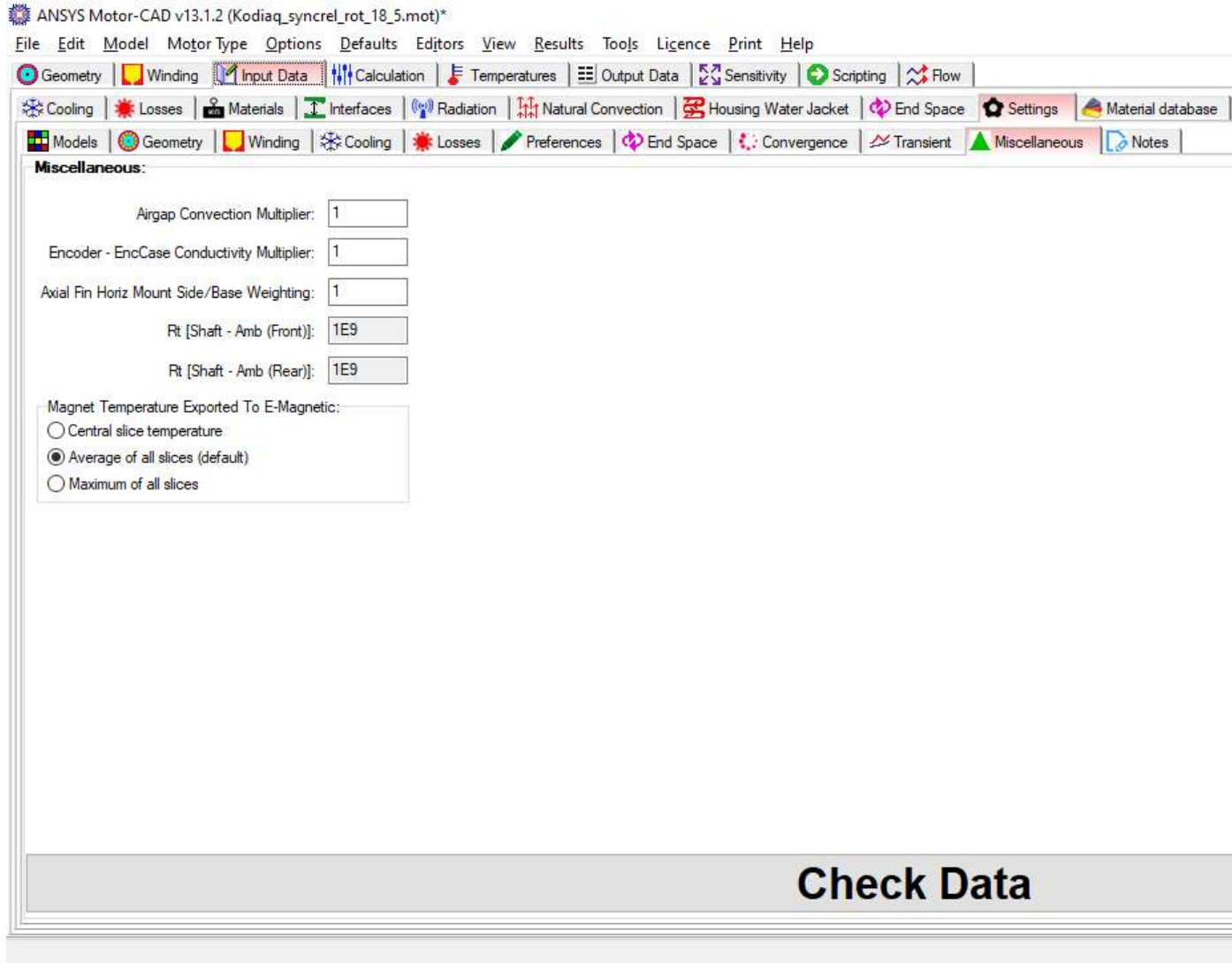
Transient Results File Analysis:
 Analysis Enabled
File:
Select File
Selected Period:

Data Logging:
 Data Logging Enabled

Check Data

Model settings

Příloha B



Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Air Solids Fluids

Air Property Data:

Altitude [US Standard Atmosphere]:
Altitude [m] Ambient [°C]
Pressure [Pa] Density [kg/m³]

Ambient Temperature: Air Property Temperature:

