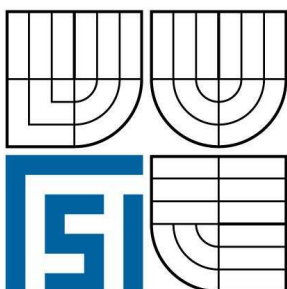


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V
BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND
BIOMECHANICS

VÝPOČTOVÉ A EXPERIMENTÁLNÍ MODELOVÁNÍ PŘÍMÉHO CHLAZENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ SYNCHRONNÍHO MOTORU VODOU

COMPUTATION AND EXPERIMENTAL MODELING OF DIRECT COOLING OF SYNCHRONOUS
MACHINE WINDING SLOT BY WATER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Adam Kolaja

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Radek Vlach, Ph.D.

BRNO 2008

ABSTRAKT

Diplomová práce zde řeší problematiku výpočtového a experimentálního modelování přímého chlazení statorového vinutí synchronního motoru vodou. Pro účely experimentálního měření byl vytvořen přípravek, který svými materiálovými vlastnostmi nahrazoval část statoru skutečného motoru. Pomocí výsledků z výpočtového modelování se stanovilo vhodné umístění chladicího systému do statorového vinutí tak, aby zohledňovalo kritérium maximální účinnosti a minimálních finančních nákladů při výrobě. Z výsledků experimentálního měření se dále vyhodnotila věrohodnost výsledků získaných výpočtovou simulací.

ABSTRACT

This thesis deals with computing and experimental problems of direct water cooling of stator winding that is assigned in synchronous motors. A model with similar material characteristic to a real motor has been made for experiments. The computing results showed us the appropriate place for the cooling system. This place has been chosen due to maximum efficiency and cost of the cooling system. The experiments on the model showed us, if the computing results are credible.

KLÍČOVÁ SLOVA:

ANSYS, motor, chlazení, synchronní, vodní chlazení, přímé chlazení, CFD

KEYWORDS

ANSYS, motor, cooling, synchronous, water cooling, direct cooling, CFD

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE MÉ PRÁCE:

KOLAJA, A. *Výpočtové a experimentální modelování přímého chlazení statorového vinutí synchronního motoru vodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Vlach, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému školiteli Ing. Radku Vlachovi, Ph.D. za jeho vedení, cenné rady a připomínky během zpracování diplomové práce.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Výpočtové a experimentální modelování přímého chlazení statorového vynutí synchronního motoru vodou jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím uvedené odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury na konci této práce.

Adam Kolaja, Brno, 2008

.....

OBSAH

1. SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A SYMBOLŮ	9
2. ÚVOD	11
3. PROBLEMATIKA CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	13
4. NEJČASTĚJI POUŽÍVANÉ DRUHY CHLAZENÍ	15
4.1. STROJE SE VZDUCHOVÝM CHLAZENÍM	15
4.2. STROJE S KAPALINOVÝM CHLAZENÍM	15
5. SDÍLENÍ TEPLA V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH	17
5.1. SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM.....	17
5.2. SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM	19
5.3. SÁLÁNÍ TEPLA.....	21
6. METODIKA SBĚRU DAT VÝPOČTOVÝCH SIMULACÍ.....	22
6.1. LINEÁRNÍ A KVADRATICKÉ MODELY	22
6.2. PLÁNY SIMULACÍ II. ŘÁDU	23
7. REGRESE A ZPRACOVÁNÍ DAT	26
7.1. VYJÁDŘENÍ ÚČELOVÉ FUNKCE	26
7.2. METODA NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ	28
8. POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO PŘÍPRAVKU	30
9. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ	33
9.1. ANSYS FLOTTRAN/CFD.....	33
9.2. LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ.....	34
9.3. TEPELNÁ ANALÝZA.....	34
9.4. ÚLOHY SE STLAČITELNÝMI TEKUTINAMI	35
9.5. GEOMETRICKÝ MODEL.....	35
10. VÝPOČTOVÁ SIMULACE	38
10.1. NASTAVENÍ MATERIÁLOVÝCH VLASTNOSTÍ.....	38
10.2. NASTAVENÍ CFD ANALÝZY	45
10.3. DEFINICE OKRAJOVÝCH PODMÍNEK.....	46
11. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ A ANALÝZA DAT	48
11.1. ENERGETICKÁ BILANCE	49

12. EXPERIMENT	67
12.1. POPIS MĚŘENÍ	67
12.2. ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ.....	69
12.3. EKVIVALENTNÍ NUMERICKÝ MODEL PRO EXPERIMENT	71
12.4. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ ZÍSKANÝCH ZE SIMULACE A EXPERIMENTU	72
13. ZÁVĚR.....	76
14. LITERATURA	78
15. SEZNAM PŘÍLOH	79

1. SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A SYMBOLŮ

A	plocha	$[m^2]$
A_s	obálková plocha	$[m^2]$
C	měrné teplo	$[W.s.kg^{-1}.K^{-1}]$
c_w	měrná tepelná kapacita vody	$[W.s.kg^{-1}.K^{-1}]$
d	průměr holého vodiče	$[m]$
d'	průměr vodiče včetně izolace	$[m]$
I	elektrický proud	$[A]$
i_x	počet vodičů ve směru toku	$[-]$
l	délka vodiče	$[m]$
m	výška případně šířka vodiče	$[m]$
n	vzdálenost ve směru normály k ploše A	$[m]$
Nu	Nusseltovo číslo	$[-]$
P	tepelný tok generovaný ve vinutí	$[W.m^{-3}]$
p	tlak	$[Pa]$
p_A	atmosférický tlak	$[Pa]$
P_α	tepelný tok odvedený sáláním a přirozenou konvekcí	$[W]$
P_J	Jouleovy ztráty	$[W]$
Pr	Prandtlovo číslo	$[-]$
P_W	tepelný tok odvedený do chladícího média	$[W]$
P_{WJ}	předpokládané teplo odvedené do vody	$[W]$
Q	celkový průtok vody	$[m^3.s^{-1}]$
q	hustota tepelného ztrátového výkonu	$[W.m^{-3}]$
q_k	odváděný tepelný tok konvekcí	$[W]$
q_s	odváděný tepelný tok sáláním	$[W]$
q_v	odváděný tepelný tok vedením	$[W]$
R	elektrický odpor	$[\Omega]$
R_{20}	elektrický odpor vinutí při teplotě $20^\circ C$	$[\Omega]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[-]$
R_{th}	tepelný odpor	$[K.W^{-1}]$
S	průřez vodiče	$[m^2]$
U	napětí	$[V]$
V	objem tělesa	$[m^3]$
w	střední rychlost proudění	$[m.s^{-1}]$

x	poloha chlazení ve vinutí	[-]
$\mathbf{x}$	matice neznámých parametrů	
α	součinitel přestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
α_{20}	teplotní součinitel elektrického odporu pro měď	[K ⁻¹]
α_s	součinitel přestupu tepla sáláním	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
δ	tloušťka stěny	[m]
Δv	rozdíl potenciálu teplot	[K, °C]
Δv_w	oteplení vody	[K, °C]
ε_i	šířka izolace	[m]
γ	součinitel objemové roztažnosti tekutin	[Pa ⁻¹]
λ_{ci}	celková tepelná vodivost izolace	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_{cv}	tepelná vodivost vodiče	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_n	náhradní tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ_i	vodivost izolace (impregnačního laku)	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ	součinitel tepelné vodivosti látky	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
ν	kinematická viskozita	[N.s.m.kg ⁻¹]
ρ	hustota látky	[kg.m ⁻³]
ρ_v	měrný odpor vodiče	[Ω.m]
ρ_w	hustota vody	[kg.m ⁻³]
v	teplota	[K, °C]
v_∞	teplota pro čas $t \rightarrow \infty$	[K, °C]
v_0	počáteční teplota	[K, °C]
v_{ave}	průměrná teploty vinutí	[K, °C]
v_{max}	maximální teplota	[K, °C]
v_{win}	teplota vody vstupující do chladicího systému	[K, °C]
v_{wout}	teplota vody vystupující z chladicího systému	[K, °C]

2. ÚVOD

Při návrhu elektrického stroje je nutné zahrnout znalosti z několika inženýrských odvětví. Donedávna se při projektování upřednostňovaly zejména elektrotechnické a mechanické vlastnosti stroje. Až teprve poté došlo na řešení konstrukčního uspořádání chladicího systému, přičemž návrhy pro efektivní chladicí systém už byly takto velmi omezené.

S rostoucími požadavky na výkon motoru narůstaly i ztráty. Poměr ztrát motoru na jednotku objemu narůstá mnohem rychleji než poměr výkonu. To platí zejména u vysokomomentových motorů. Protože je nutno tento efekt do jisté míry kompenzovat, stále více se u současných návrhů při projektování klade větší důraz na kvalitní chladicí systém.

Přeměnou energie mechanické na elektrickou a opačně vznikají ve stroji různé druhy ztrát. Jedná se o ztráty ve vinutí stroje – Jouleovy ztráty, ztráty v železe jak hysterézní, tak i vířivými proudy a ztráty mechanické. Všechny tyto druhy ztráty mají za následek oteplování stroje. Toto nadbytečné teplo je nutné ze stroje odvést do okolí. Dříve se využívalo k odvodu tepelných ztrát přirozené konvekce společně se sáláním, vedením tepla hřídelí a kontaktními plochy statoru s okolím nebo víření vzduchu od rotoru. V současné době se k odvodu tepla využívá především nuceného proudění chladicího média. Z velké části přispělo i využití nových materiálů při konstrukci nebo zdokonalení výrobních procesů. Mnohdy stačila pouze relativně jednoduchá úprava stávajícího chladicího systému, která vedla k nečekaně lepším výsledkům. Tyto všechny poznatky přispěly k tomu, že se problém chlazení dostává do první fáze návrhu konstrukce elektrického stroje.

Diplomová práce se zabývá vlivem konstrukčního uspořádání chladicího systému umístěného přímo do statorového vinutí na oteplení části motoru. Pro tyto účely byl vytvořen výpočtový model části synchronního motoru v softwaru ANSYS a přípravek pro experimentální měření. Pomocí plánu simulací, který vychází z plánu používaném při experimentálním měření se provedla řada výpočtů. Tyto výpočty nabídly výsledky, které se regresní analýzou dále zpracovaly a vytvořil se tak regresní model. Pomocí regresního modelu se stanovilo, které faktory chladicího systému mají největší vliv na odvod tepelných ztrát ze stroje. Kromě toho se dále určilo i optimální uložení chladicího systému ve vinutí.

Přípravek vyroben pro účely experimentálního měření posloužil k ověření získaných výsledků z výpočtového modelování. Jak ve výpočtovém tak i experimentálním modelování se sledoval ustálený stav teploty vinutí.

3. PROBLEMATIKA CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Předtím než se budeme zabývat samotnou problematikou chlazení elektrických strojů, si na úvod vymezíme nezbytné pojmy s nimiž se při problematice chlazení budeme setkávat. Zdroj ze kterého bylo čerpáno [2].

Pojem *chlazení elektrických strojů* zahrnuje metody používané v elektrických strojích k odvodu ztrátového tepla z míst jeho vzniku do okolí. V případně uzavřeného systému chladiva se pomocí výměníku z jednoho ventilačního nebo hydraulického okruhu odvádí do druhého, odkud je ztrátové teplo následně odvedeno do okolního prostředí.

Pojem *ventilace* se vztahuje k průtoku nebo cirkulaci chladiva výhradně tvořeného plynnou látkou. Pokud bude na místo plynné látky použita kapalina, nemluvíme už o ventilaci ale o *hydraulickém systému* případně *hydraulickém okruhu*.

Tepelný okruh reprezentuje cestu *tepelného toku* vycházejícího z místa vzniku ztrátového tepla, přecházející vedením (cizím slovem kondukcí) přes části stroje obklopující zdroje ztrát a končící na chladících plochách, z nichž se teplo odvádí do ventilačního okruhu.

Ventilační okruh (systém) je složen ze zdroje tlaku (ventilátor), ventilačních kanálů a vzduchovodů, které vytváří účelné cesty pro průtok chladiva strojem a snímání tepla z chladících ploch.

Z předchozího lze usoudit jak lze segmentovat problematiku chlazení. Z praktických důvodů se dělení provádí na dvě samostatná odvětví a to na

- část ventilační, jejíž cílem je nalezení optimálního průtoku a umístění chladící látky ventilačním okruhem
- část tepelnou, zkoumající a řešící průchod ztrátového tepla tepelným okruhem stroje

Důležitost chlazení elektrických strojů je dána těmito dvěma faktory

- je to jeden z rozhodujících činitelů provozní spolehlivosti elektrického stroje
- rozhoduje o využití aktivních materiálů nově navrhovaných strojů a tím redukování hmotnosti na jednotku výkonu.

Podstatou problematiky chlazení elektrických strojů je správný odvod tepelných ztrát vznikajících ve stroji v důsledku elektromagnetických, aerodynamických a hydraulických dějů. Ztrátové teplo se musí ze zdroje odvést, nemá-li se teplota různých částí stroje zvyšovat a stát se nebezpečnou pro tyto díly samotné nebo pro součásti, které se s ní přímo stýkají.

Obor chlazení a ventilace elektrických strojů zahrnuje v sobě jak teoretické metody rozboru a sjednocení, tak i experimentální metody analýzy. Cílem této disciplíny je poskytnout návrháři elektrického stroje matematický model tepelně ventilačních dějů probíhajících ve stroji, který by s dostatečnou přesností simuloval skutečný stav. To vede jak k finančním tak i ekologickým úsporám a navíc se tím zabrání i nepříjemným překvapením při zkouškách prototypových strojů ve zkušebně.

Více o problematice a charakteristice současného stavu chlazení elektrických strojů nalezneme v [2] a [4].

4. NEJČASTĚJI POUŽÍVANÉ DRUHY CHLAZENÍ

Volba typu chlazení je jednou z klíčových otázek při konstrukci elektrického stroje. Každý z používaných druhů chlazení má vedle svých významných výhod i značné množství záporných stránek a v některých případech i omezení technické použitelnosti. Jak je uvedeno v [2] podle druhů chladiva rozdělujeme chlazení na vzduchové a kapalinové.

4.1.Stroje se vzduchovým chlazením

Motory resp. generátory se s tímto druhem chlazení používají pro venkovní instalace. Konstrukce musí tedy splňovat odolnost proti vlivům okolí. Nepoužívají v chladicím systému kapalinu (vodu) a je tedy možné jejich odstavení i při teplotách nižších než 0 °C. V samotné konstrukci stroje musí být soustava kanálů pro umožnění proudění vzduchu. Jelikož se jedná o nucené proudění na motoru bývá zde umístěný ventilátor. Ten lze umístit před chladicí objekt nebo za něj. Podle toho se rozlišuje chlazení vzduchem tlačné nebo sací. Protože však lepších výsledků chlazení se dostane při první variantě, je tento způsob umístění ventilátoru častější.

4.2.Stroje s kapalinovým chlazením

Oproti předchozímu způsobu odvodu nadbytečného tepla ze stroje se s tímto druhem chlazení setkáváme spíše v krytých strojovnách. Je to dáno tím, že chladicím médiem bývá voda. Výhody použití vody jsou cenová dostupnost a v případě poškození chladicího systému hlavně ekologičnost k životnímu prostředí. Podstatnou nevýhodou této koncepce chladicího systému spočívá v nutnosti zajištění, aby při odstávce elektrické soustavy nedošlo k poklesu teploty pod 0 °C.

Tento druh chlazení se používá hlavně u středních a velkých výkonů. Protože má voda vysokou tepelnou kapacitu, oproti vzduchu přibližně šestkrát větší, tzn. že je schopna akumulovat 6x větší množství tepelné energie na rozdíl od vzduchu, než se ohřeje o teplotu 1K. Navíc má i lepší tepelnou vodivost, v porovnání se vzduchem více než 24x. Tím je tedy možné u vodou chlazených strojů dosáhnout větších výkonů a v řadě případů i prodloužit životnost elektrického stroje.

Většina chladících systémů je v uzavřeném okruhu, což umožňuje snadnou kontrolu teploty chladicího média, který slouží jako jeden ze vstupních údajů pro regulátory ovládající průtok chladicí kapaliny. Tím, že je okruh uzavřen, jsou splněny i přísné hygienické normy.

Nevýhodou této koncepce je při použití uzavřeného okruhu, což je naprostá většina kapalinou chlazených zařízení, nutnost zaručit maximální vstupní teplotu kapaliny. To vede k tomu, že chladicí systém bývá značně objemný kvůli velkému množství vody v zásobnících.

5. SDÍLENÍ TEPLA V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH

Teplo vzniklé v důsledku různých typů ztrát v elektrickém stroji se odvádí (sdílí) do chladicího média, případně do okolí, třemi způsoby:

- vedením nebo-li jak už bylo zmíněno kondukcí
- prouděním taktéž jako konvekci
- sáláním tedy radiací

V následujících kapitolách si tyto tři případy podrobněji rozebereme, neboť pro každý typ odvodu tepla z tělesa platí zvláštní zákonitosti.

5.1. Sdílení tepla vedením

Pro popis odvodu tepla z pevných látek bez vnitřního zdroje tepla je použit Fourierův zákon. Tento zákon nalezneme v řadě publikací v různých matematických zápisech. Zde bylo čerpáno z [2], kde je formulován následovně:

$$q_v = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial v}{\partial n} \cdot \vec{n}^0 = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad}(v) \quad (5.1)$$

q_v – odváděný tepelný tok,

λ - součinitel tepelné vodivosti látky,

A - velikost plochy, kterou je tepelný tok odváděn,

$\text{grad}(v)$ – teplotní gradient, vektor ve směru normály k izotermické ploše,

n – vzdálenost ve směru normály k ploše A ,

Fourierův zákon pro tepelné veličiny je analogie Ohmova zákona pro elektrické veličiny. Analogii je znázorněna následně:

$$U = R \cdot I \quad (5.2)$$

Ohmův zákon pro elektrické a termické veličiny

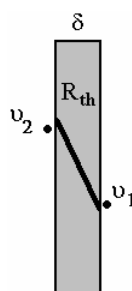
$$\Delta \vartheta = R_{th} \cdot q_v \quad (5.3)$$

přičemž $\Delta v = v_2 - v_1$, $v_2 > v_1$ představuje rozdíl potenciálu dvou teplot (před a za pevnou látkou) viz. Obr. 1 a R_{th} , tepelný odpor pevné látky,

$$R_{th} = \frac{\delta}{\lambda \cdot A} \quad (5.4)$$

δ – tloušťka pevné látky

A – plocha odvodu tepelného toku



Obr. 1 Vedení tepla ve stěně.

Z rovnic (5.2) a (5.3) vidíme analogie elektrických a tepelných veličin.

Tab. 1 Analogie elektrických a tepelných veličin

<i>tepelné veličiny</i>	Δv	R_{th}	q_v
<i>elektrické veličiny</i>	U	R	I

Pro třídimenzionální sdílení tepla vedením v pevných látkách odvodíme z rovnice (5.1) diferenciální rovnici vedení tepla v ustáleném stavu

$$\nabla^2 v = 0 \quad (5.5)$$

$$\text{kde} \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (5.6)$$

je Laplaceův operátor.

Pro vedení tepla v pevné látce s vnitřními zdroji přejde rovnice (5.5) na tvar

$$\nabla^2 v = \frac{q}{\lambda} \quad (5.7)$$

přičemž musí platit

$$q = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{q_v}{\Delta V} \quad (5.8)$$

kde q je hustota tepelného ztrátového výkonu.