Conductivity [W/m/°C]	0,02723	Conductivity [W/m/°C]	0,03171
Density [kg/m³]	1,127	Density [kg/m³]	0,9461
Specific Heat [J/kg/°C]	1007	Specific Heat [J/kg/°C]	1011
Dynamic Viscosity [kg/m/s]	1,904E-05	Dynamic Viscosity [kg/m/s]	2,175E-05
Kinematic Viscosity [m²/s]	1,689E-05	Kinematic Viscosity [m²/s]	2,298E-05
Prandtl Number (Pr)	0,7039	Prandtl Number (Pr)	0,6933
Pressure [Pa]	1,013E05	Pressure [Pa]	1,013E05

Check Data

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Air Solids Fluids

Properties of Solids

Solids Database:

Permanently add, remove and edit solids:

Compare Materials

Physical Electrical

Material Name	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Notes
Units	W/m/°C	J/kg/°C	kg/m³	
30DH	30	460	7650	Autogenerated 10/03/2020 from
Aluminium (Alloy 195 Cast)	168	833	2790	
Aluminium (Cast)	180	963	2950	
Amon 7 3.25% Si	30	450	7650	
Brass (70% Cu, 30% Zn)	111	385	8522	
Carbon Fibre	0.59	1000	1600	
Copper (Annealed)	401	385	8933	
Copper (Pure)	401	385	8933	
Electrographitic EG362	200	700	1600	
Epoxy	0.22	1500	1200	
FB3X	4	700	4800	
Hiperco 50 (0.15mm)	29.8	460	8110	
HS 50	47	420	8150	
Inconel 718	11.4	435	7800	
Iron (Cast)	52	420	7272	
Iron (Pure)	80	447	7870	
Iron (Silicon 1%)	42	460	7769	
Iron (Silicon 2%)	28	460	7600	
Iron (Silicon 5%)	19	460	7417	
JFE_10JNEX900	30	450	7490	
JFE_20JNEH1200	30	450	7650	Autogenerated 26/03/2020 from F:\Dokumenty\Motor-Cad\Diplomka\Kodiaq_new.mot
JFE_35JNE230	30	450	7650	Autogenerated 16/04/2020 from F:\Dokumenty\Motor-Cad\Diplomka\Kodiaq_16_4.mot
LORD CoolThem EP-2000	1.9	733	2720	
LORD CoolThem EP-3500	3.5	733	2720	Autogenerated 16/04/2020. Solid database entry from mot file F:\Dokumenty\Motor-Cad\Diplomka\Kodiaq_16_4.mot. Solid
M1000-65A	30	460	7650	
M19 24 Gauoe Steel	28	460	7800	

4 leden 2021 www.motor-design.com

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry
 Winding
 Input Data
 Calculation
 Temperatures
 Output Data
 Sensitivity
 Scripting
 Flow

Cooling
 Losses
 Materials
 Interfaces
 Radiation
 Natural Convection
 Housing Water Jacket
 End Space
 Settings
 Material database

Air Solids Fluids

Properties of Solids

Solids Database:
 c:\ANSYS_Motor-CAD\13_1_2\Motor-CAD Data\materials\si

Select Database Create Database

Permanently add, remove and edit solids:

Add Delete Rename

Copy Import Export

Compare Materials

Select Material 1

Select Material 2

Compare Materials

Physical Electrical

Material Name	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Notes
Units	W/m ² /C	J/kg/°C	kg/m ³	
M235-35A	30	460	7650	
M250-35A	30	460	7650	
M350-50A	30	460	7650	
M400-50A	30	460	7650	
M43	28	460	7800	
M470-50A	30	460	7650	
M530-65A	30	460	7650	
M800-50A	30	460	7650	
Mild Steel	25	450	7800	
MQP-10-8.5HD-20180	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-11-8-20222	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-12-8HD-20175	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-13-9-20063	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-13-9HD-20179	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-14-12-20000	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-15-7-20065	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-15-9HD-20178	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-B+10118	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-B+20056	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-B-20172	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
MQP-B-20173	2	420	6000	Catalogue data (www.magnequench.com)
N10 0.1 strip	27	460	7650	
N20 0.2 strip	27	460	7650	
N30EH	7,6	460	7500	Catalogue data (www.amoldmagnetics.com)
N30UH	7,6	460	7500	
N35UH	7,6	460	7500	

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry
 Winding
 Input Data
 Calculation
 Temperatures
 Output Data
 Sensitivity
 Scripting
 Flow

Cooling
 Losses
 Materials
 Interfaces
 Radiation
 Natural Convection
 Housing Water Jacket
 End Space
 Settings
 Material database