5.2. Sdílení tepla prouděním

Na plochách tělesa se teplo odvádí do chladícího média nebo okolí konvekci. Intenzitu sdílení tepla popisuje součinitel přestupu tepla α . Množství tepla přecházející za jednotku času z chladící plochy A do proudícího média při teplotním rozdílu Δv mezi stěnou a chladivem je popsána vzorcem, někdy označovaným jako Newtonovým vztahem

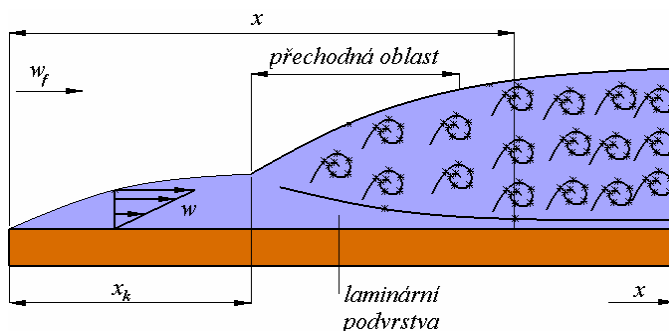
$$q_k = \alpha \cdot A \cdot \Delta v \quad (5.9)$$

Po úpravě rovnice (5.9) můžeme opět vyčíst analogii s Ohmovým zákonem pro elektrické obvody

$$\Delta v = \frac{1}{\alpha \cdot A} \cdot q_k = R_{th} \cdot q_k \quad (5.10)$$

Ať už začneme při řešení problému vycházet z rovnice (5.9) nebo (5.10) vidíme, že celá složitost výpočtu vede ke stanovení součinitele přestupu tepla α . Fyzikální představa sdílení tepla z pevné látky do proudící tekutiny je následující:

U stěny z pevné látky je rychlost proudící tekutiny nulová. S narůstající vzdáleností od stěny se rychlost mění od nuly po rychlost proudění w_f . Oblast s nejvyšším spádem rychlosti ve směru kolmém ke stěně je nazývána jako mezní vrstva. Tato mezní vrstva, která je znázorněna na Obr. 2, je nejprve laminární. Od určité vzdálenosti od vstupu se narušuje, kde spodní část přilehlá ke stěně zůstává nadále laminární – označována též laminární podvrstva, zatímco horní část přejde v turbulentní proudění. Tloušťka mezní vrstvy nezůstává nadále stejná, ale mění se v závislosti na rychlosti vnějšího proudu a vzdálenosti od vstupu. S rostoucí rychlostí dochází k jejímu zmenšení.



Obr. 2 Rozložení rychlosti v mezní vrstvě proudu obtékající rovinnou desku

Laminární podvrstva se vyznačuje vrstevnatým prouděním. Teplo je tedy sdíleno napříč touto vrstvou vedením. U turbulentní části mezní vrstvy dochází k prudkému směšovacímu pohybu, který je charakteristický právě pro tento typ proudění. U směšovacího pohybu je sdílení tepla mnohem intenzivnější než v laminární podvrstvě. Z toho je tedy zřejmé, že značnou část tepelného odporu tvoří právě tato laminární podvrstva, která omezuje sdílení tepla ze stěny. Teplotní součinitel α je pak přibližně roven

$$\frac{1}{\alpha} \approx \frac{\delta_1}{\lambda} \quad (5.11)$$

kde δ_1 je tloušťka laminární podvrstvy. Součinitel přestupu tepla α , zjišťujeme především z experimentů pro různé případy proudění. Tato měření se zpracovávají na základě teorie podobnosti do tvaru bezrozměrných kritériálních rovnic. Součinitel přestupu tepla pak vypočítáme z těchto rovnic z bezrozměrného Nusseltova čísla Nu

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda} \quad (5.12)$$

kde D – charakteristický rozměr obtékaného tělesa, nebo protékaného kanálu.

Pro nucenou konvekci nalezneme kritériální rovnice ve tvaru $Nu = f(Re, Pr)$, při přirozené konvekci ve tvaru $Nu = f(Gr, Pr)$, kde Re je tzv. Reynoldsovo číslo $Re = \frac{w \cdot D}{\nu}$, Pr

je Prandtlovo číslo $Pr = \frac{\nu}{\lambda}$ a Gr , Grashofovo číslo $Gr = \frac{g \cdot \gamma \cdot \Delta v \cdot D^3}{\nu^2 \cdot \rho \cdot C}$

ν – kinematická viskozita

ρ – hustota látky

c – měrné teplo

γ – součinitel objemové roztažnosti tekutin

w – střední rychlost proudění.

5.3.Sálání tepla

Při sálání se energie z malé části mění v energii záření. Toto záření má vlnovou délku větší než světelné paprsky. V prostoru dochází k jeho šíření přímočaře, bez vlivu na jeho změnu teploty. Po dopadu na druhé těleso se buď úplně nebo pouze jen částečně změní v teplo.

Na velikosti vzniku přenosu tepla sáláním má vliv kvalita povrchu, teplota a poloha povrchu vyzařujícího a ozařovaného, tvar, velikost a barva povrchu. Pro černou matnou barvu je vyzařovaný výkon největší, pro bílou lesklou barvu je naopak nejhorší. Intenzita záření ubývá s druhou mocninou vzdálenosti.

Tepelný výkon sálající z povrchu lze zapsat následovně:

$$q_s = \alpha_s \cdot A_s \cdot \Delta v \quad (5.13)$$

kde α_s představuje součinitel přestupu sáláním, A_s obálkovou plochu tělesa. Pro běžné plochy elektrických strojů bývá $\alpha_s = 6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

6. METODIKA SBĚRU DAT VÝPOČTOVÝCH SIMULACÍ

Způsoby sběru dat uvedené v této kapitole jsou ve své podstatě převzaty ze způsobu sběru dat při experimentálních měření. Při experimentálním měření, které bývá často finančně nákladné je zapotřebí celý proces předem důkladně naplánovat. Tím se docílí toho, že se dojde nejen k finančním úsporám, ale také i k časovým a mnohým dalším. Jelikož má výpočtová simulace některé rysy hodně blízké, ne-li totožné, s experimentálním měřením, aplikovaly se tyto poznatky i na výpočtové modelování. Protože volba a sestavení vhodného plánu simulací jsou klíčové pro výsledky každého výpočtového modelování.

Při provádění simulací se v nejčastějších případech setkáváme se situací, kdy měníme pouze jednu proměnnou, faktor. Tento způsob je oblíbený zejména pro jeho jednoduchou realizovatelnost, finanční nenákladnost a relativně malou časovou náročnost. Takto prováděná modelování, jak experimentální tak i výpočtová, mají však své hranice a v mnoha případech narazíme na situace, kdy se výsledky získané simulací a výsledky skutečné liší i řádově. Naopak pro nejpresnější získání výsledků jsou nejlepší simulace postavené na úplně faktoriálních simulacích, kde se uvažuje variabilita všech proměnných. Tyto simulace jsou ale často jak finančně tak i časově náročné, ale v řadě případů není vůbec možné takovouto simulaci provést. Proto je volen jistý kompromis a na základě třeba intuitivního přístupu volit jen takové množství faktorů, které budeme měnit, přičemž u nich předpokládáme největší vlivy na chování systému. Získané informace, v podobě numerických hodnot, umožní na bázi těchto simulačních plánů vytvoření přesných regresních modelů.

6.1. Lineární a kvadratické modely

Výpočtové simulace se provádí za účelem posouzení chování modelovaných soustav a na základě získaných poznatků z modelů se realizují skutečné - fyzické soustavy. Jindy se mohou simulacemi získat cenné popisy problémů i pro pouhou optimalizaci soustavy. Čehož bylo využito právě u této diplomové práce.

Existuje několik plánů simulací, zde se však omezíme na plány simulací I. a především II. řádu. Ze simulací I. řádu sestavíme lineární regresní (více o regresi a zpracování dat v následující kapitole) model, linearita bude vzhledem ke koeficientům i k proměnným. Matematicky lze takový model formulovat následovně

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot x_j + \varepsilon \quad (6.1)$$

přičemž β představuje hledané koeficienty a ε chybu (numerickou, měření atd.). Pokud je takováto forma popisu pro danou oblast dostatečná, určíme nový centrální bod simulace pomocí nalezení největšího gradientu a pokračujeme stejným způsobem. Opakování probíhá dokud nenalezneme optimální bod, tedy bod kde se odezva ustaluje. Stane-li se, že regresní model popisuje chování s velikou chybou použije se plán simulací II. řádu, který spočívá v sestavení kvadratického regresního modelu vzhledem k proměnným. Matematicky model vypadá následovně

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j \cdot x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} \cdot x_j^2 + \sum_{j < j'}^n \sum_j \beta_{jj'} \cdot x_j \cdot x_{j'} + \varepsilon \quad (6.2)$$

Při simulaci se zajímáme o množství regresních koeficientů β . Množství p těchto regresních koeficientů je úměrné počtu měněných faktorů n podle následujícího vztahu:

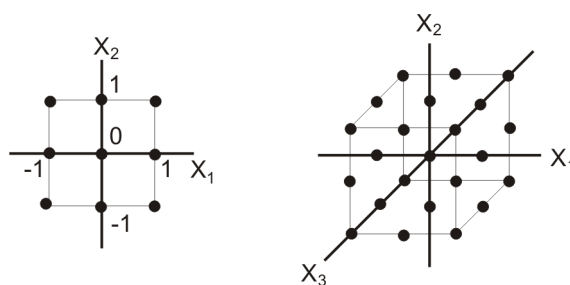
$$p = 2^n + n \quad (6.3)$$

O způsobu nalezení regresních koeficientů se více dozvíme v kapitole 7.2 [Metoda nejmenších čtverců](#).

6.2. Plány simulací II. řádu

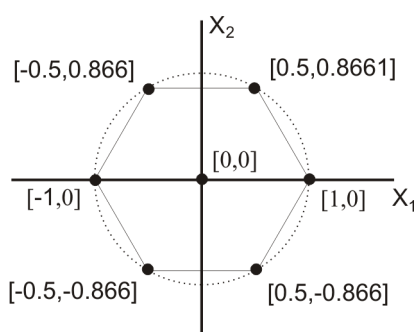
Abychom byli schopni odhadnout koeficienty regresní kvadratické funkce potřebujeme pro každý faktor znát alespoň tři jeho hodnoty. Pro nejpřesnější určení regresních koeficientů se vychází z ortogonálních návrhů. Pojmeme ortogonálního návrhu rozumíme vynášení faktorů do takových rovin nebo prostorů, kde je zaručena kolmost všech os, na které jsou faktory vynášeny. Mezi tyto návrhy patří úplné faktoriální simulace 3^n Obr. 3, rotační návrhy Obr. 4 a kompozitní návrhy Obr. 5, které vzniknou z faktoriální simulace 2^n doplněním o $2n$ body ležící na osách $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

- úplné faktoriální simulace 3^n



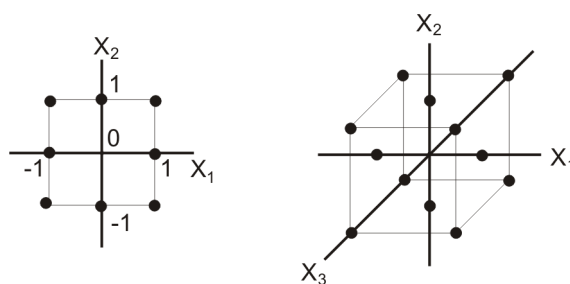
Obr. 3 Úplný faktoriální návrh pro dva a pro tři faktory (obrázek převzat z [6])

– rotační návrh



Obr. 4 Rotační návrh pravidelného šestiúhelníka s jedním centrálním bodem (obrázek převzat z [6])

– kompozitní návrh



Obr. 5 Kompozitní návrh pro dva a tři faktory (obrázek převzat z [6])

Tab. 2 Počet simulací jednotlivých plánů II. řádu

Počet měněných faktorů n	2	3	4
Počet odhadovaných koeficientů	6	11	20
počet simulací s			
Úplný faktoriální návrh 3^n	9	27	81
Rotační návrh	6	11	-
Kompozitní návrh	8	14	24

Z tabulky 2 je patrné, že co do počtu simulací nebo měření je nejvýhodnější rotační návrh. I přesto však nebyl dále v této práci použit to z toho důvodu, že v tomto případě je náročnější

pro hledání počátečních bodů pro následující simulace. Více o sběru dat výpočtových simulací nalezneme v [6].

Přes veškeré nevýhody byl použit úplný faktoriální návrh 3^n . Jelikož se řešily úlohy se dvěma proměnnými faktory byl tedy celkový počet simulací pro regresní model $s = 9$. To sice znamenalo větší množství výpočtů, než u rotačního návrhu. Rotační návrh je ale méně výhodný z praktického hlediska. Bylo by nutné konstrukčně upravovat některé části pozorovaného stroje. Pro náš případ se tento problém vztahoval na vinutí stroje, které by se jinak muselo vícekrát převinout.

7. REGRESE A ZPRACOVÁNÍ DAT

Při řešení celé řady inženýrských úloh se setkáváme s potřebou vyhodnotit experimentálně získané závislosti funkce jedné nebo více proměnných. Tyto závislosti mohou mít navíc složitý nelineární charakter. Úkolem pak je najít funkci, která bude nejvěrohodněji aproximovat experimentální závislost a určit její parametry. Touto problematikou se v matematice zabývá oblast statistiky, regresní analýza.

Podle [1] pojem regrese obecně charakterizuje v grafické interpretaci jako metodu prokládání zvolené funkční závislosti experimentálně získaných hodnot. Analyticky to znamená hledat závislost

$$y = f(\vec{x}, \vec{p}) \quad (7.1)$$

kde $\vec{x}$ = vektor nezávislých proměnných

$\vec{p}$ = vektor parametrů, které je třeba stanovit

Cílem regresní analýzy je pak nalezení příslušné regresní funkce a jejích parametrů. Podle toho, jak tyto proměnné a parametry ve funkčním předpisu vystupují a jaký je jejich počet, rozlišujeme různé typy regrese:

- lineární – lineární funkce jedné proměnné se dvěma parametry
- vícenásobná lineární – lineární funkce více proměnných, počet parametrů je o jednu větší než je počet proměnných
- polynomická – závislost funkce je vyjádřena polynomem n-tého stupně
- nelineární – nelineární funkce, libovolný tvar hledané funkce s libovolným počtem proměnných i parametrů, přičemž alespoň jedna proměnná musí mít nelineární charakter

Více o odvozování a jednotlivých metodách lze nalézt v literatuře [1].

7.1. Vyjádření účelové funkce

Metoda nelineární regrese je matematicky složitá a výpočtově náročná a její realizace bez využití současné výpočetní techniky prakticky nemožná. Ve své podstatě se vlastně jedná

o statistický odhad parametrů regresní rovnice, z nichž ale alespoň jeden je v nelineární závislosti

$$\hat{y} = f(x, \hat{p}) \quad (7.2)$$

$\hat{p}$ – vektor statistických odhadů parametrů regresní funkce.

Jelikož každé měření, experiment je zatíženo nejistotou pak naměřená hodnota je rovna

$$y_{\text{exp},i} = y_i + \varepsilon_i \quad (7.3)$$

kde pro $i = 1, \dots, N$

y_i = skutečná hodnota,

ε_i - nejistota, která je dána součtem

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{D,i} + \varepsilon_{M,i} + \varepsilon_{N,i} \quad (7.4)$$

kde pro $\varepsilon_{D,i}$ – nejistota dat nebo měření,

$\varepsilon_{M,i}$ – nejistota metody,

$\varepsilon_{N,i}$ – náhodná nejistota.

První dva typy nejistot jsou trvalé a musí být eliminovány na minimální možnou hodnotu. Třetí typ eliminovat nelze, přičemž předpoklad pro použití regrese je normalita rozložení těchto chyb.

Protože výše uvedené nejistoty nelze zcela vyloučit a ani regresní závislost nemůže zajistit úplnou extrapolaci experimentálních dat vzniká mezi vypočítanými a experimentálními hodnotami rozdíl nebo také tzv. reziduum. Toto reziduum je definováno jako

$$e_i = y_{\text{exp},i} - \hat{y}_i, i = 1, \dots, N \quad (7.5)$$

Reziduum je pak východiskem pro definici kritéria odhadu parametrů tedy účelové funkce. Účelová funkce pak některou formou vyjadřuje rozdíl vypočtených a naměřených hodnot. Nejznámější účelovou funkcí je podle [1]

$$U = \min_{p_j} \left\{ \sum_{i=1}^N (y_{\text{exp},i} - \hat{y}_i \cdot (\hat{p}_j))^2 \right\} \quad j=1, \dots, k \quad (7.6)$$

kde N - počet získaných bodů (např. experimentem, simulací atd.)

p_j – parametry

k – počet parametrů,

řešení této účelové funkce je známo jako metoda nejmenších čtverců.

7.2. Metoda nejmenších čtverců

Jedná se o matematickou metodu, která má hlavní využití ve statistickém zpracování dat. Umožňuje nalézt vhodnou aproximační funkci pro dané empiricky zjištěné hodnoty. Aproximační funkce musí být předem zadána. Neznáme v této funkci budou parametry (váhy proměnných), které se metodou nejmenších čtverců dopočítají tak aby nalezené řešení mělo minimalizované druhé mocniny nejistot.

Pokud máme soustavu rovnic jejichž charakter je lineární a je ve tvaru $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, kde $\mathbf{A}, \mathbf{b}$ jsou matice známých hodnot a $\mathbf{x}$ je vektor neznámých hodnot, mohou nastat tři situace problému při řešení této soustavy.

Nejjednodušší případ řešení je pokud máme stejný počet rovnic jako počet neznámých. Tedy když matice $\mathbf{A}$ je čtvercová a vektory $\mathbf{x}$ a $\mathbf{b}$ mají stejný rozměr. Pro určení všech neznámých vektoru $\mathbf{x}$ stačí určit inverzní matici $\mathbf{A}$ a soustavu řešit jako $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$.

Další případ nastane pokud matice $\mathbf{A}$ má větší počet sloupců než řádků, vektor $\mathbf{b}$ je rozměrově menší jako vektor $\mathbf{x}$. Soustava těchto rovnic je nedourčená, což znamená že máme více neznámých jako rovnic.

Posledním případem je tzv. přeúčtená soustava rovnic, tato situace nastane tehdy pokud matice $\mathbf{A}$ má větší počet řádků jak sloupců a vektor $\mathbf{b}$ je rozměrově větší jak vektor neznámých $\mathbf{x}$. Tento případ jde teoreticky řešit tím, že některé rovnice zanedbáme. Ve skutečnosti pokud ale provádíme experimentální pokusy nebo jsme výsledky dostávali finančně či časově náročným způsobem jsou pro nás důležité všechny naměřené, vypočtené hodnoty a proto tento způsob řešení nepreferujeme.

Pro případy s nedourčenou respektive přeúřčenou soustavou rovnic platí, že taková soustava má nekonečně mnoho respektive žádné řešení. Toto je však ve většině případů neuspokojivé a definujeme proto chybu (nejistotu) řešení jako

$$e = Ax - b \quad (7.7)$$

Pro nás zajímavé bude takové řešení pro které bude velikost nejistoty e minimální. Je více způsobů jak tento problém řešit, zde bude uveden pouze jeden.

Vektor e nabude minimální hodnoty tehdy bude-li kolmý na vektor Ax . Proto aby byla splněna podmínka ortogonalit platí, že skalární součin vektorů musí být roven nule tedy

$$e \cdot Ax = e^T Ax = 0 \quad (7.8)$$

dále upravíme

$$(x^T A^T - b^T)Ax = x^T A^T Ax - b^T Ax = (x^T A^T A - b^T A)x = 0 \quad (7.9)$$

přičemž jedno řešení bude pro $x = 0$, které je pro nás obvykle nezajímavé oproti tomu řešení

$$(x^T A^T A - b^T A) = 0 \quad (7.10)$$

je právě hledané řešení, kde po úpravě dostaneme

$$x^T A^T A = b^T A \quad (7.11)$$

rovnice (7.12) vede právě ke hledanému vektoru x

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (7.12).$$

8. POPIS EXPERIMENTÁLNÍHO PŘÍPRAVKU

Pro zkoumání vlivu přímého chlazení vinutí vodou synchronního motoru byl vyroben přípravek který měl svými materiálovými a konstrukčními vlastnostmi reprezentovat část skutečného motoru.

Jako vzor pro přípravek byl zvolen skutečný motor řady ROL dodávaný výrobcem VUES Brno zobrazený na Obr. 6. Podle technické dokumentace výrobce [5], momentové motory řady ROL jsou konstruovány jako synchronní motory s vodním chlazením a vysokým počtem pólů, určené pro nízké otáčky. Pro buzení těchto motorů slouží permanentní magnety ze vzácných zemin Nd-Fe-B (neodym-železo-bor).



Obr. 6 Motor řady ROL typ E, výrobce VUES Brno (obrázek převzat z [5])

Stator motoru sestává z kostry, která je svařovaná a zhotovena z nerezavějící oceli. Do tohoto statorového svařence je zalisován statorový svazek. Magnetický obvod motoru je složen z elektrotechnických plechů o jakosti M400-50A. Do drážek svazku je umístěno trojfázové statorové vinutí, které je zapojeno do hvězdy

Rotor motoru je zkonstruován z ocelového prstence z oceli 11353. Na rotoru jsou nalepeny permanentní magnety.

Veškerý ztrátový výkon vznikající na vinutí je z motoru odváděn chladícím médiem. Chladicí kapalina protéká kanály, které jsou vytvořeny jako drážky na vnějším povrchu kostry. Ztráty vznikající na rotoru jsou oproti Jouleovým ztrátám ve vinutí zanedbatelné. Veškeré teplo které způsobuje ohřev magnetů se tedy ze statoru přenáší konvekci přes

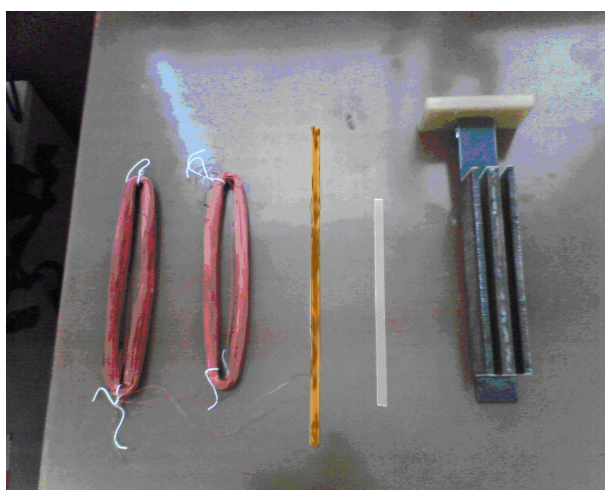
vzduchovou mezeru. Rotor je zde chlazen sáláním a nucenou konvekcí vzduchu. Pomocí vodního chlazení se nemusí jmenovitý moment motoru redukovat, to však ale vyžaduje aby teplota vstupující chladicí vody nepřekročila 25°C.

Nebylo by využito vodního chlazení je zapotřebí zvětšit chladicí plochy, přitom jmenovitý moment redukovat až na 40% katalogové hodnoty. Dále by teplota na povrchu kostry mohla dle zatížení dosáhnout 130°C. To by vlivem tak vysokých teplot vedlo k vyvolání deformací stroje .

Izolace momentových motorů je provedena v tepelné třídě H dle ČSN EN 60034-1. Podle této normy nesmí oteplení na vinutí překročit 105K.

Modelová řada ROL je výrobcem určena pro použití ve výtahové technice, k pohonu výkyvných os robotů nebo vřeten obráběcích strojů a také na otočné osy radarů a anténních systému.

Jak bylo výše uvedeno na majoritní částí vzniku tepla se podílí statorové vinutí. To bylo inspirací pro vyrobení experimentálního přípravku, který svou konstrukcí nezahrnoval ztráty vznikající v rotoru. Vzhledem k rotační symetrii se nemusel vyhotovovat celý stator ale stačila k experimentu pouze jeho část. Vytvořila se tedy pouze výseč statorového svazku tvořenou dvěma drážkami pro statorové vinutí. Dále bylo cílem z přípravku a experimentu vypočítat jaký dopad na oteplení motoru bude mít přímé chlazení vinutí, proto se na přípravek nepřidělávala kostra z nerezavějící oceli s kanály pro chladicí médium.



Obr. 7 Část statoru synchronního motoru řady ROL sloužící jako přípravek měření

Jednotlivé části použité na přípravku jsou vyobrazeny na Obr. 7. Vlevo je vinutí, které bylo vloženo do statorového svazku (zobrazeném vpravo). U prostřed obrázku vidíme mosazný jekl, sloužící jako kanál pro chladící kapalinu a zámek vinutí. Celý systém chlazení a statorového vinutí byl snadno rozebíratelný a konstrukčně připravený pro různé modifikace uložení chladících trubic.

9. VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Pro teplotní analýzu byl vytvořen komplexní 3D výpočtový model. Jedná se o model části statoru synchronního stroje. Výpočtový model přípravku respektuje skutečné rozměry, uspořádání vinutí a jeho chlazení, které je předmětem pozorování v této práci. Výpočtový model je určen pro analýzu oteplování části statorového svazku, vinutí statoru a vlivu umístění chlazení ve statorovém vinutí na odvod tepelných (Jouleových) ztrát ze stroje. Celý model byl nejprve vytvořen v CAD systému SolidWorks. Použití tohoto softwaru bylo z důvodu jednoduššího modelování než ve výpočtovém systému ANSYS. Přispěl k tomu i fakt, že byly velice dobré zkušenosti při převodu modelu ze systému SolidWorks do ANSYS. Nadále se již z počátku vědělo, že bude zapotřebí modelovat více než jeden model. Navíc modely v CAD systému SolidWorks lze mnohem rychleji upravit do požadované podoby, zatímco v ANSYSu by se musel model pro většinu úprav kreslit celý od začátku. Tím se nemá však na mysli, že modelovat jakýkoliv objekt v ANSYSu je nevhodné. Tento postup byl zvolen jak bylo uvedeno výše pro zjednodušení práce a také pro obohacení si vědomostí pro práci s jednotlivými CAD systémy a převodem z geometrického modelu do výpočtového.

9.1.Ansys Flotran/CFD

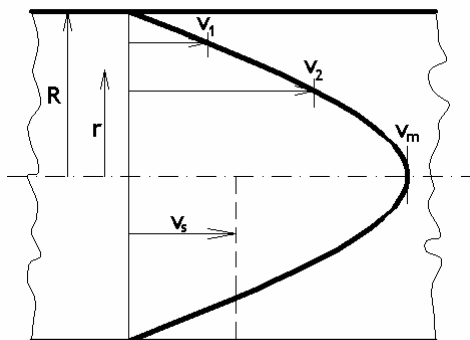
Protože se v této práci zabýváme problematikou chlazení a to chlazení pomocí kapaliny byl pro výpočtové modelování použit software ANSYS a jeho prostředí pro řešení proudění kapalin FLOTRAN CFD (Computational Fluid Dynamics), který slouží pro řešení následujících typů úloh:

- problematika laminárního a turbulentního proudění
- teplotně ustálené a neustálené úlohy
- úlohy se stlačitelnými nebo nestlačitelnými tekutinami.

Tyto druhy jednotlivých analýz mohou být navíc kombinovatelné navzájem mezi sebou. Například laminární analýza může být tepelná nebo adiabatická, turbulentní řešení problému zase lze řešit s kapalinou stlačitelnou nebo nestlačitelnou atd..

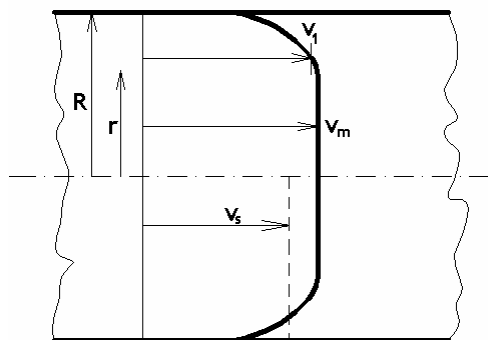
9.2. Laminární a turbulentní proudění

V případě laminárního proudění se jedná o úlohy, kdy se toky kapaliny pohybují velice pomalu a současně jejich viskozita je velmi vysoká, například oleje. Rychlostní profil proudění kapaliny ve vedení kruhového průřezu je na Obr. 8.



Obr. 8 Laminární proudění v kruhovém profilu

Problematika turbulentního proudění nastává tehdy, kdy rychlosti tekutin jsou velmi vysoké a viskozita velice nízká. Kdy dochází k řešení úlohy laminárního proudění nebo turbulentního určujeme pomocí Reynoldsova čísla Re . Rychlostní profil turbulentního proudění je na Obr. 9.



Obr. 9 Turbulentní proudění v kruhovém profilu

9.3. Tepelná analýza

Budeme-li vycházet ze zákona zachování energie, který platí v každém časovém okamžiku můžeme jej definovat pomocí toků energie jako

$$q_{in} + q_g - q_{out} = q_{aku} = \frac{dE}{dt}, \quad (9.1)$$

tedy součet toků energie do tělesa vstupující q_{in} , toků energie v tělese generovaném q_g a toků energie z tělesa vystupující q_{out} musí být roven změně tepla v tělese $\frac{dE}{dt} = q_{aku}$, energii v tělese akumulované. Jestliže se ale v tělese žádná energie neakumuluje $q_{aku} = 0$ jedná se o ustálený stav. Tato úloha je v ANSYSu označována jako *steady state thermal analysis*. Jestliže nás zajímá tepelná rovnováha tělesa v průběhu akumulování energie do tělesa, je nutno volit typ úlohy označené jako *transient thermal analysis*.

Pro řešení problému v této práci nebyl podstatný časový průběh změny teploty v tělese. Dále se tedy budeme zajímat pouze o ustálený stav, ve kterém budeme pozorovat maximální dosažené teploty vinutí v závislosti na konstrukci chladicího systému.

9.4. Úlohy se stlačitelnými tekutinami

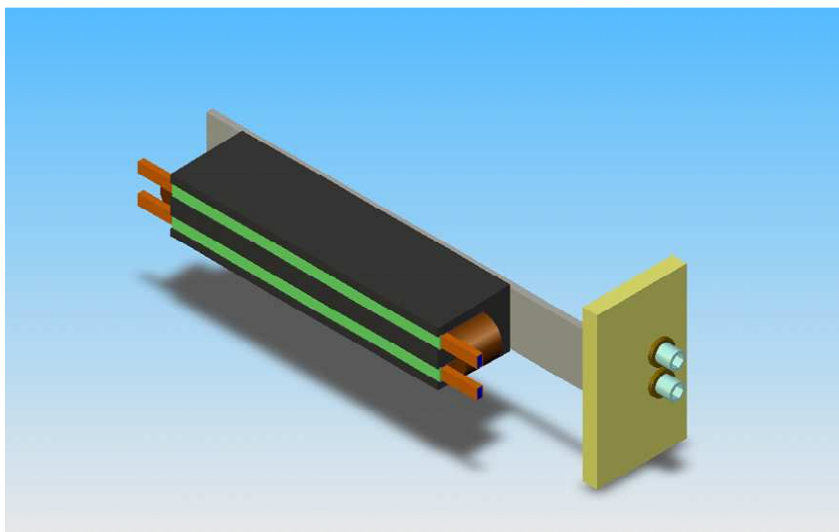
Do této kategorie spadají úlohy kdy se vysokými rychlostmi proudění plynů může měnit jejich hustota. V těchto případech ANSYS používá rozdílné řešící algoritmy.

V této práci se předpokládaly jako chladicí media nestlačitelné kapaliny, tudíž se touto problematikou nebudeme nadále zabývat, přičemž pro bližší informace lze čerpat z technické dokumentace [3].

9.5. Geometrický model

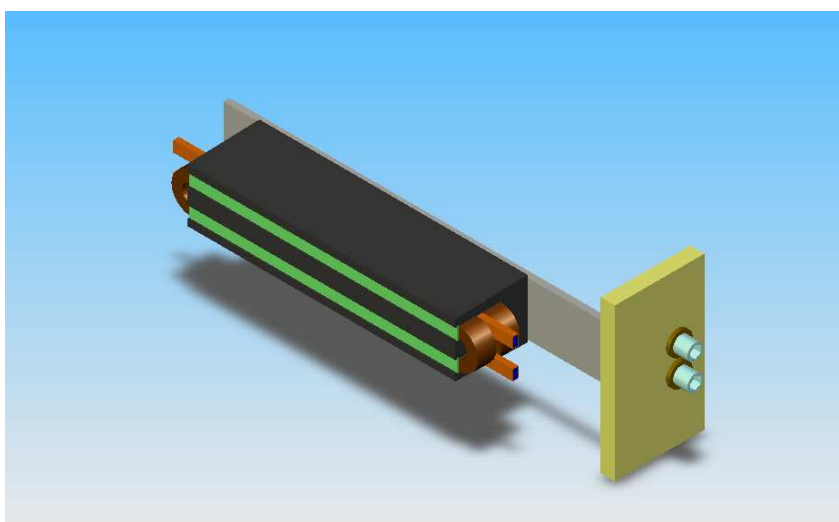
Jak bylo uvedeno v samotném úvodu k této kapitole, geometrický model byl nejprve navržen v CAD softwaru SolidWorks. V tomto programu se nejprve namodelovaly jednotlivé součásti synchronního stroje. Součástmi se má na mysli statorový svazek, vinutí a chladicí kanály s chladicím médiem. Byly vytvořeny celkem tři modely, které se lišily umístěním chladicích kanálů.

První model měl chladicí vedení umístěné ve spodní části statoru, tedy nejbližší k rotoru. Výhoda tohoto umístění spočívala v tom že Jouleovy ztráty vznikající ve statorovém vinutí byly pohlcovány chladicím systémem tak, že docházelo k minimálnímu přestupu tepelného toku do rotoru. Na Obr. 10 vidíme jak model vypadal namodelovaný v CAD systému SolidWorks.



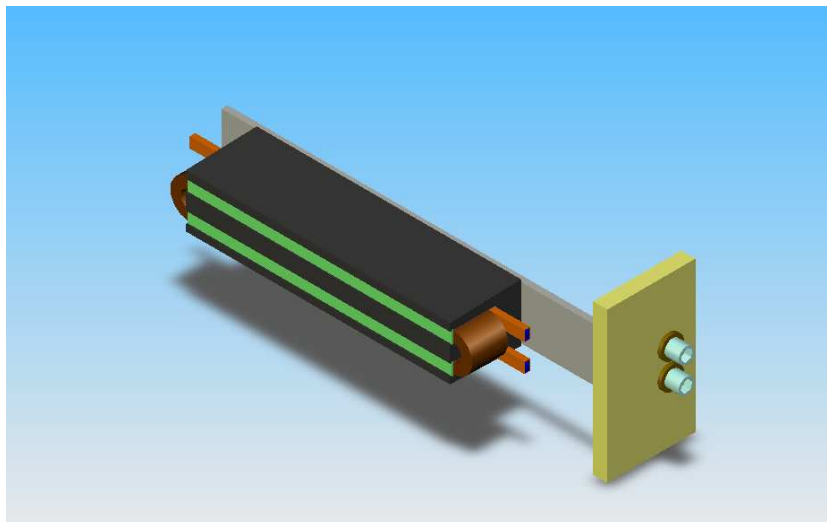
Obr. 10 Model části synchronního motoru s chlazením ve spodní části vinutí vytvořený v SOLIDWORKSu

Na Obr. 11 je znázorněn model, kde je chladicí systém umístěn uprostřed vinutí. U této koncepce bylo předpokládáno, že nastane pravděpodobně nejlepší odvod tepelných ztrát z vinutí. Znamená to tedy, že u takto chlazených strojů může vinutím protékat větší proud. To vede k většímu zatížení a případně větší přetížitelnosti takto konstruovaného stroje. Magnetické vlastnosti materiálu se s rostoucí teplotou výrazně zhoršují. Což vede k poklesu účinnosti stroje. Lepší odvod tepla znamená i delší životnost, nemusí se používat drahé tepelné izolace vodičů a dochází tedy i k ekonomickým úsporám.



Obr. 11 Model části synchronního motoru s chlazením uprostřed vinutí vytvořený v SOLIDWORKSu

Poslední model, který byl předmětem pozorování, je s chlazením umístěným v horní části vinutí. Zde se uvažuje velická podobnost vlastností jako u prvního modelu. Tedy v místě nejvzdálenějším od chlazení se předpokládají největší dosažené teplota vinutí vůbec.



Obr. 12 Model části synchronního motoru s chlazením v horní části vinutí vytvořený v SOLIDWORKSu

U průměrné teploty se uvažuje přibližně stejná velikost jako na modelu s chlazením spodní části vinutí, která bude větší jak při chlazení uprostřed. Navíc tento model je nejvíce blízký skutečnému motoru, neboť u něj se chlazení nachází taktéž v horní části.

10. VÝPOČTOVÁ SIMULACE

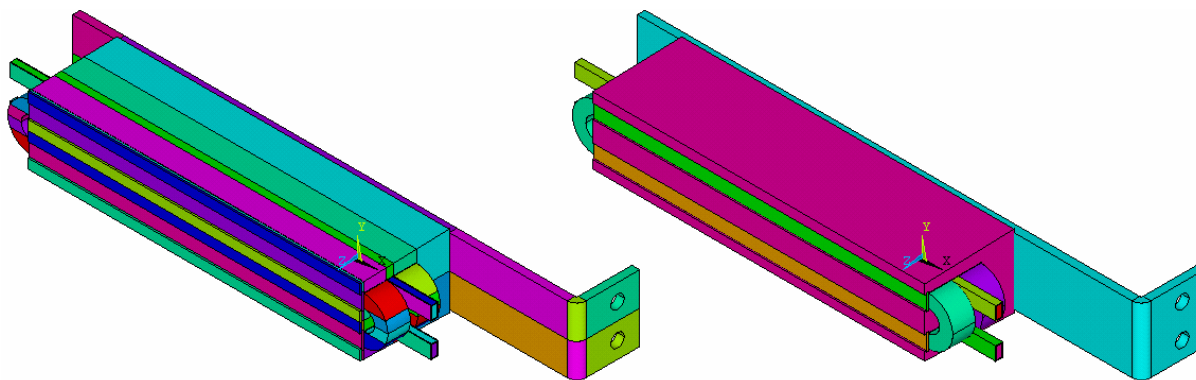
V následujících podkapitolách si ukážeme jak z běžného 3D geometrického modelu udělat model pro teplotní úlohy a jak jej použít pro numerický výpočet. Ve většině CAD systému dostaneme grafické návrhy, které kromě geometrie nenesou žádnou další informaci o vykresleném tělese. To je pro mnohé výpočtové programy pracující na bázi například MKP nedostačující. Dalším faktem je, že tato geometrie je pro výpočet mnohdy nevhodná. Ve většině případů obsahuje konstrukční úpravy jako například zaoblení hran či různé otvory které nemají podstatný vliv na samotnou funkci součásti nebo stroje. Z těchto důvodů musíme geometrii upravit, abychom jak si dále ukážeme, mohli vytvořit rovnoměrnou síť. Tato pravidelnost sítě povede k lepší konvergenci výsledků s přesnějšími hodnotami.

Hodnoty veličin zadávané v této kapitole, budou voleny tak, aby představovaly chod motoru v běžných provozních podmínkách, pro které byl motor navržen. Chladicí kanály jsou z mosazi. Jako chladicí médium je volena voda. Předpokládané ztráty ve vinutí jsou $P_J=300\text{W}$. Vinutí je měděné vyplněné impregnačním lakem. Celkový průtok vody Q v chladicím systému bude volen od $1\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ do $3\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Výsledkem z výpočtu mají být získány střední ustálené teploty vinutí pro jednotlivé průtoky chladicí kapaliny a jednotlivé uložení chladicího systému ve vinutí.

Jako výchozí model na kterém je krok za krokem popsán postup jak řešit úlohy pomocí ANSYS/FlotranCFD byl volen model s chlazením umístěným uprostřed a průtokem vody 1 l/min v jednom chladicím kanále. Celkový průtok v chladicím systému tedy je $2\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Pro další modifikace přímého chlazení vinutí je postup zcela identický.

10.1. Nastavení materiálových vlastností

Model geometrie ze SOLIDWORKSu byl uložen ve formátu ACIS jako .sat soubor (save as text). Následně byla geometrie importována do ANSYSu. Jelikož se požaduje, aby výsledky ze simulace byly co nejpřesnější, před samotným výpočtem rozdělíme geometrii všech těles na co nejjednodušší možné geometrické útvary, v tomto případě budeme požadovat tvary blízké kvádru. Tím bude docíleno při generování elementů co nejrovnoměrnější síť (MESH). Na Obr. 13 je vidět rozdíl mezi upravenou a neupravenou geometrií. Z obrázku je patrné, že nám vzniklo více objemů, ze kterých je celý model složen.