Air Solids **Fluids**

Properties of Solids

Solids Database:
 c:\ANSYS_Motor-CAD\13_1_2\Motor-CAD Data\materials\si

Select Database Create Database

Permanently add, remove and edit solids:

Add Delete Rename

Copy Import Export

Compare Materials

Select Material 1

Select Material 2

Compare Materials

Physical **Electrical**

Material Name	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density
Units	W/m/°C	J/kg/°C	kg/m³
N38SH	6,4	460	7650
N38UH	7,6	460	7500
N42SH	7,6	460	7500
N42UH	7,6	460	7500
N48H_AM	6,4	460	7650
Nomex 410	0,14	1300	1400
Nylon	0,24	1600	1100
Pemendur 24	47	295	7950
Pemendur 49	25	420	8150
Plastic (ABS)	0,25	1260	1014
Polycarbonate (PC)	0,29	1250	1200
POLYCOP 0.3% Si	54	460	7650
Polyethylene (PE)	0,33	2200	940
Polimide (PI)	0,35	1130	1430
Polypropylene (PP)	0,17	1900	905
Polystyrene (PS)	0,1	1350	1040
Polyvinylchloride (PVC)	0,16	1200	1600
PTFE (Teflon)	0,25	1050	2200
Recoma 28	10	350	8300
Recoma 32	10	350	8300
Rotelloy 3	25	420	8150
Rotelloy 5	25	420	8150
Rubber (Hard)	0,16	2010	1190
Rubber (Soft)	0,13	2010	1100
Stahl 37	25	450	7800
Stainless Steel 302	15,1	480	8055

Enter material properties

Príloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Air Solids Fluids

Properties of Solids

Solids Database:
c:\ANSYS_Motor-CAD\13_1_2\Motor-CAD Data\materials\si

Select Database Create Database

Permanently add, remove and edit solids:

Add Delete Rename

Copy Import Export

Compare Materials

Select Material 1

Select Material 2

Compare Materials

Physical Electrical

Material Name	Thermal Conductivity	Specific Heat	Density	Notes
Units	W/m ² /°C	J/kg/°C	kg/m ³	
Polystyrene (PS)	0.1	1350	1040	
Polyvinylchloride (PVC)	0.16	1200	1600	
PTFE (Teflon)	0.25	1050	2200	
Recoma 28	10	350	8300	
Recoma 32	10	350	8300	
Rotelloy 3	25	420	8150	
Rotelloy 5	25	420	8150	
Rubber (Hard)	0.16	2010	1190	
Rubber (Soft)	0.13	2010	1100	
Stahl 37	25	450	7800	
Stainless Steel 302	15,1	480	8055	
Stainless Steel 304	14,9	477	7900	
Stainless Steel 316	13,4	468	8238	
Stainless Steel 347	14,2	480	7978	
Stainless Steel 410	25	460	7770	
Teflon	0,22	1040	2200	
Vacodym 247AP	10	450	7700	Autogenerated 26/03/2020 from F:\Dokumenty\Motor-Cad\Diplomka\Kodiaq_new.mot
VACODYM 776 AP	10	450	7600	Autogenerated 02/04/2020 from F:\Dokumenty\Motor-Cad\Diplomka\Kodiaq_2_4.mot
VACODYM 974 AP	10	450	7600	Autogenerated 16/04/2020 from F:\Dokumenty\Motor-Cad\Diplomka\Kodiaq_16_4.mot
VACOFLEX 50 0.20 strip	30	460	8120	
VACOFLEX 50 0.35 strip	30	460	8120	
Vinyl Fenite	4	700	4800	
Y32	4	700	4800	
Y34	4	700	4800	
Zinc (Pure)	116	389	7140	

Enter material properties

4 leden 2021 www.motor-design.com

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Air Solids Fluids

Properties of Solids

Solids Database:
c:\ANSYS_Motor-CAD\13_1_2\Motor-CAD Data\materials\si

Select Database Create Database

Permanently add, remove and edit solids:

Add Delete Rename

Copy Import Export

Material Name
30DH
Aluminium (Alloy 195 Cast)
Aluminium (Cast)
Amon 7 3.25% Si
Brass (70% Cu, 30% Zn)
Carbon Fibre
Copper (Annealed)
Copper (Pure)
Electrographitic EG362
Epoxy
FB3X
Hiperco 50 (0.15mm)
HS 50
Inconel 718
Iron (Cast)
Iron (Pure)
Iron (Silicon 1%)
Iron (Silicon 2%)
Iron (Silicon 5%)