Obr. 13 Rozdíl mezi upravenou (model vlevo) a neupravenou (model vpravo) geometrií

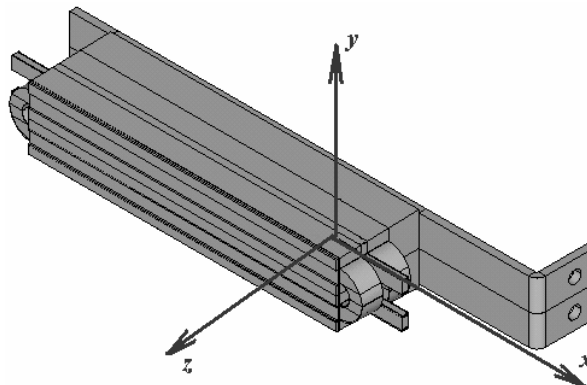
Výše bylo zmíněno, že model má pouze informaci o geometrii. Žádné jiné fyzikální veličiny, které by jej více přiblížili reálnému tělesu, v sobě nenesou. Nutno poznamenat aby veškeré veličiny byly zadávány v základních jednotkách SI soustavy, to platí i pro geometrii. V software ANSYS je nutné při zadávání vstupních parametrů dodržovat konzistenci jednotek, abychom se nedopustily chyby při interpretaci výsledků. Ty mohou být správné, ale nedodržením tohoto pravidla je dostaneme v jednotkách jiných než jsme zvyklí pracovat a výsledek budou zavádějící.

První informaci kterou je do ANSYSu nutno zadat, bude typ elementu. Protože se jedná o typ úlohy s prouděním, máme na výběr ze dvou prvků, jeden pro 2D a jeden pro 3D úlohy. Poněvadž máme třídimenzionální model, vybereme prvek 3D FLOTRAN 142, více o vlastnostech tohoto prvku nalezneme v [3].

Nyní přistoupíme k zadání nezbytných materiálových veličin pro výpočet teplotní úlohy. Tyto údaje jsou k dispozici v **Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models**. K dispozici máme celkem 7 různých materiálů (chladicí médium - voda, satorový svazek, držák svazku – pásovina tvaru L, satorové vinutí, chladicí potrubí, izolace v drážce a zámek vinutí). Materiál 1 je pro tento typ úlohy výhradně určen pro proudící tekutinu. Zde zatím nebudeme nic zadávat a přistoupíme hned k materiálu 2.

Materiál 2 již lze přiřadit k libovolnému objemu. V této práci byl materiálem 2 označen satorový svazek. Protože se jednalo o řadu plechů, které byly k sobě přivařeny měl materiál ortotropní vlastnosti. Ve směru osy x byla tepelná vodivost stanovena na $\lambda = 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Jednalo se o posloupnost materiálů se složením plech-vzduchová mezera-plech. Samotný kovový plech má mnohem lepší tepelnou vodivost ale i malá vzduchová

mezera, která slouží jako tepelný izolant, tuto vlastnost velice degraduje. Pro osy y a z byla určena $\lambda = 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, v těchto směrech už žádné vzduchové mezery k dispozici nejsou. Všechna tělesa byla natočena a umístěna k souřadnému systému jak je uvedeno na Obr. 14.



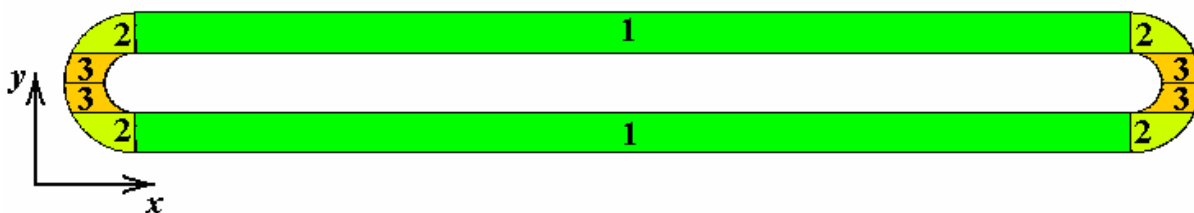
Obr. 14 Poloha a natočení tělesa vzhledem k souřadnému systému

Materiálem 3 se stanovila pásovina. Protože se jedná o celistvý kovový materiál předpokládá se jeho izotropní vlastnost. V tomto případě se tepelná vodivost stanovila $\lambda = 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Chladicí potrubí bylo definováno jako materiál 4 s tepelnou vodivostí $\lambda = 103 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, což je tepelná vodivost odpovídající mosazi, ze které bylo vedení pro chladicí médium tvořeno.

Izolace v drážce a zámek vinutí jsou popsány materiálem 5 a materiálem 8. V prvním případě byla $\lambda = 0,25 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a pro zámek vinutí $\lambda = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

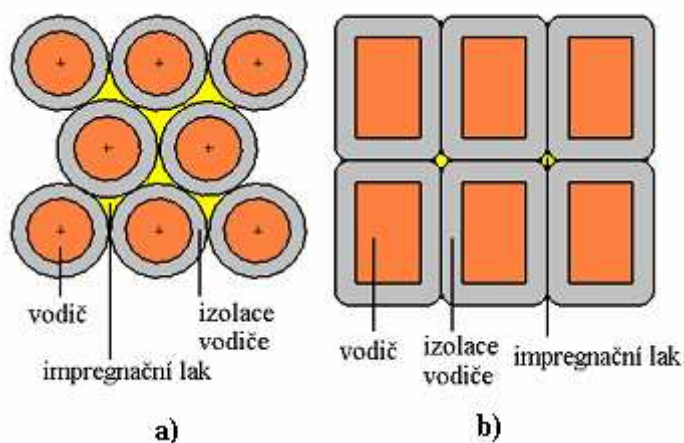
Výše bylo uvedeno, že materiálu máme celkem 7. Jako poslední zbývá ještě popsat vinutí statoru. Problém však nastává u zadávání vstupních parametrů, které se definují k souřadnému systému. U statorového vinutí vidíme, že je omotáno kolem svazku. Vinutí musí být tedy rozděleno na menší části a pro tyto části stanoveny vodivosti k jednotlivým osám souřadného systému. Geometrické uspořádání vinutí je patrné z Obr. 15.



Obr. 15 Geometrie statorového vinutí pro zadání fyzikálních vlastností

Celé vinutí se předpokládá z mědi čtvercového průřezu. První část vinutí podle Obr. 15 má ve směru osy x tepelnou vodivost $\lambda = 260 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Pro měď je tepelná vodivost přibližně $\lambda = 385 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. U vinutí se předpokládá, že není ideálně navinuté a mezi jednotlivými vodiči je mezera, zaplněná impregnačním lakem, pro jeho lepší tepelnou vodivost oproti vzduchu. Pro srovnání vzduch má tepelnou vodivost $\lambda = 0,025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ zatímco impregnační laky přibližně $\lambda = 0,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Pro náhradní tepelnou vodivost v podélném směru, budeme vycházet z následujících úvah. Provedeme vinutím příčný řez. Dostaneme na vinutí pohled jaký je uvedený na Obr. 16 a) pro kruhový průřez, b) pro obdélníkový průřez vodiče. Spočítáme celkové obsahy ploch které zabírá vodič, izolace vodiče a impregnační lak.



Obr. 16 Průřez vinutím a) z kruhového profilu vodiče b) obdélníkového profilu vodiče

Z elektrotechniky je všeobecně známo, že elektrický odpor vodiče stanovíme jako

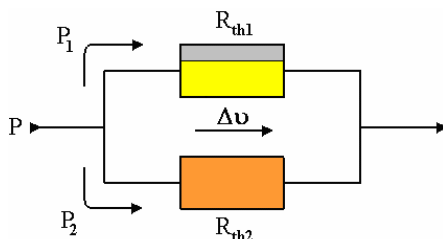
$$R = \rho_v \cdot \frac{l}{S} \quad (10.1)$$

Této analogie využijeme pro stanovení tepelného odporu R_{th} jak je uvedeno v kapitole 5.1 jako $R_{th} = \frac{\delta}{\lambda \cdot A}$. Tímto vztahem si vyjádříme tepelné odpory vodiče, izolace vodiče a impregnace. Jelikož tepelná vodivost izolace i impregnačního laku bývá přibližně stejná a plocha, kterou lak v řezu zaujímá, je malá, zjednoduší se nám stanovení tepelného odporu v podélném směru na součet dvou paralelně zapojených odporů R_{th1} – odpor impregnace včetně izolace a R_{th2} tepelný odpor vodiče. Tepelné odpory pro oba úseky jsou tedy rovny

$$R_{th1} = \frac{\delta}{\lambda_{ci} \cdot A_{ci}} \quad (10.2)$$

$$a \quad R_{th2} = \frac{\delta}{\lambda_{cv} \cdot A_{cv}} \quad (10.3)$$

kde λ_{ci} je celková tepelná vodivost izolace λ_{cv} je tepelná vodivost vodiče, A_{ci} a A_{cv} jsou celkové plochy v řezu pro izolaci a pro vodič. Náhradní tepelný odpor R_{th} stanovíme jako paralelní zapojení dvou odporů viz. Obr. 17



Obr. 17 Náhradní tepelný odpor pro podélný směr vinutí

$$R_{th} = \frac{R_{th1} \cdot R_{th2}}{R_{th1} + R_{th2}} \quad (10.4)$$

Tímto byl stanoven náhradní tepelný odpor v podélném směru, do ANSYSu však zadáváme tepelnou vodivost. Provedeme ještě na závěr zpětný přepočít podle vztahu (4.4) ze kterého vyjádříme λ . Plochou A nyní uvažujeme celkovou plochu, kterou vyplňuje jak průřez vodiče tak i impregnace.

Při určování tepelné vodivosti v příčném směru se vychází z úvahy, že teplo přestupuje skrze izolaci vodiče a hlavně prostorem mezi jednotlivými vodiči. Tento prostor je vyplněn, jak bylo zmíněno, impregnačním lakem. U vodiče je vodivost mnohonásobně větší než laku nebo izolace, takže se ve výpočtu vodivost vodič nebude dále vyskytovat. Ve

výpočtu se uvažuje předpoklad, že prostor cívky je nahrazen okolím s náhradní tepelnou vodivostí. Pro výpočet náhradní tepelné vodivosti bylo čerpáno z literatury [4].

Protože na vinutí statoru bylo použito vodiče se čtvercovým průřezem, pro výpočet náhradní tepelné vodivosti λ_n platí následující vztahy:

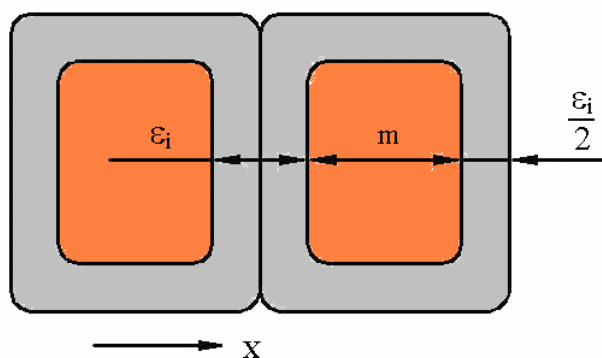
$$\lambda_n = \lambda_i \cdot \left(1 + \frac{i_x}{i_x - 1} \cdot \frac{m}{\varepsilon_i} \right) \quad (10.5)$$

kde i_x – počet vodičů ve směru toku X

λ_i – vodivost izolace (impregnačního laku)

m – výška případně šířka vodiče

ε_i – šířka izolace



Obr. 18 Obdélníkový profil vodiče

Jestliže máme v řadě několik vodičů, vztah se upraví do podoby

$$\lambda_n = \lambda_i \cdot \left(1 + \frac{m}{\varepsilon_i} \right) \quad (10.6).$$

Podobně postupujeme pro svislý směr. V případě použití vodičů kruhových průřezů je náhradní vodivost určit složitější jelikož je λ_n závislá na uspořádání vodičů, plnění drážky atd. Často je však používán vzorec Vidmarův

$$\lambda_n = \lambda_i \cdot \left(\frac{0,6}{1 - \frac{d}{d'}} \right) \quad (10.7)$$

kde d – průměr holého vodiče

d' – průměr vodiče včetně izolace

Více o problematice ke stanovení náhradní tepelné vodivosti nalezneme v [4]. Dosadíme-li do rovnice (10.5) určíme pro první část cívky podle Obr. 15 její náhradní vodivost k osám y a z . Pro osu z , kde se uvažuje počet vodičů na výšku $i_x = 20$, případy umístění chlazení nahoře a dole se stanovily:

$$\lambda_n = \lambda_i \cdot \left(1 + \frac{i_x}{i_x - 1} \cdot \frac{m}{\varepsilon_i} \right) = 0,25 \cdot \left(1 + \frac{20}{19} \frac{1}{0,1} \right) = 2,88 \frac{W}{m \cdot K} \quad (10.8)$$

S chlazením umístěným uprostřed vinutí se vodivost stanovila pro 10 vodičů nad resp. pod chladícím potrubím.

$$\lambda_n = \lambda_i \cdot \left(1 + \frac{i_x}{i_x - 1} \cdot \frac{m}{\varepsilon_i} \right) = 0,25 \cdot \left(1 + \frac{10}{9} \frac{1}{0,1} \right) = 3,03 \frac{W}{m \cdot K} \quad (10.9)$$

Pro určení vodivosti ve směru osy y byla stanovena $\lambda_n = 3,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Podélnou část z celého vinutí máme určenou, zbývá nám ještě svislá část, na Obr. 15 označena číslem 3. Velikosti tepelné vodivosti zde budou co do hodnot stejné, jen dojde ke změně k jaké ose budou přiřazeny. Vezmeme-li první díl cívky a její podélnou vodivost k ose x , ve třetím dílu cívky ji zadáme do osy y atd.. Poslední částí vinutí - část 2 se k osám x a y určily vodivosti $\lambda = 130 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, k ose z $\lambda = 2,88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Po definování téměř všech potřebných veličin k řešení úlohy, se přistoupilo k vytvoření sítě. Protože se provedly úpravy na geometrii bylo možné si dovolit poměrně rovnoměrnou kvalitní síť. Z největší části se použil tvar prvku hexaedr pro vytvoření mapované sítě. Hustota sítě byla v rozmezí 200 000 – 272 000 elementů, podle typu modelu.

10.2. Nastavení CFD analýzy

Nyní přistoupíme k nastavení prostředí FLOTRAN, které najdeme v **Main Menu** > **Preprocessor** > **FLOTRAN Set Up**. V záložce **Solution Options** přesně určíme o jaký typ úlohy jde. Ty byly popsány v kapitole 9. Typ úlohy pro náš problém máme Steady State, tedy ustálený stav. Pro připomenutí, nezajímáme se o neustálený průběh teploty v závislosti na čase při akumulaci energie do tělesa. Dále má problém charakter turbulentního proudění s nestlačitelnými kapalinami, kde teplo přestupuje do okolí.

Protože se jedná o úlohu nelineární je zapotřebí nastavit počet iterací, to provedeme v záložce **Execution Ctrl**, kde je možno buď napevno nastavit samotný počet iterací nebo kritéria, kterých má být ve výsledku dosaženo při numerickém výpočtu.

Při zadávání materiálových vlastností nebyly záměrně definovány atributy kapaliny, pro kterou je vymezen materiál 1. Vlastnosti této látky nastavíme ve **FLOTRAN Set Up** > **Fluid Properties** (vlastnosti tekutiny). Všechny veličiny - hustota, viskozita, vodivost a tepelná kapacita (v některé literatuře též jako specifické teplo) se nastaví na následující konstantní hodnoty:

- **hustota** chladicí kapaliny v našem případě vody při teplotě 20°C $\rho = 998,205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- **viskozita**, zde pozor v ANSYSu je definována jako součin hustoty a viskozity tekutiny $\nu_A = \rho \cdot \nu_{\text{tekutiny}}$ tedy $\nu_A = \rho \cdot 1,004 \text{e-}6 = 0,001002197 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
- **tepelná vodivost** $\lambda = 0,597 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- **měrná tepelná kapacita** $c = 4180 \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Tímto bychom měli nastavené veškeré fyzikální vlastnosti pro kapalinu a materiály, ze kterých se skládá celá námi pozorovaná část statoru.

V následujícím odstavci se budeme věnovat nastavení okolního prostředí. Vše, co bude popisovat okolí, zadáme do tabulky, kterou nalezneme **FLOTRAN Set Up** > **Flow Environment** > **Ref Conditions**. Zde můžeme upravit parametry jako atmosférický tlak, modul objemové pružnosti, poměr specifického tepla, referenční teplotu a teplotu posunutou od teploty rovné absolutní nule. Pro námi řešený problém byly zadány následující hodnoty:

- **atmosférický tlak** $p_A = 101350$ Pa
- **modul objemové pružnosti** což je převrácená hodnota **stlačitelnosti** definované jako $\gamma = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp}$, kde V je původní objem kapaliny, dV změna objemu po stlačení a dp změna tlaku, byl ponechán na přednastavené hodnotě která činí $\beta = 10^{15}$, tato hodnota reprezentuje stav, kdy tekutina nemění svoji hustotu
- **poměr specifického tepla** je definován podle [3], cituji: “Poměr měrného tepla v konstantním tlaku k měrnému teple při stálém objemu“, přednastavená hodnota byla ponechána na stávající hodnotě 1,4
- **referenční teplota** určuje teplotu okolí v Kelvinech, byla nastavena na $T = 20$ K, za předpokladu že teplotní offset bude 273K, referenční teplota tedy odpovídala teplotě 20°C
- **teplota posunutá od absolutní nuly (offset temperature)** opět v Kelvinech, byla nastavena na $T_{off} = 273$ K

10.3. Definice okrajových podmínek

Je zcela jasná skutečnost, že jakákoliv tělesa svým chováním (změnou teploty, objemu atd.) působí na okolí přičemž okolí působí zpět na toto těleso zcela opačnou reakcí. Tyto dva subjektivní členy jsou jistým způsobem mezi sebou svázány jistou vazbou. Tuto vazbu, jak je těleso včleněno do okolí, vyjadřujeme okrajovými podmínkami. Nyní si tedy ukážeme jak tyto okrajové podmínky definujeme v ANSYSu.

Všechny úkony spojené se zadáváním okrajových podmínek nalezneme v **Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads**. Pro přidání OP dále volíme **Apply** pro odebrání **Delete**. Protože se zabýváme teplotní úlohou s prouděním tekutiny, zajímat nás bude především nabídka okrajových podmínek v sekci **Thermal** a **Fluid/CFD**. Pro naši úlohu nastavíme v sekci **Thermal** následující kritéria:

- **konvekce** – přestup tepla do okolí, zde byl na všechny vnější plochy, kromě ploch kterými prochází tekutina, zadán součinitel přestupu tepla $\alpha = 12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- **zdroje tepelné energie neboli *Heat generate*** – definuje na jednotku objemu energetické ztráty, pro náš případ určuje Jouleovy ztráty ve vinutí, jednotka je zde dána $[\text{W} \cdot \text{m}^{-3}]$, pro naši úlohu bylo do vinutí zadáno $P = 0,30533\text{e}7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, což odpovídalo Jouleovým ztrátám ve vinutí $P_j = 300\text{W}$ a objemu vinutí $V = 0,42577\text{e}-4 \text{ m}^3$

Z teplotních okrajových podmínek určující problém oteplování statorového vinutí stroje je to vše. Z podmínek popisující chování kapaliny v potrubí byly nastaveny pouze rychlost kapaliny vstupující do chladicího kanálu na vstupní plochy potrubí a výstupní tlak kapaliny z kanálu vystupující na výstupní plochy. V našem případě se rychlost a tlak nastavily na následující hodnoty:

- **rychlost kapaliny** na vstupní ploše kanálu $w = 1,258 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; plocha, kterou kapalina protéká $S = 0,13250\text{e}-4 \text{ m}^2$, ta nám odpovídá velikosti průtoku $Q = 1,667\text{e}-5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ tedy $1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$; vzhledem k souřadnému systému byla tato rychlost nastavena ve směru osy x
- **výstupní tlak z kanálu** do volného prostoru na výstupních plochách potrubí je roven nule $p = 0 \text{ Pa}$

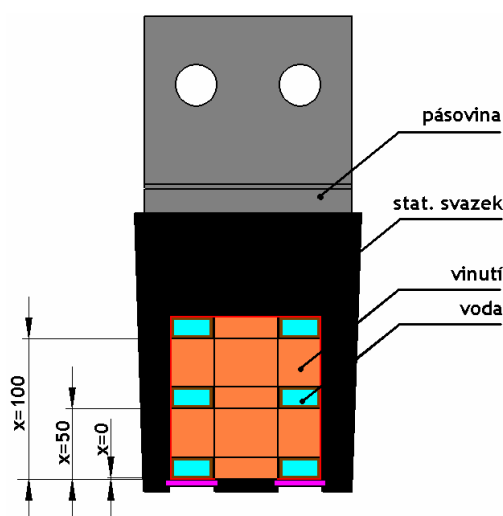
Protože se v této úloze zajímáme jaký vliv má průtok chladiva na celkové oteplení vinutí, byly zadány pro jednotlivé úlohy ještě průtoky kapaliny pro jedno chladicí potrubí $Q = 0,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ což odpovídá vstupní rychlosti $w = 0,629 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ až průtok $Q = 1,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ s rychlostí kapaliny $w = 1,887 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Tímto bychom měli kompletně nastavené veškeré parametry nezbytné pro výpočet. Řešič pomocí kterého byl výpočet prováděn byl zvolen Pre-Condition CG. Jestliže necháme program zvolit řešič, nemusí řešení konvergovat. V tomto případě je podle [3] doporučeno změnit řešič ve **FLOTRAN Set Up > CFD Solver Controls** pro rychlosti tekutiny na řešič typu PBCGM z TDMA.

11. ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ A ANALÝZA DAT

V předchozí kapitole byl vytvořen numerický model k určení ustálené teploty vinutí. Pomocí tohoto modelu bylo řešeno celkem devět různých úloh způsobů přímého chlazení vinutí. Z analyzování výsledků nás bude zajímat na který faktor je chlazení vinutí nejvíce citlivé. Mezi faktory ovlivňující chlazení byly zahrnuty tyto:

- ve všech případech byly stanoveny ztráty ve vinutí $P_J = 300 \text{ W}$
- průtoky chladicího media byly voleny na $Q_1 = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, $Q_2 = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a $Q_3 = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
- polohy chladících trubic byly pod vinutím $x = 0$, uprostřed vinutí $x = 50$ a nad vinutím $x = 100$ viz. Obr. 19, ve všech případech bylo požadováno přímého kontaktu chladících trubic s vinutím



Obr. 19 Jednotlivá umístění chlazení pro $x = 0$, $x = 50$, $x = 100$

Jako výsledky výpočtu byly požadovány:

- střední teplota vinutí pro každou úlohu
- oteplení chladicího média pro každý případ řešení
- ztráty odvedené do okolí přirozenou konvekcí a sáláním
- ztráty odvedené vodou

- maximální teplota vinutí
- účinnost chladicího systému

11.1. Energetická bilance

Protože se zabýváme problematikou ustálené teploty musí platit, energie do soustavy vstupující je rovna energii ze soustavy vystupující tedy

$$P_J = P_\alpha + P_w \quad (11.1)$$

kde P_J – Jouleovy ztráty ve vinutí,

P_α – ztráty odvedené sáláním a přirozenou konvekcí z povrchu těles,

P_w – ztráty odvedené do chladicí kapaliny.

P_w odvedené do chladicí kapaliny určíme jako

$$P_w = \rho_w \cdot c_w \cdot Q \cdot (v_{win} - v_{wout}) = \rho_w \cdot c_w \cdot Q \cdot \Delta v_w \quad (11.2)$$

kde ρ_w – hustota vody,

c_w – měrná tepelná kapacita vody,

Q – celkový průtok vody,

v_{win} – teplota vody vstupující do chladicího systému,

v_{wout} – teplota vody vystupující z chladicího systému.

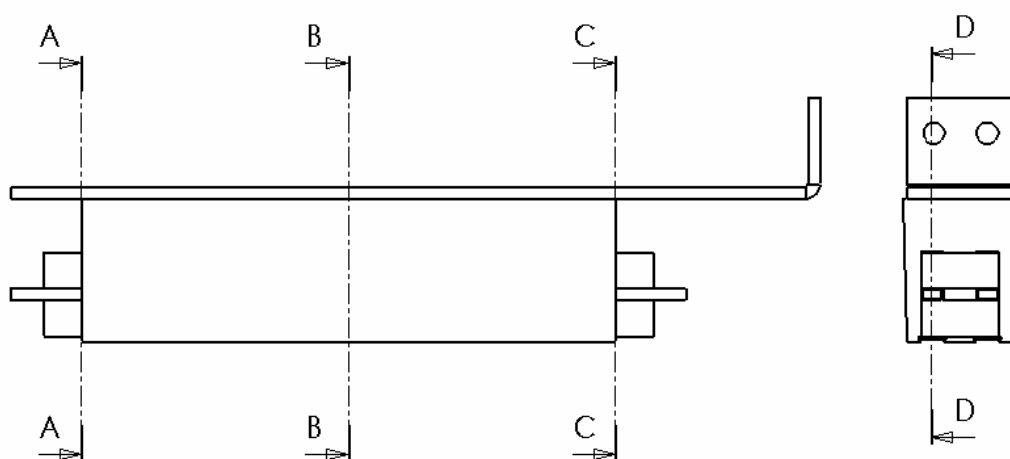
Velikosti jednotlivých veličin byly získány z výpočtu v ANSYSu. Pro stanovení průměrných teplot posloužilo makro napsané pro tento software. Makro je vloženo v příloze pod názvem *at.mac* a bylo převzato z [7] kde je k dispozici návod jak jej používat. Veškeré výsledky vztahující se k proudění kapalin a přenosu tepla jsou po výpočtu softwaru ANSYS ukládány do souboru s příponou *.pfl.

Pro jednotlivé případy způsobu chlazení byly zaznamenány z výpočtového softwaru ANSYS výsledky, které jsou vypsány v následujících tabulkách. Grafická interpretace výsledků pro jednotlivé způsoby chlazení je vyobrazena pod tabulkami.

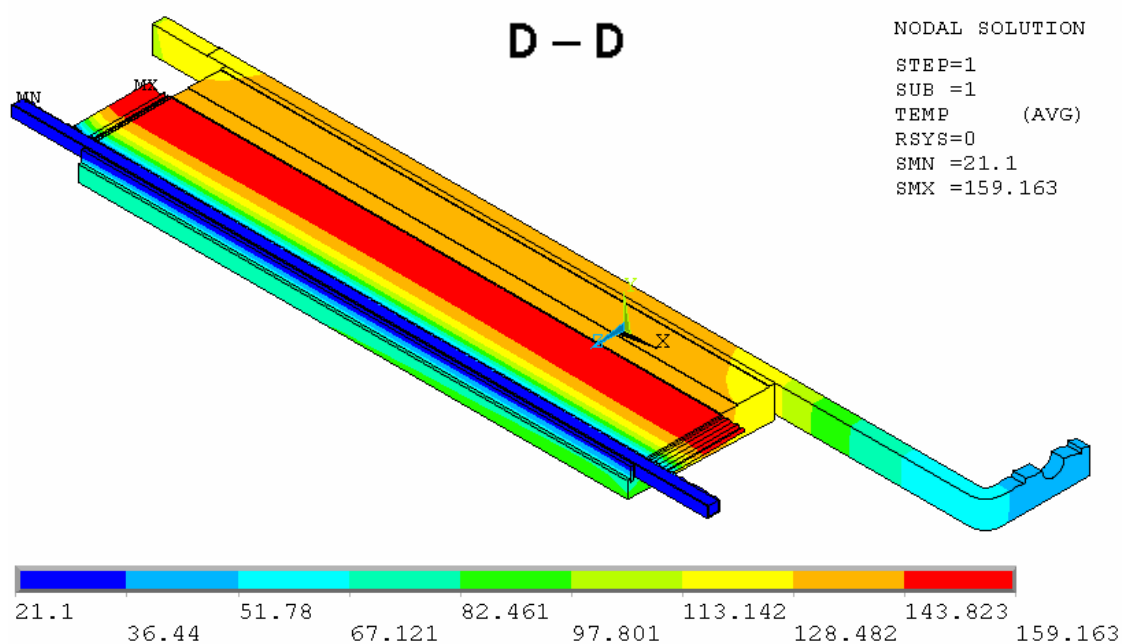
Tab. 3 Přehled získaných výsledků z výpočtové simulace pro chlazení umístěno dle Obr. 10 a jednotlivé průtoky vody.

Chlazení dole	$Q_1 = 1 \text{ lmin}^{-1}$	$Q_2 = 2 \text{ lmin}^{-1}$	$Q_3 = 3 \text{ lmin}^{-1}$
Průměrná teploty vinutí v_{ave} [°C]	128,011	120,232	117,116
Oteplení vody Δv_w [°C]	3,986	2,036	1,371
Maximální teplota vinutí na čele cívky v_{max} [°C]	160,667	153,531	150,866
Ztráty odvedené do vody P_w [W]	263,75	265,96	266,13
Ztráty odvedené přirozenou konvekcí a sáláním P_α [W]	35,37	32,29	31,05
Energetická bilance P_f [W]	299,12	298,25	297,18
Numerická odchylka $e = 300 - P_f$ [W]	0,88	1,75	2,82
Účinnost chladicího systému η [%]	87,92	88,65	88,71

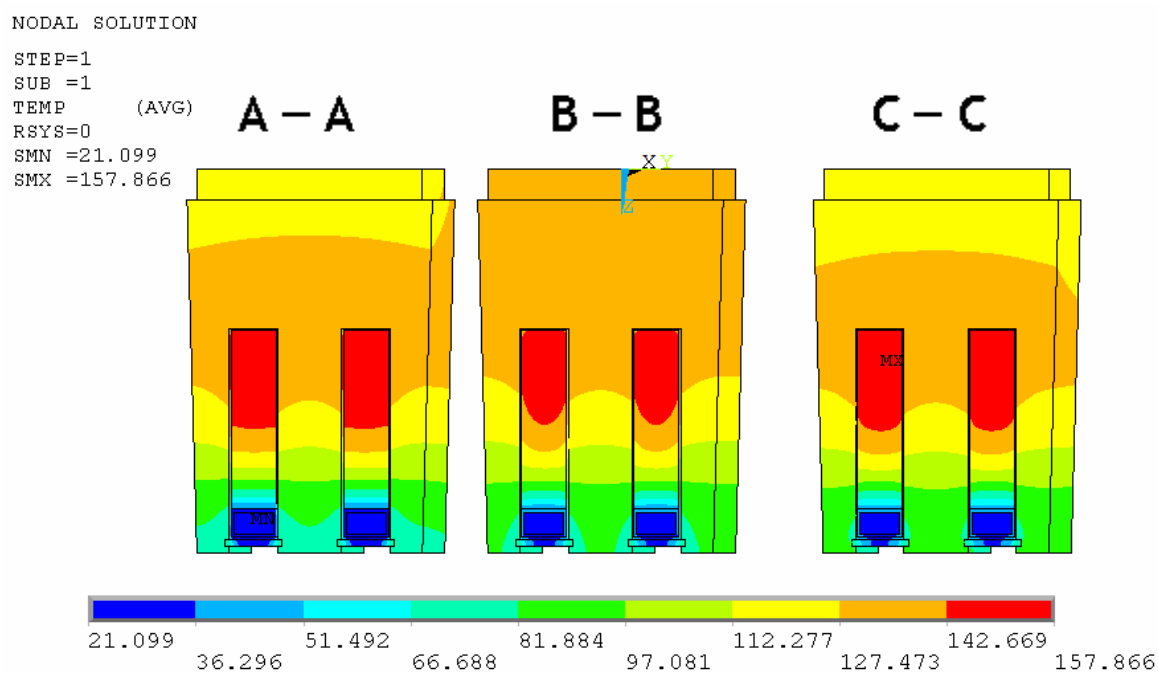
Ucelenou představu o teplotním spádu v tělese získáme z následujících obrázků. Na obrázcích jsou pro každý způsob chlazení vyobrazeny řezy přípravkem v podélném a příčném směru. Umístění jednotlivých řezů je patrné z Obr. 20. Z řezů je možné vypořizovat jaký vliv na celkové oteplení stroje má nepatrná izolace mezi vinutím a statorovým svazkem.



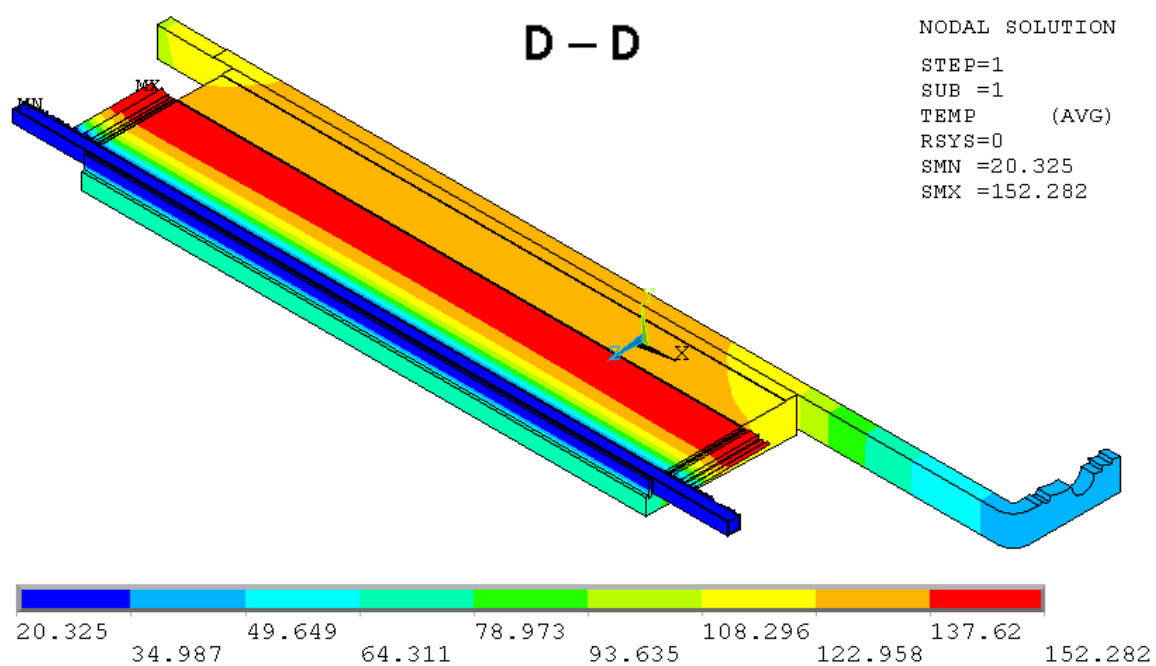
Obr. 20 Rozmístění řezů



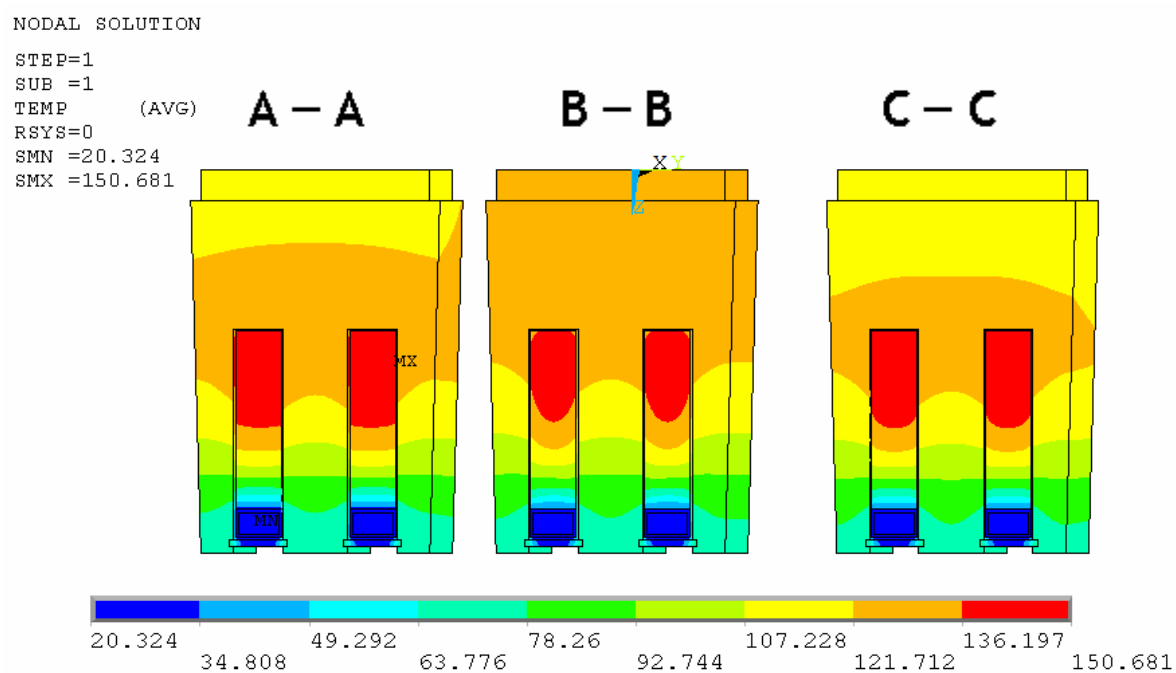
Obr. 21 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno dole, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



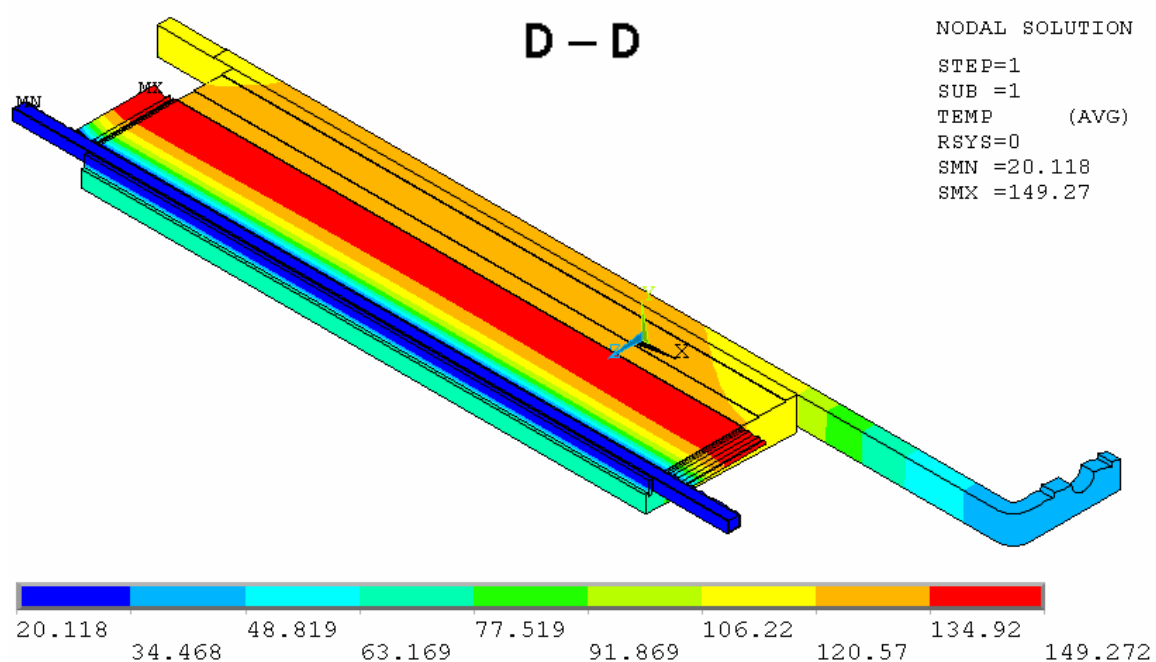
Obr. 22 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno dole, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