Physical Electrical

Electrical properties:

Aluminium (Alloy 195 Cast) (General)

Resistivity at 20°C: 2,82E-8

Temperature coefficient of resistivity: 0,00375

Electrical properties:

Copper (Pure) (General)

Resistivity at 20°C: 1,724E-8

Temperature coefficient of resistivity: 0,003862

JFE_35JNE230 (Steel)

Resistivity at 20°C: 5,5E-7

Temperature coefficient of resistivity: 0

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Air Solids Fluids

Properties of Fluids

Fluids Database:
c:\ANSYS_Motor-CAD\13_1_2\Motor-CAD Data\materials\fluids.mdb

Select Database
Create new Database

Create, copy and delete fluids:

Add Fluid
Copy Fluid
Delete Fluid

Fluid Name	Notes
Air at sea level	Holman data
ATF134 fluid	Heat Transfer Fluid
Brayco Micronic 756	Aviation Hydraulic Fluid - meets MIL-H-5606G
Dynalene HF-LO	Heat Transfer Fluid
EGW 50/50	Ethylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
EGW 60/40	Ethylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
Engine Oil (Unused)	Holman data
Mobil Jet Oil II	Gas Turbine Lubricant - meets MIL-PRF-23699
Paratherm LR	Low Range Heat Transfer Fluid
PGW 50/50	Propylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
PGW 60/40	Propylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
Skydrol 500 B-4	Aviation Hydraulic Fluid
Skydrol LD-4	Aviation Hydraulic Fluid
UCON HTF500	Heat Transfer Fluid
Water	Pure Water

Conductivity Specific Heat Density Kinematic Viscosity Volumetric Expansion Coefficient

Add a new data point:
Add Conductivity Data Point

Permanently Delete the selected point:
Delete Conductivity Data Point

Temperature	Thermal Conductivity
°C	W/m°C
-25	0,35
0	0,37
25	0,39
50	0,405
75	0,415
100	0,42

Thermal Conductivity for EGW 50/50

4 leden 2021 www.motor-design.com

Príloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Air Solids **Fluids**

Properties of Fluids

Fluids Database:
 c:\ANSYS_Motor-CAD\13_1_2\Motor-CAD Data\materials\fluids.mdb

Select Database
 Create new Database

Create, copy and delete fluids:

Add Fluid
 Copy Fluid
 Delete Fluid

Fluid Name	Notes
Air at sea level	Holman data
ATF134 fluid	Heat Transfer Fluid
Brayco Micronic 756	Aviation Hydraulic Fluid - meets MIL-H-5606G
Dynalene HF-LO	Heat Transfer Fluid
EGW 50/50	Ethylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
EGW 60/40	Ethylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
Engine Oil (Unused)	Holman data
Mobil Jet Oil II	Gas Turbine Lubricant - meets MIL-PRF-23699
Paratherm LR	Low Range Heat Transfer Fluid
PGW 50/50	Propylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
PGW 60/40	Propylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
Skydrol 500 B-4	Aviation Hydraulic Fluid
Skydrol LD-4	Aviation Hydraulic Fluid
UCON HTF500	Heat Transfer Fluid
Water	Pure Water

Conductivity **Specific Heat** Density Kinematic Viscosity Volumetric Expansion Coefficient

Add a new data point:
 Add Specific Heat Data Point

Permanently Delete the selected point:
 Delete Specific Heat Data Point

Temperature	Specific Heat
°C	J/kg/°C
-25	3000
100	3700

Specific Heat Capacity for EGW 50/50

4 leden 2021 www.motor-design.com

Príloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Air Solids **Fluids**

Properties of Fluids

Fluids Database:
 c:\ANSYS_Motor-CAD\13_1_2\Motor-CAD Data\materials\fluids.mdb
 Select Database
 Create new Database

Create, copy and delete fluids:
 Add Fluid
 Copy Fluid
 Delete Fluid

Fluid Name	Notes
Air at sea level	Holman data
ATF134 fluid	Heat Transfer Fluid
Brayco Micronic 756	Aviation Hydraulic Fluid - meets MIL-H-5606G
Dynalene HF-LO	Heat Transfer Fluid
EGW 50/50	Ethylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
EGW 60/40	Ethylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
Engine Oil (Unused)	Holman data
Mobil Jet Oil II	Gas Turbine Lubricant - meets MIL-PRF-23699
Parathem LR	Low Range Heat Transfer Fluid
PGW 50/50	Propylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
PGW 60/40	Propylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
Skydrol 500 B-4	Aviation Hydraulic Fluid
Skydrol LD-4	Aviation Hydraulic Fluid
UCON HTF500	Heat Transfer Fluid
Water	Pure Water