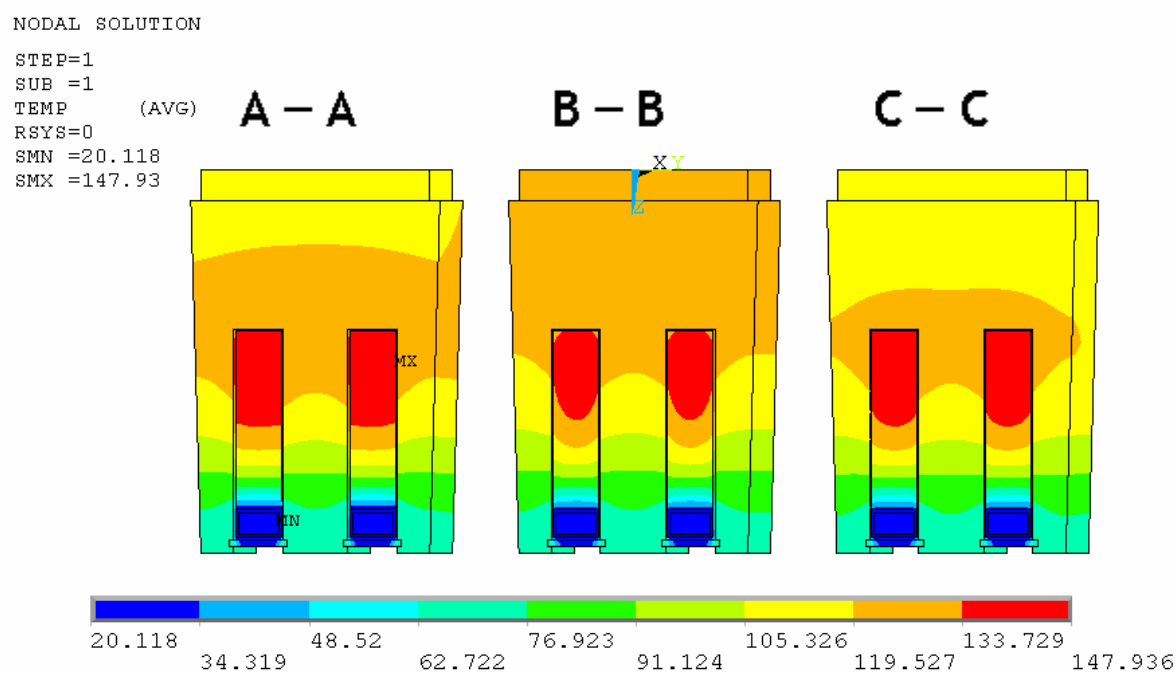
Obr. 23 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno dole, $Q = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 24 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno dole, $Q = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



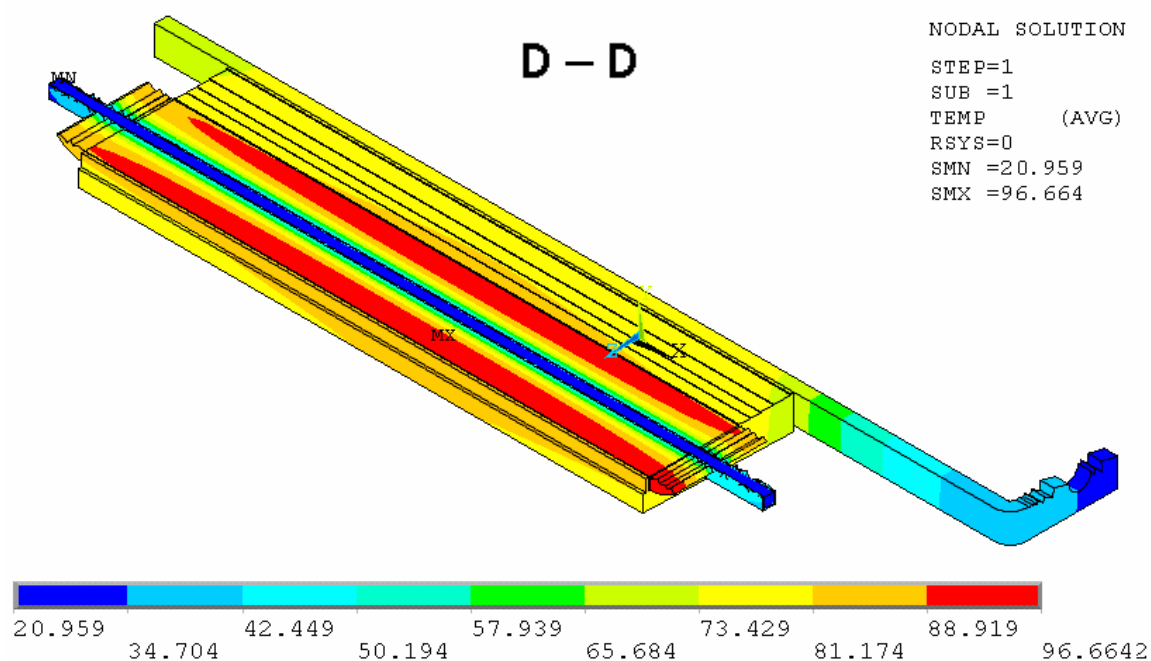
Obr. 25 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno dole, $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 26 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno dole, $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 4 Přehled získaných výsledků z výpočtové simulace pro chlazení umístěno dle Obr. 11 a jednotlivé průtoky vody

Chlazení uprostřed	$Q_1 = 1 \text{ lmin}^{-1}$	$Q_2 = 2 \text{ lmin}^{-1}$	$Q_3 = 3 \text{ lmin}^{-1}$
Průměrná teploty vinutí v_{ave} [°C]	81,120	65,694	61,972
Oteplení vody Δv_w [°C]	3,665	2,085	1,449
Maximální teplota vinutí na čele cívky v_{max} [°C]	105,174	89,647	85,841
Ztráty odvedené do vody P_w [W]	274,86	281,76	283,27
Ztráty odvedené přirozenou konvekcí a sáláním P_α [W]	22,46	16,73	14,67
Energetická bilance P_j [W]	297,32	298,49	297,94
Numerická odchylka $e = 300 - P_j$ [W]	2,68	1,51	2,06
Účinnost chladicího systému η [%]	91,62	93,92	94,42



Obr. 27 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno uprostřed, $Q = 1 \text{ lmin}^{-1}$

NODAL SOLUTION

STEP=1

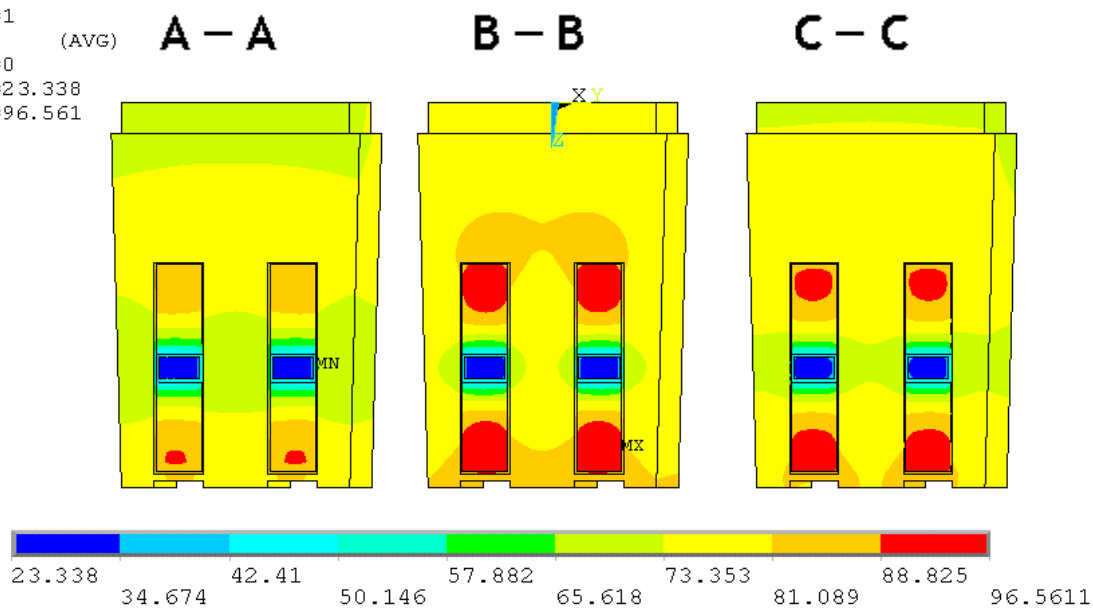
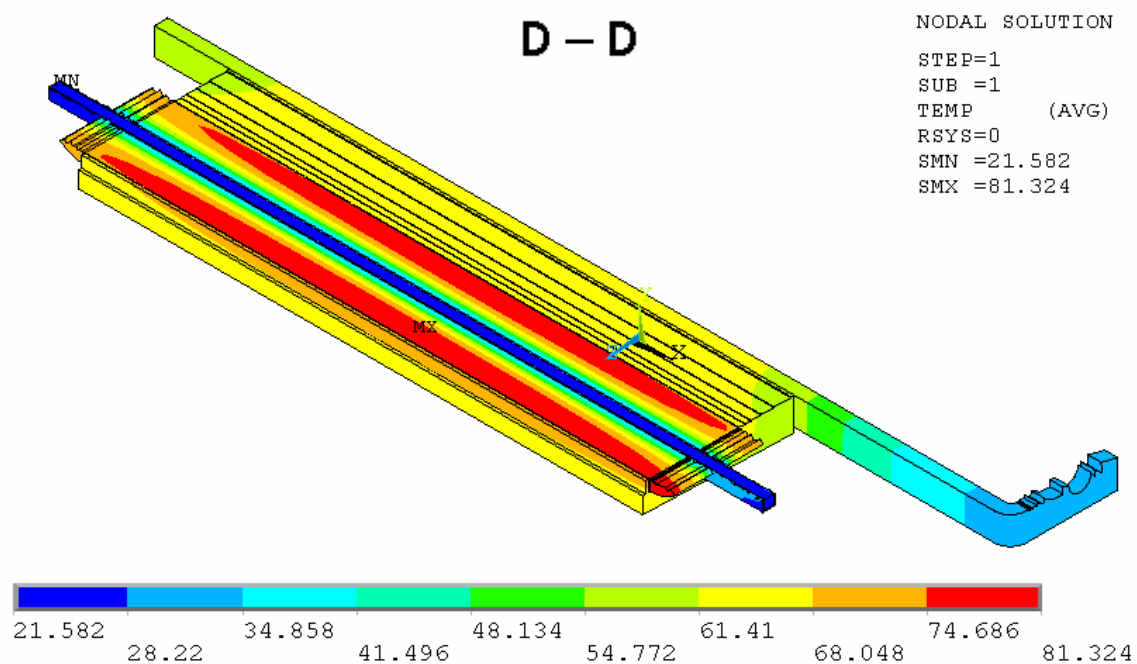
SUB =1

TEMP (AVG)

RSYS=0

SMN =23.338

SMX =96.561

Obr. 28 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno uprostřed, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ Obr. 29 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno uprostřed, $Q = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

NODAL SOLUTION

STEP=1

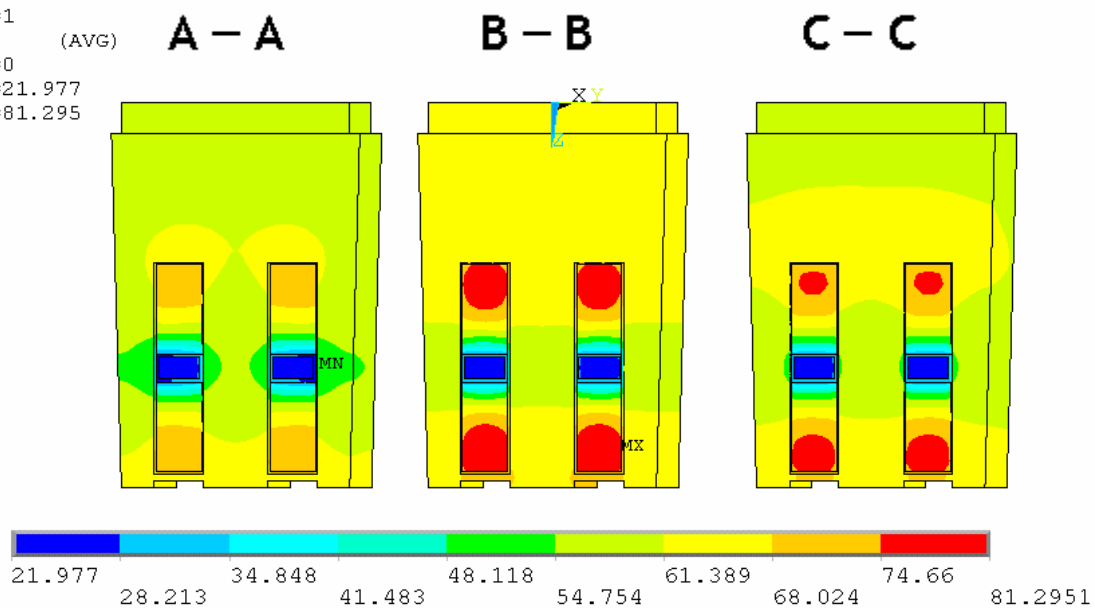
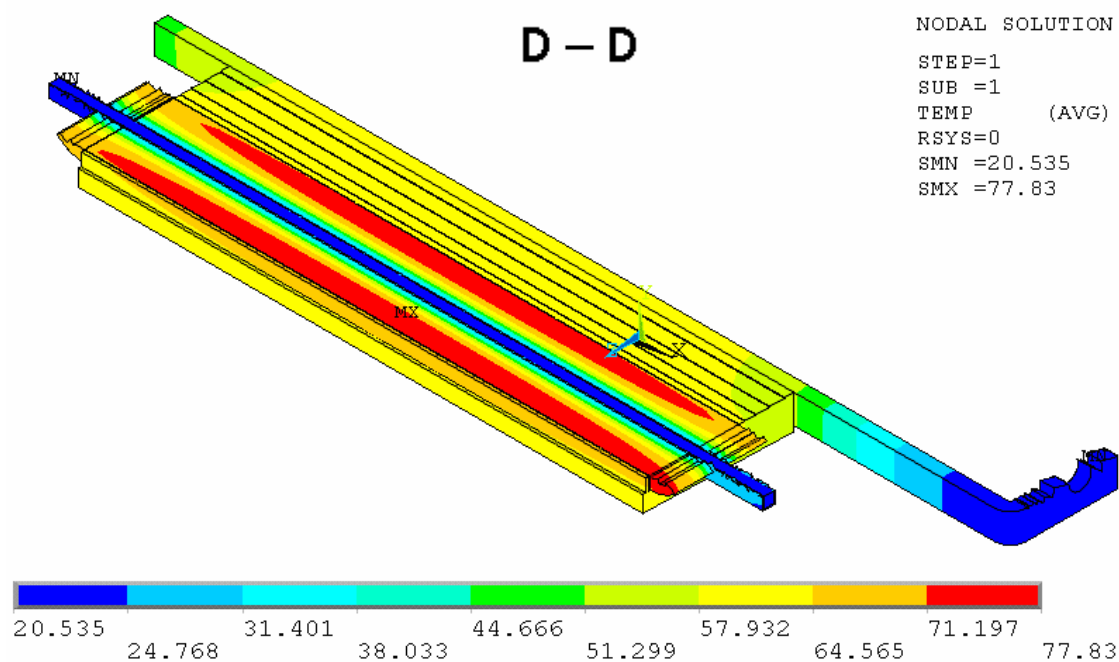
SUB =1

TEMP (AVG)

RSYS=0

SMN =21.977

SMX =81.295

Obr. 30 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno uprostřed, $Q = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ Obr. 31 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno uprostřed, $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

NODAL SOLUTION

STEP=1

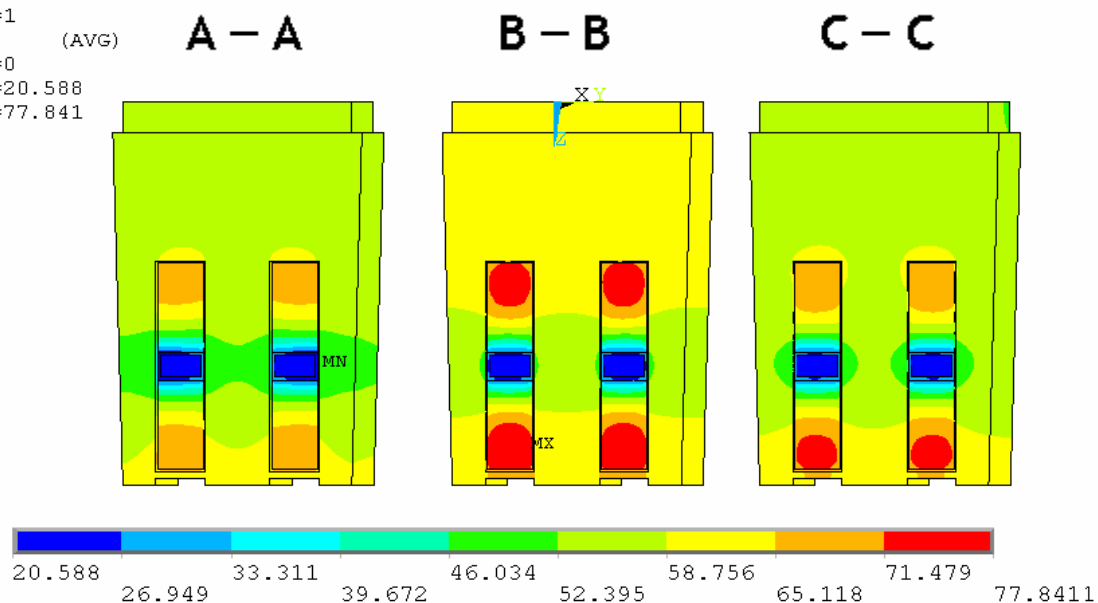
SUB =1

TEMP (AVG)

RSYS=0

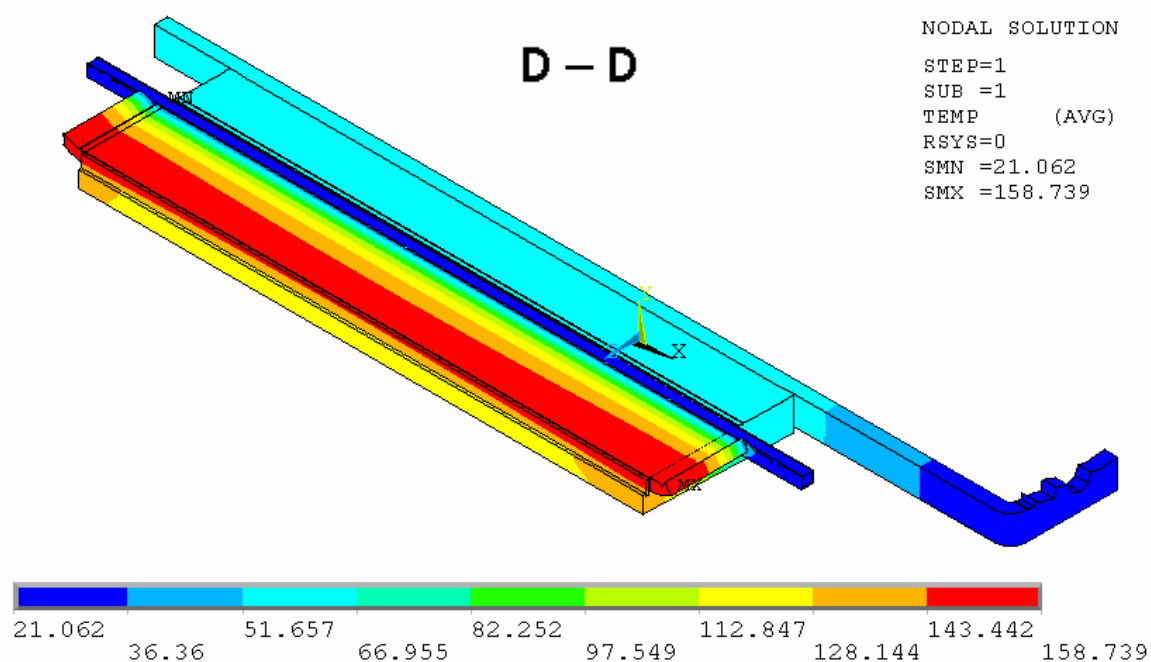
SMN =20.588

SMX =77.841

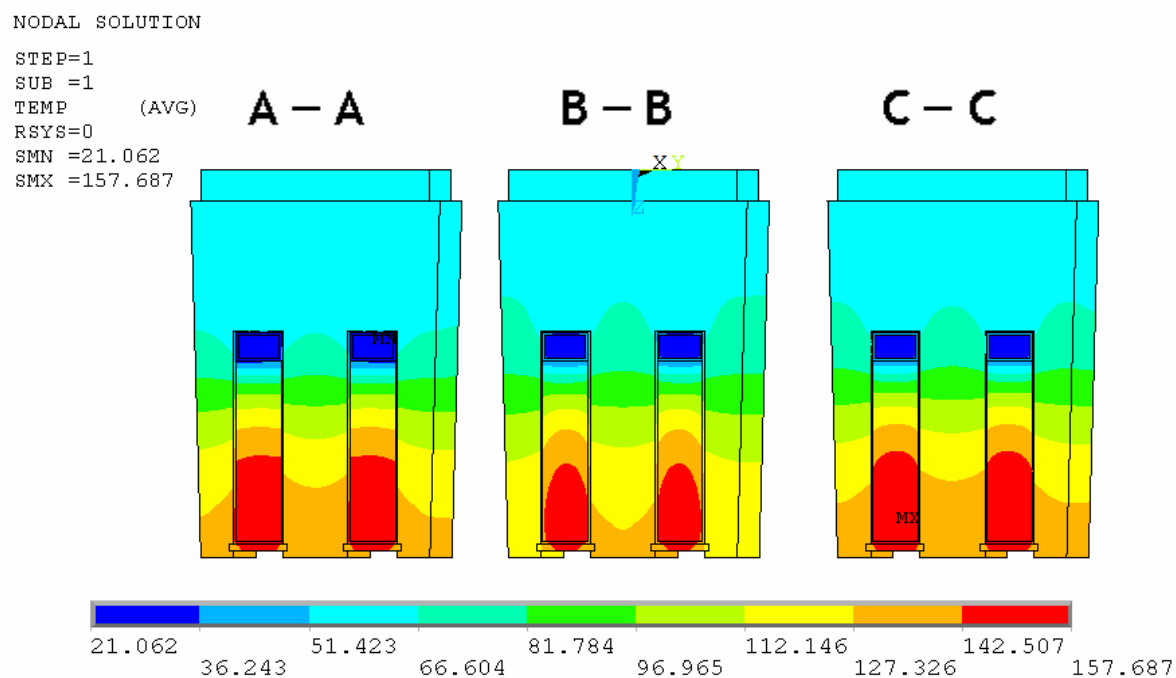
Obr. 32 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno uprostřed, $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Tab. 5 Přehled získaných výsledků z výpočtové simulace pro chlazení umístěno dle Obr. 12 a jednotlivé průtoky vody

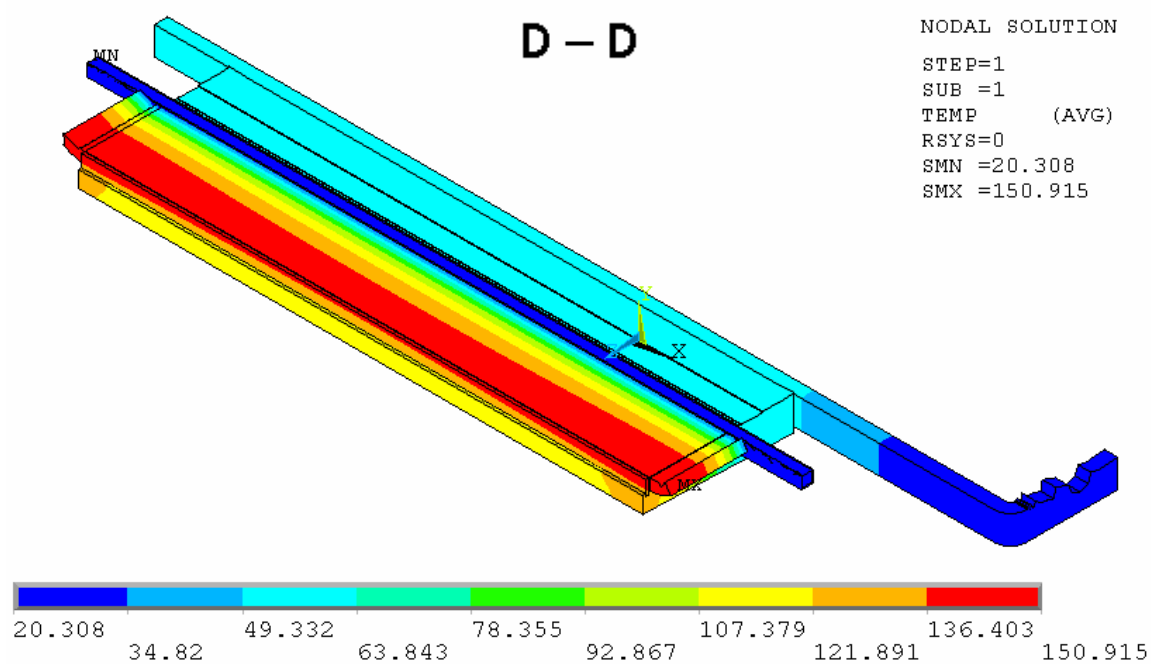
Chlazení nahoře	$Q_1 = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$	$Q_2 = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$	$Q_3 = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průměrná teploty vinutí v_{ave} [°C]	122,738	114,901	112,003
Oteplení vody Δv_w [°C]	4,130	2,112	1,426
Maximální teplota vinutí na čele cívky v_{max} [°C]	160,72	152,985	150,085
Ztráty odvedené do vody P_w [W]	272,48	275,13	276,17
Ztráty odvedené přirozenou konvekcí a sáláním P_α [W]	26,58	23,38	22,24
Energetická bilance P_j [W]	299,06	298,51	298,41
Numerická odchylka $e = 300 - P_j$ [W]	0,94	1,49	1,59
Účinnost chladicího systému η [%]	90,83	91,71	92,06



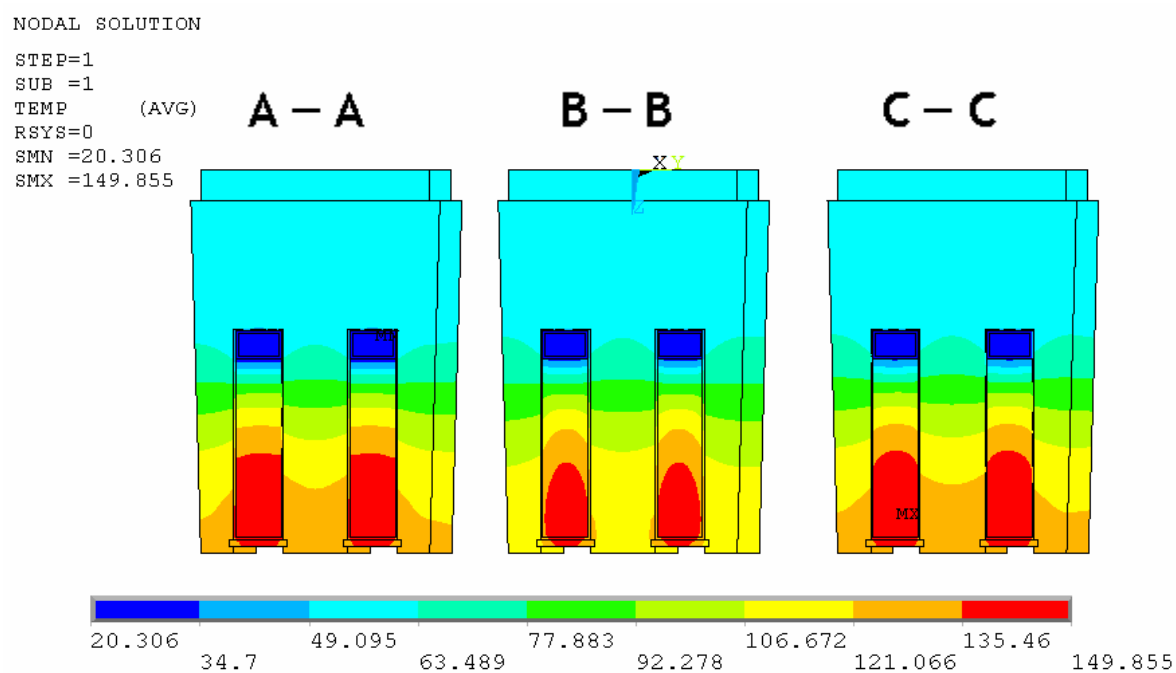
Obr. 33 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno nahoře, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



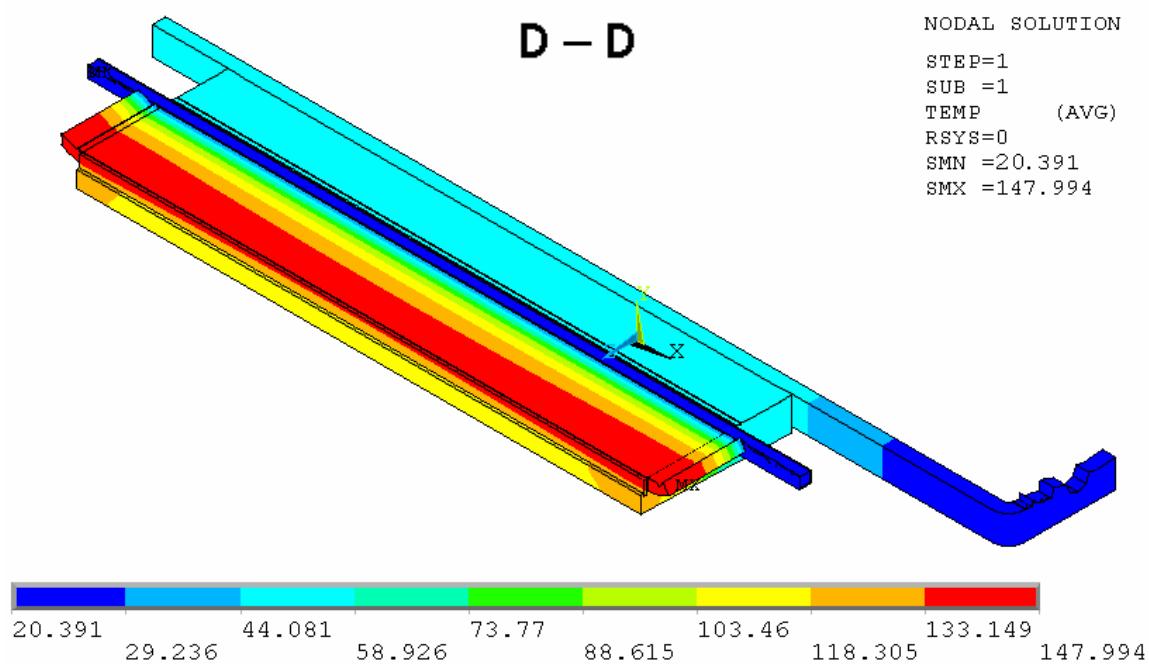
Obr. 34 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno nahoře, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



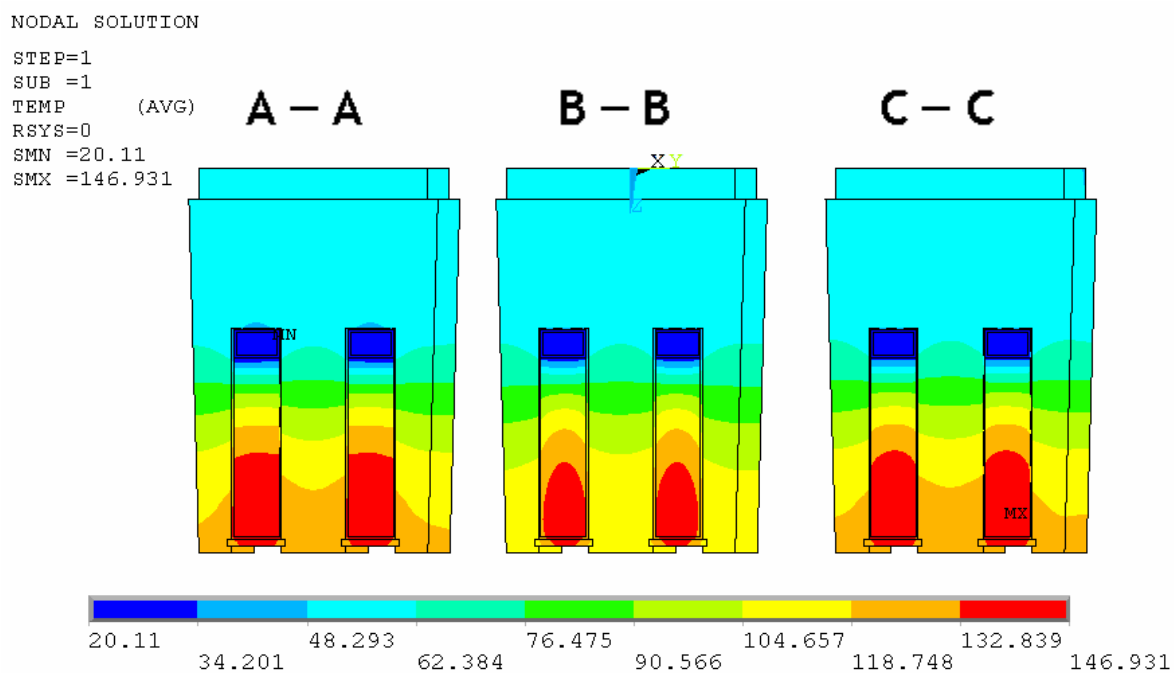
Obr. 35 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno nahoře, $Q = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 36 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno nahoře, $Q = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 37 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno nahoře, $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 38 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno nahoře, $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Pomocí MATLABu byly výsledky zpracovány a jednotlivé závislosti zaznamenány do grafů. Z poznatků kapitoly 6 víme, že pro simulace jsme se drželi úplného faktoriálního

návrhu 3^a. Rovnici (6.2) pro náš případ můžeme zapsat do podoby regresní funkce se dvěma proměnnými faktory x_1 a x_2 jako:

$$y_n = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_1^2 + \beta_4 \cdot x_2^2 + \beta_5 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (11.3)$$

kde n značí počet sestavených rovnic, v našem případě $n = 6$.

Nezávislá proměnná x_1 , jako bezrozměrná hodnota, představuje polohu chlazení, volena je pro hodnoty 0, 50 a 100, přičemž $x_1 = 0$ odpovídá umístění chlazení dle Obr. 10, $x = 50$ dle Obr. 11 a $x_1 = 100$ přísluší umístění chladících trubíc vykreslených na Obr. 12. Za další nezávislou proměnnou x_2 jsou dosazovány průtoky vody potrubím $Q_1 = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, $Q_2 = 2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a $Q_3 = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

Výsledkem regresní funkce je vždy jedna z vypočtených hodnot získaných ze simulace, kterým přísluší závislá proměnná y . Pro nalezení všech koeficientů β budeme vycházet z poznatků kapitoly 7, kde hodnoty matice **A** tvoří nezávislé proměnné x_1 a x_2 , vektor **b** obsahuje vypočtené hodnoty tedy například střední teploty vinutí nebo oteplení vody atd. a z hledaného vektoru **x** získáme neznáme koeficienty β .

Pro stanovení průběhu závislosti maximální teploty vinutí na průtoku a poloze chlazení se sestavilo devět rovnic vycházející z rovnice (11.3) a pomocí metody nejmenších čtverců se hledaly koeficienty β .

Tvar matice **A** je následující:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 50 & 1 & 2500 & 1 & 50 \\ 1 & 100 & 1 & 10000 & 1 & 100 \\ 1 & 0 & 2 & 0 & 4 & 0 \\ 1 & 50 & 2 & 2500 & 4 & 100 \\ 1 & 100 & 2 & 10000 & 4 & 200 \\ 1 & 0 & 3 & 0 & 9 & 0 \\ 1 & 50 & 3 & 2500 & 9 & 150 \\ 1 & 100 & 3 & 10000 & 9 & 300 \end{pmatrix},$$

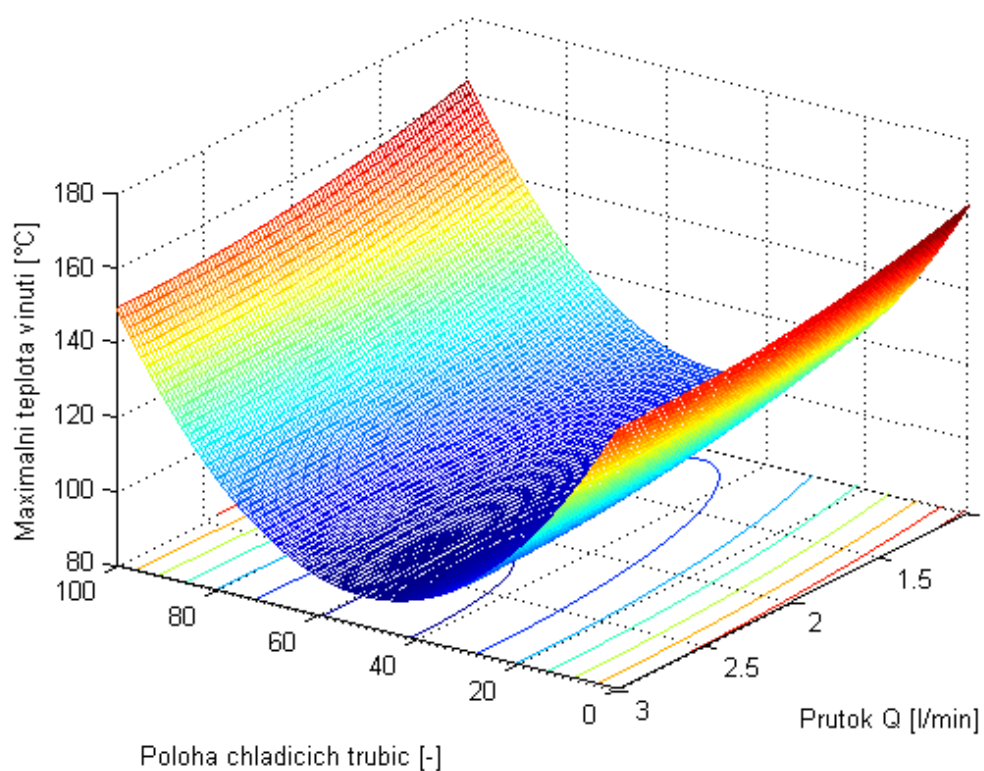
matice $\mathbf{b}$ je vektor s hodnotami

$$b = \begin{pmatrix} 160,667 \\ 105,174 \\ 160,720 \\ 153,531 \\ 89,647 \\ 152,985 \\ 150,866 \\ 85,841 \\ 150,085 \end{pmatrix},$$

vektor koeficientů β tedy vychází

$$x = \begin{pmatrix} 179,5423 \\ -2,4461 \\ -20,4377 \\ 0,0245 \\ 3,5045 \\ -0,0042 \end{pmatrix}.$$

Protože jsou nyní vypočteny všechny neznáme v rovnici (11.3) můžeme nyní přejít k vykreslení průběhu regresní funkce $y(x_1, x_2)$ kde za proměnné x_1 a x_2 volíme hodnoty v rozmezí $x_1 \in \langle 0; 100 \rangle$ a $x_2 \in \langle 1; 3 \rangle$. Tímto dostaneme hodnoty funkce $y(x_1, x_2)$ pro jakýkoliv bod ve zvoleném rozmezí a jsme schopni stanovit, na který faktor je úloha nejvíce citlivá. Na Obr. 39 je vynesena graf, který vystihuje maximální teplotu v závislosti na průtoku a polohy chlazení vinutí pomocí nalezené regresní funkce $y(x_1, x_2)$.



Obr. 39 Závislost maximální teploty vinutí na poloze chladících trubic a průtoku vody chladícím potrubím.