Conductivity Specific Heat **Density** Kinematic Viscosity Volumetric Expansion Coefficient

Add a new data point:
 Add Density Data Point

Permanently Delete the selected point:
 Delete Density Data Point

Temperature	Density
°C	kg/m ³
-20	1100
0	1088
20	1076
100	1032

Density for EGW 50/50

4 leden 2021 www.motor-design.com

Příloha B

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Geometry Winding Input Data Calculation Temperatures Output Data Sensitivity Scripting Flow

Cooling Losses Materials Interfaces Radiation Natural Convection Housing Water Jacket End Space Settings Material database

Air Solids **Fluids**

Properties of Fluids

Fluids Database:
 c:\ANSYS_Motor-CAD\13_1_2\Motor-CAD Data\materials\fluids.mdb
 Select Database
 Create new Database

Create, copy and delete fluids:
 Add Fluid
 Copy Fluid
 Delete Fluid

Fluid Name	Notes
Air at sea level	Holman data
ATF134 fluid	Heat Transfer Fluid
Brayco Micronic 756	Aviation Hydraulic Fluid - meets MIL-H-5606G
Dynalene HF-LO	Heat Transfer Fluid
EGW 50/50	Ethylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
EGW 60/40	Ethylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
Engine Oil (Unused)	Holman data
Mobil Jet Oil II	Gas Turbine Lubricant - meets MIL-PRF-23699
Parathem LR	Low Range Heat Transfer Fluid
PGW 50/50	Propylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
PGW 60/40	Propylene-Glycol/Water - E.Cooling Feb09
Skydrol 500 B-4	Aviation Hydraulic Fluid
Skydrol LD-4	Aviation Hydraulic Fluid
UCON HTF500	Heat Transfer Fluid
Water	Pure Water

Conductivity Specific Heat Density **Kinematic Viscosity** Volumetric Expansion Coefficient

Add a new data point:
 Add Viscosity Data Point

Permanently Delete the selected point:
 Delete Viscosity Data Point

Temperature	Kinematic Viscosity
°C	m ² /s
-20	2E-5
0	7,81E-6
20	3,72E-6
40	2,25E-6
60	1,42E-6
80	9,6E-7
100	7,75E-7

Kinematic Viscosity for EGW 50/50

4 leden 2021 www.motor-design.com

Příloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle Operating Point Calibration Settings

Model Options Loss Model

Saturation Model:

Model Type:

Fixed Inductance Model

Saturation Model (Single Step)

Saturation Model (Full Cycle)

Model Resolution:

Coarse (15 points)

Fine (30 points)

Loss Model:

Model Type:

Neglect

FEA Map (recommended)

Custom

Machine Parameters:

Pole Number:

Slot Number:

Winding Connection:

Star Connection (default)

Delta Connection

Fixed Inductance Model:

Magnet Flux Linkage (Am):

D-Axis Inductance (Ld):

Q-Axis Inductance (Lq):

Short-Circuit Current (Isc):

Saturation Model:

Saturation Model Goodness (%):

Model Status:

Model	Build Date	Method	Max Current
			A (peak)
Saturation	16-04-20 18:08	30 points full cycle	620
Iron Loss	16-04-20 18:08	FEA Map	620
AC Loss	16-04-20 18:08	FEA Map	620
Magnet Loss	16-04-20 18:08	FEA Map	620

Model Build:

Parameters:

Maximum speed:

Max stator current (Peak):

Max stator current (RMS):

Maximum rotor current:

Build:

Saturation Model

Loss Model

Build Model

Cancel Model Build

Motor-CAD Model Loaded Successfully

Příloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle Operating Point Calibration Settings

Model Options **Loss Model**

Stator Copper Loss:

Calculation Type:

DC Only

DC + AC (User)

DC + AC (FEA single point)

DC + AC (FEA Map)

DC Resistance / Phase:

AC Loss Model:

Reference Speed:

Rac / Rdc:

Frequency Scaling:

Magnet Loss:

Calculation Type:

Neglect

User Defined

OC + SC (FEA)

FEA Map

User-Defined Model:

On Load Loss:

No Load Loss:

Current:

Speed Scaling Coefficient:

Reference Speed:

Iron Loss:

Calculation Type:

Neglect

OC + SC (User)

OC + SC (FEA)

FEA Map

OC + SC Model:

Hysteresis: Ah: Bh:

Eddy: Ae: Be:

Sleeve Loss:

Calculation Type:

Neglect

FEA Map

Banding Loss:

Calculation Type:

Neglect

FEA Map

Model Status:

Model	Build Date	Method	Max Current
			A (peak)
Saturation	16-04-20 18:08	30 points full cycle	620
Iron Loss	16-04-20 18:08	FEA Map	620
AC Loss	16-04-20 18:08	FEA Map	620
Magnet Loss	16-04-20 18:08	FEA Map	620

Model Build:

Parameters:

Maximum speed:

Max stator current (Peak):

Max stator current (RMS):

Maximum rotor current:

Build:

Saturation Model

Loss Model

Build Model

Cancel Model Build

Motor-CAD Model Loaded Successfully

Příloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle Operating Point Calibration Settings

General Custom Losses

Drive:

DC Bus Voltage: 400

Maximum Modulation Index: 1

Operating Mode:

Motor

Generator

Motor / Generator

Control Strategy:

Maximum Torque/Amp

Maximum Efficiency

Constant Phase Advance = 0

User Defined

Speed	Phase Advance
0	0
1000	15
2000	30

DC Current Limit:

None

Current Limit

Maximum DC Current: 80

Losses:

Iron Loss Build Factors:

Stator: 1 Rotor: 1

Hysteresis: 1 Eddy: 1

Magnet Loss Build Factor: 1

Mechanical Loss:

Calculation Type:

Neglect

User Defined

Friction Loss: 0,15

Friction Loss Exponent: 1

Windage Loss: 0

Windage Loss Exponent: 2

Reference Speed: 1,2E4

Scaling:

Turns / Coil:

Model build reference: 7

Resistance reference: 7

Calculation: 7

Stator Winding Temperature:

Reference temperature: 168

Calculation temperature: 168

Temp. Coeff. Resistivity: 0.003862

AC Loss Temperature Scaling:

Reference temperature: 70

Temperature Exponent: 0,5

Magnet Temperature:

Reference temperature: 70

Calculation temperature: 150

Magnet Flux Coefficient: -0,1011

Motor-CAD Model Loaded Successfully

Příloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle Operating Point Calibration Settings

Calculation:

Calculation Type:

- Maximum Torque/Speed Curve
- Efficiency Map
- Torque Grid

Options:

- Smooth Map
- Power Limit

Max Power: 0

Speed:

Maximum: 1,2E4

Step: 1000

Minimum: 0

Current:

Maximum (Peak): 620

Maximum (RMS): 438,4

No. of Increments: 24

Minimum (Peak): 0

Minimum (RMS): 0

Torque:

Maximum: 350

No. of Increments: 35

Minimum: 0

Calculation Status:

Calculate Emagnetic Performance

Cancel Calculation

Load Results Viewer

Motor-CAD Model Loaded Successfully

Příloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle Operating Point Calibration Settings

Calculation:

Thermal Map Type:
 Envelope
 Full Map

Thermal Calculation:
 Steady State
 Transient

Thermal Limit:
 Stator Winding Only
 Stator Winding + Magnet

Maximum Winding Node:
 Average
 Hotspot

Initial Current Estimate:
Stator Current (Peak):
Stator Current (RMS):
Rotor Current:

Speed:
Maximum:
Step:
Minimum:

Maximum Temperatures:
Stator Winding:
Magnet:

Max. Current:
 Limit on Max. Current
Maximum (Peak):
Maximum (RMS):

Calculation Status:

Calculate Thermal Performance

Cancel Calculation

Load Results Viewer

Motor-CAD Model Loaded Successfully

Príloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle Operating Point Calibration Settings

Calculation Duty Cycle Definition

Duty Cycle:

Duty Cycle Type:
 Custom Duty Cycle
 Automotive Drive Cycle

Automotive Drive Cycle:
WLTP Class 3

Thermal Transient Coupling:
 No coupling (default)
 Losses → Thermal
 Coupled Transient Solution

Duty Cycle Data:
Number of Cycles: 10
Transient Period: 1800
Number of Points: 1800
RMS Torque: 46,83
RMS Torque [pu]: 0,1334
Average Speed: 3292

Calculation Status:

Calculate Duty Cycle Performance

Cancel Calculation

Export Duty Cycle To Thermal Model

Load Results Viewer

Vehicle Model:

Mass:	2000	Frontal Area (m ²):	2,76	Wheel Radius (m):	0,3
Rolling Resistance Coefficient:	0,015	Drag Coefficient:	0,33	Mass Correction Factor:	1,1
Air Density:	1,225	Final Drive Ratio:	8	Motoring Torque Ratio:	1
Generating Torque Ratio:	1	Max. Torque: <input type="checkbox"/> 500	Max. Speed: <input type="checkbox"/> 2E4		

Motor-CAD Model Loaded Successfully

Příloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle Operating Point Calibration Settings

Calculation Duty Cycle Definition

Duty Cycle Data:

Period	Elapsed Time	Time	Points	Torque	Speed [Start]	Speed [End]
	Units	secs	secs	Nm	rpm	rpm
1	1	1	1	0	0	0
2	2	1	1	0	0	0
3	3	1	1	0	0	0
4	4	1	1	0	0	0
5	5	1	1	0	0	0
6	6	1	1	0	0	0
7	7	1	1	0	0	0
8	8	1	1	0	0	0

Duty Cycle Control:

Add Period Remove Period

Duty Cycle Definition:
 Torque - Speed
 Loss - Speed
 Current - Speed

Duty Cycle Input Type:
 pu Value
 Shaft Torque: 351,2

Drive During Period:
 Fixed Variable

DC Bus Voltage:
 Fixed Variable

External Duty Cycle Data:
 File: No File Selected
 Load Data Save Data Clear Data
 Save Duty Cycle Data in .mot file

Motor-CAD Model Loaded Successfully

4 leden 2021 www.motor-design.com

Příloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle **Operating Point** Calibration Settings

Calculation:

Input:

Definition:

Torque

Maximum Current

Maximum Temperature

Speed: 4700

Torque: 148,7

Linkage Options:

Lab ↔ Thermal Coupling:

No coupling (default)

Losses → Thermal

Iterate to Converged Solution

Lab ↔ E-Magnetic Coupling:

No coupling (default)

Operating Point → E-Magnetic

Calculate Operating Point

Cancel Calculation

Maximum Currents:

Stator Current (Peak): 620

Stator Current (RMS): 438,4

Rotor Current: 6

Maximum Temperatures:

Stator Winding: 180

Magnet: 150

Change Thermal Settings

Variable	Value	Units	Variable	Value	Units
Shaft Speed	4700	rpm	Total Loss	5,609	kW
Shaft Torque	215,9	Nm	Stator Copper Loss	5,174	kW
Shaft Power	106,3	kW	DC Stator Copper Loss	5,047	kW
Efficiency	94,99		AC Stator Copper Loss	0,127	kW
----			----		
Stator Phase Current (peak)	380,8	Amps	Iron Loss	0,3752	kW
Stator Line Current (peak)	380,8	Amps	Magnet Loss	0,001079	kW
DC Terminal Current	279,7	Amps	Mechanical Loss	0,05875	kW
Phase Voltage (peak)	215,7	Volts	Windage Loss	0	kW
Line Voltage (peak)	373,6	Volts	Friction Loss	0,05875	kW
Phase Advance	47,47	EDeg	----		
----			Electromagnetic Power	106,7	kW
Flux Linkage D	60,71	mVs	Electromagnetic Torque	216,8	Nm
Flux Linkage Q	201,9	mVs	Magnet Torque	98,27	Nm
Magnet Flux Linkage	127,2	mVs	Reluctance Torque	118,5	Nm
D axis Inductance	0,2371	mH	Terminal Power	111,9	kW
Q axis Inductance	0,7841	mH	Power Factor	0,9082	

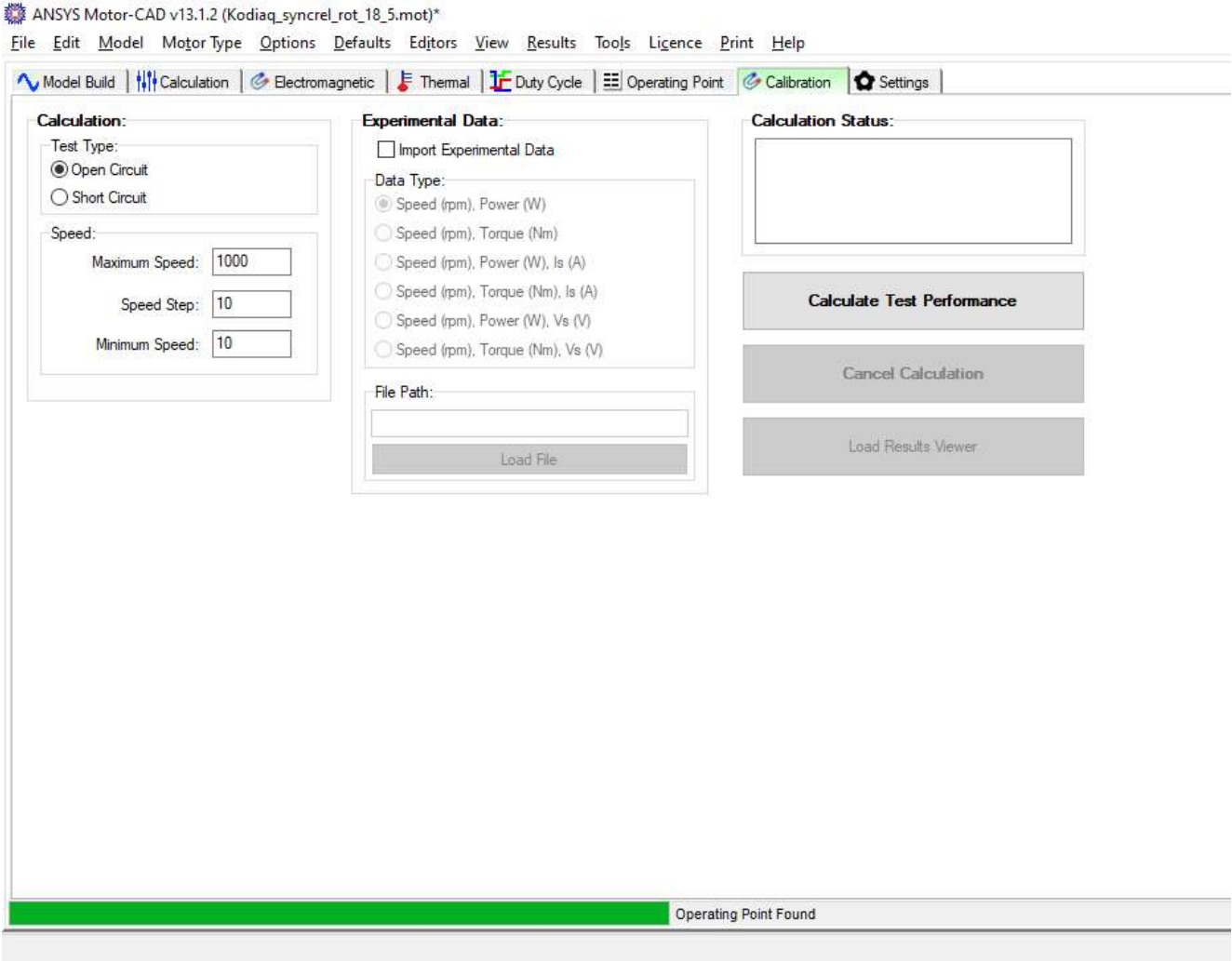
			Stator Winding Temperature (average)	162,5	°C

Operating Point Found

Iteration=5/1000 Max Error=0,04437%/0,125% Node=EWdg_End_F (C2) Temp=180,0°C

4 leden 2021 www.motor-design.com

Příloha C



Příloha C

ANSYS Motor-CAD v13.1.2 (Kodiaq_syncrel_rot_18_5.mot)*

File Edit Model Motor Type Options Defaults Editors View Results Tools Licence Print Help

Model Build Calculation Electromagnetic Thermal Duty Cycle Operating Point Calibration Settings

Input Settings:
Current/Voltage Definition:
 Peak
 RMS

Model Settings:
 Non-Salient
 Synchronous Reluctance
 Fast Rotor Skew
Clear Model Build

Adjustment Factors:
Magnet Flux Adjustment:
Additional EWdg Inductance:

Losses:
Iron Loss Build Factor Definition:
 Stator / Rotor (default)
 Hysteresis / Eddy

Iron Loss Split:
Loss Model Split:
 Automatic (default)
 User specified
Stator Back Iron:
Stator Tooth:
Rotor:

AC Winding Loss Distribution:
 Automatic (default)
 User specified (from Thermal model)

Operating Point Found