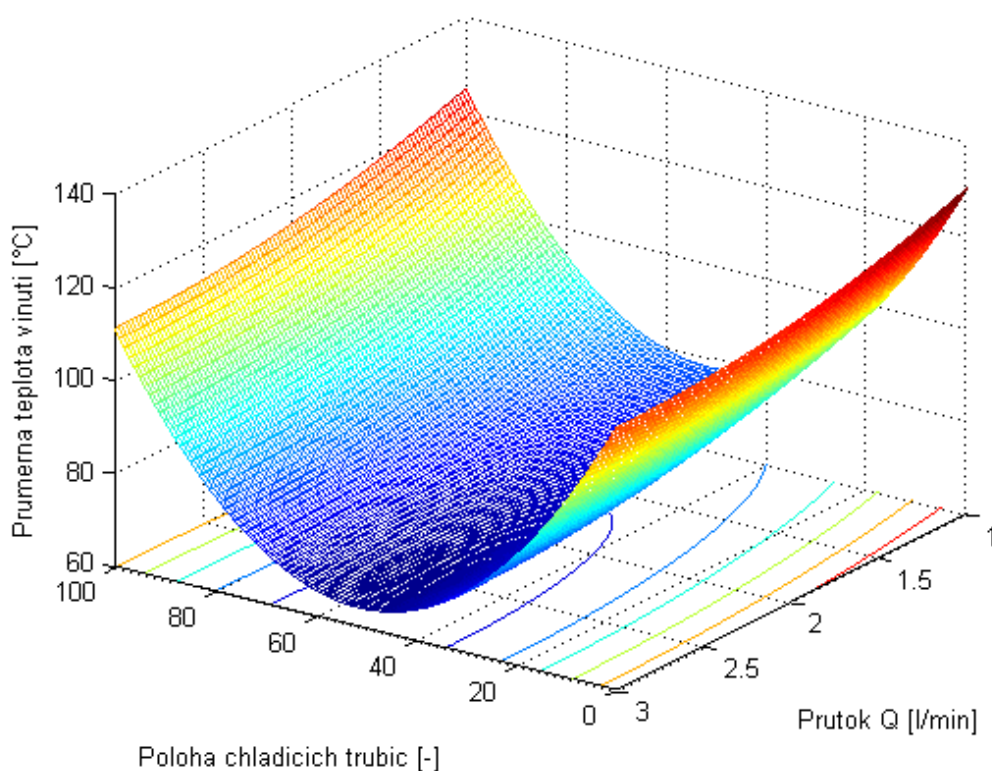
Pro určení závislosti průměrné teploty vinutí na průtoku a poloze chladících trubic postupujeme obdobným způsobem. Dojde však ke změně vektoru $\mathbf{b}$,

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} 128,011 \\ 81,12 \\ 122,738 \\ 120,232 \\ 65,694 \\ 114,901 \\ 117,116 \\ 61,972 \\ 112,003 \end{pmatrix}.$$

Hledané koeficienty β jsou v matici $\mathbf{x}$,

$$x = \begin{pmatrix} 147,3373 \\ -2,0364 \\ -21,128 \\ 0,0198 \\ 3,5826 \\ 0,0004 \end{pmatrix},$$

dosadíme-li opět zpětně do rovnice (11.3) dostaneme závislost průměrné teploty na průtoku chladicí kapaliny a poloze chlazení viz. Obr. 40



Obr. 40 Závislost průměrné teploty vinutí na poloze chladicích trubic a průtoku vody chladicím potrubím.

Poslední závislostí, kterou se budeme zabývat, je zjistit optimální umístění chladicích trubic pro dosažení největšího odvodu ztrátového tepla z vinutí. Provedeme-li příčný řez přípravkem, jak je vyobrazeno na Obr. 19, je zde symetrie pouze ve svislém směru. V důsledku větší hmoty nad chladicím kanálem jak pod ním, bude teplo akumulované v horní části stroje větší. Z tohoto poznatku vyplývá, že vrchní část statoru je zdrojem většího tepelného toku oproti části spodní. Abychom docílili rovnoměrnosti toků z obou směrů

musíme nalézt vhodnou polohu chladicího kanálu. Budeme tedy nyní hledat místo, kde bude pro nalezenou regresní funkci maximální odvod ztrátového tepla z vinutí.

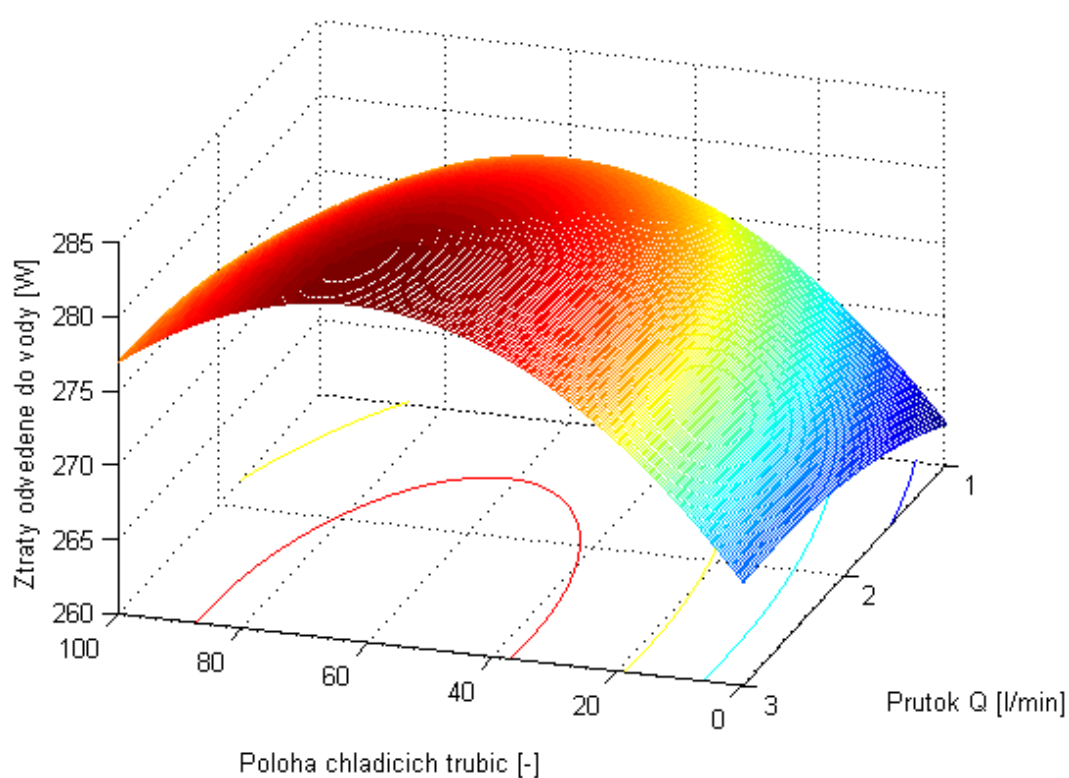
Opět zadáme matici **b**, tentokrát však do ní zadáme velikosti energetických toků jdoucí z vinutí do chladicího kanálu

$$b = \begin{pmatrix} 263,75 \\ 274,86 \\ 272,48 \\ 265,96 \\ 281,76 \\ 275,13 \\ 266,13 \\ 283,27 \\ 276,17 \end{pmatrix},$$

pro kterou přísluší koeficienty β

$$x = \begin{pmatrix} 256,1589 \\ 0,4821 \\ 7,9867 \\ -0,004 \\ -1,4683 \\ 0,0059 \end{pmatrix},$$

Na Obr. 41, je vykreslena plocha kvadratického charakteru vystihující svým maximem nejvhodnější umístění chladicího potrubí tak, aby co nejvíce tepelných ztrát vygenerovaných ve vinutí, bylo odvedeno vodou. Vidíme, že maximum se nenachází přesně uprostřed nebo v okolí velmi blízkém středu ($x = 50$ viz. Obr. 19), nýbrž po přesném odečtení v poloze pro $x = 63$. Tedy směrem více ke statoru.



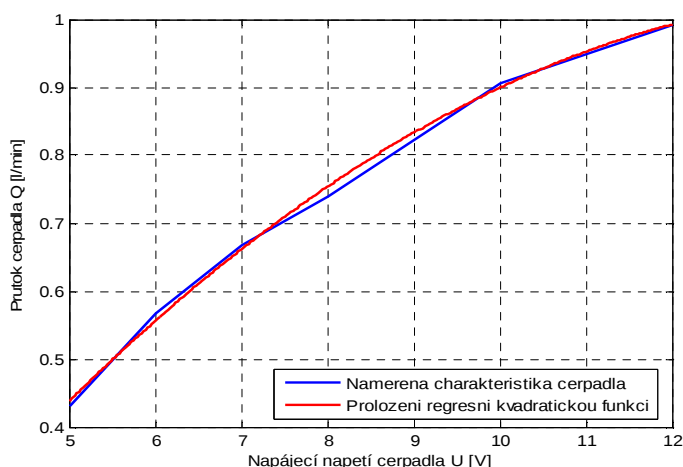
Obr. 41 Závislost ztrát pohlcených vodou na poloze chladících trubíc a průtoku vody chladícím potrubím

12. EXPERIMENT

Motivace pro uskutečnění experimentu byla vyvolána zájmem o ověření zda numerický model opravdu reprezentuje skutečnou část elektrického stroje. Výsledky jež byly získány ze simulace se zdály být věrohodné nicméně toto konstatování bylo stanoveno zatím jako neuspokojivé.

12.1. Popis měření

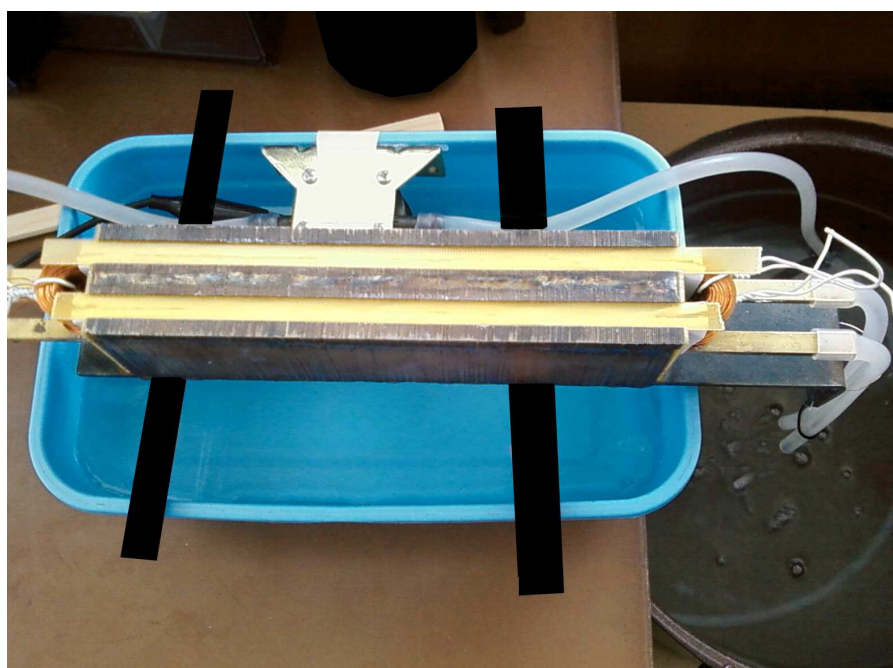
Experiment se prováděl následovně. K dispozici byla část synchronního motoru - stator. Pro tento prvek se vytvořily dvě stejná vinutí. Jedno velké vinutí nebylo použito z důvodu nutnosti různých modifikací umístění chladících kanálů. Vinutí bylo navinuto z měděného vodiče průměru $d' = 0,45\text{mm}$ včetně izolace, průměr holého vodiče $d = 0,4\text{mm}$. Chladicí vedení tvořily dva kusy jeklu z mosazi s rozměry obdélníkového profilu $6 \times 3 \times 0,3\text{ mm}$ ($\text{\AA} \times V \times Tl$) a délky 250mm . Z důvodu rozebíratelnosti celého přípravku nebylo možné vinutí impregnovat pro zdokonalení tepelných vlastností k odvodu tepla z vinutí. K průtoku vody bylo použito zubové čerpadlo s možností regulace průtoku napájecím stejnosměrným napětím. Maximální průtok čerpadla byl použit $1,0\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Charakteristika čerpadla zobrazující kvadratickou závislost průtoku vody na napájecím napětí čerpadla je zobrazena na Obr. 42. Izolace mezi vinutím a statorem tvořil klasický izolační papír běžně používaný pro tyto účely.



Obr. 42 Závislost průtoku čerpadla na napájecím napětí

Aby se alespoň částečně zlepšila tepelná vodivost mezi vinutím a chladicími kanály byla na kontaktní plochy těchto segmentů nanesena teplovodivá pasta. Na Obr. 43 je zobrazena celá sestava, na které bylo prováděno experimentální měření.

Vinutí byly spojeny paralelně a napájeny stejnosměrným napětím a proudem. Chladicí médium byla voda. V průběhu celého měření byla teplota okolí 20°C. V časových intervalech 5 minut se provedlo změření odporu vinutí, ze kterého byla následně určena průměrná teplota vinutí.. Celé měření probíhalo dokud se teplota vinutí neustálila. Ustálená teplota byla považována za teplotu, která se v průběhu časového intervalu 10 minut nezměnila o více než 4°C.



Obr. 43 Kompletní experimentální přípravek

Jako měřicí přístroje byly použity zařízení vypsané v následující tabulce:

Tab. 6 Použité měřicí přístroje

<i>Měřicí přístroj</i>	<i>Výrobce</i>	<i>Model</i>	<i>Přesnost</i>	<i>použitý rozsah přístroje</i>	<i>Rozlišení</i>
<i>Ohmmetr</i>	Fluke	175	$\pm 0,9\% + 1\text{dg}$	automatická volba	0,1 Ohm
<i>Voltmetr</i>	Metex	M3270D	$\pm 0,8\% + 2\text{dg}$	40V	10 mV
<i>Ampérmetr</i>	Metrix	MX51	-	10A	-

12.2. Zpracování měření

Pro určení průměrné teploty vinutí se vycházelo ze závislosti změny odporu na teplotě, která je dána vztahem

$$R = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20}(T_2 - T_{20})) \quad (12.1)$$

přičemž R_{20} – odpor vinutí při teplotě 20°C,

α_{20} – teplotní součinitel elektrického odporu, pro měď $\alpha_{20}=0,0043 \text{ K}^{-1}$,

$(T - T_{20})$ – oteplení vodiče.

V následujících tabulkách jsou shrnuty naměřené hodnoty pro jednotlivá uspořádání chladicího systému a vypočítané teploty dle vztahu 10.1. Pro chlazení uspořádané dle Obr. 10 byly naměřeny následující hodnoty,

Tab. 7 Naměřené hodnoty pro umístění chlazení dole

Napájecí napětí U [V]	Napájecí proud I [A]	Odpor vinutí R [Ohm]	Příkon P [W]	Čas měření t [min]	Teplota T ₂ [°C]
27,20	4,02	6,30	109,34	0	20,00
32,30	4,07	8,10	131,46	5	86,45
33,92	4,04	8,50	137,04	10	101,21
34,79	3,90	8,70	135,68	15	108,59
34,65	3,90	8,70	135,14	20	108,59
35,56	3,90	8,80	138,68	25	112,28
35,56	3,90	8,80	138,68	30	112,28
35,55	3,90	8,80	138,65	35	112,28

pro chlazení umístěné v prostřední části vinutí viz. Obr. 11 následující hodnoty,

Tab. 8 Naměřené hodnoty pro umístění chlazení uprostřed

Napájecí napětí U [V]	Napájecí proud I [A]	Odpor vinutí R [Ohm]	Příkon P [W]	Čas měření t [min]	Teplota T ₂ [°C]
27,70	3,90	6,30	108,03	0	20,00
30,51	4,00	7,80	122,04	5	75,37
31,22	4,00	7,80	124,88	10	75,37
31,70	4,00	8,10	126,80	15	86,45
31,90	4,00	8,00	127,60	20	82,75
31,80	4,00	8,00	127,20	25	82,75
32,23	4,00	8,10	128,92	30	86,45
32,23	4,00	8,10	128,92	35	86,45

a chlazení umístěné v horní části vinutí viz. Obr. 12.

Tab. 9 Naměřené hodnoty pro umístění chlazení nahoře

Napájecí napětí U [V]	Napájecí proud I [A]	Odpor vinutí R [Ohm]	Příkon P [W]	Čas měření t [min]	Teplota T ₂ [°C]
26,00	4,02	6,40	104,52	0	23,69
31,70	4,00	7,90	126,80	5	79,06
33,60	3,90	8,30	131,04	10	93,83
34,01	4,00	8,50	136,04	15	101,21
34,32	3,90	8,50	133,85	20	101,21
34,33	3,90	8,50	133,89	25	101,21
34,33	3,90	8,50	133,89	30	101,21
34,32	3,90	8,79	133,85	35	111,92

Po vynesení hodnot do grafů získáme průběhy oteplovací křivky. Z nich jsme schopni stanovit ustálenou teplotu. Tvar oteplovací křivky je podle následující závislosti

$$v = v_{\infty} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + v_0 \quad (12.2)$$

Přičemž v – je naměřena střední teplota vinutí

v_{∞} – hledaná ustálená teplota pro čas $t \rightarrow \infty$

v_0 – počáteční teplota

τ – oteplovací konstanta.

Ustálená teplota byla nalezena pomocí numerických metod. K výpočtu posloužil toolbox curve fitting, jenž je součástí Matlabu.

Ustálená teplota vypočítaná pro první model a korespondující s daty v tabulce 4 je podle rovnice (12.2) $v_{\infty 1} = 120,57$ °C,

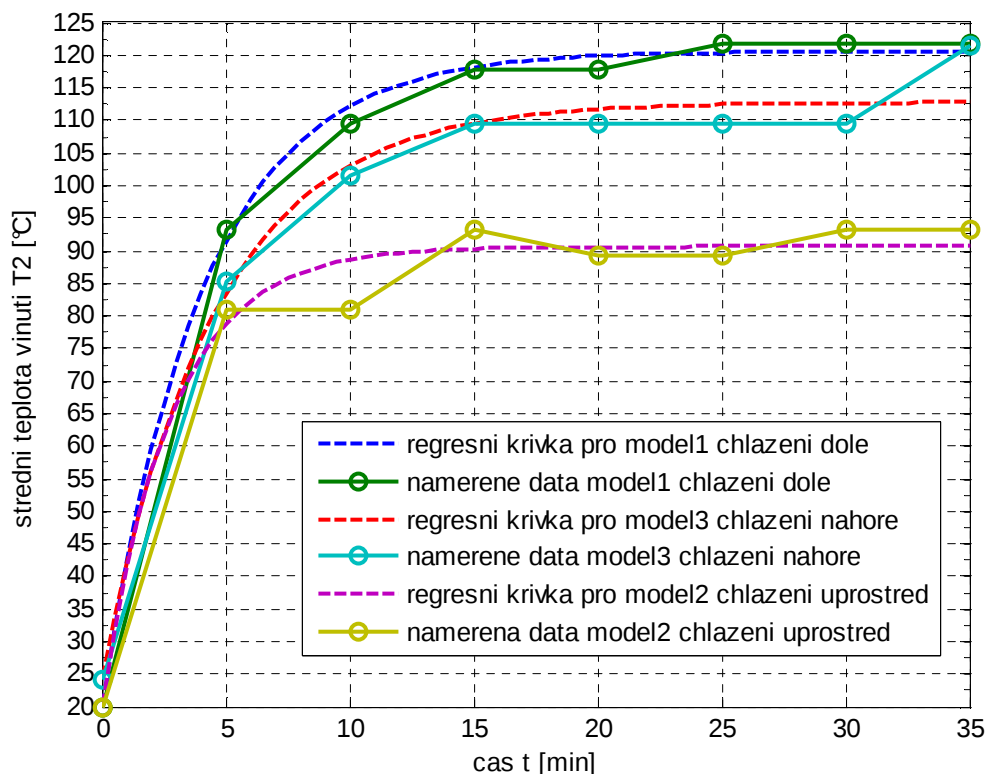
pro model s chlazením uprostřed a naměřené hodnoty uvedené v tabulce 5

$$v_{\infty 2} = 90,63$$
 °C,

poslednímu modelu, kde je chlazení umístěno v horní části vinutí byla ustálená teplota nalezena na hodnotě a odpovídá naměřeným hodnotám z tabulky 6

$$v_{\infty 3} = 112,78$$
 °C.

Průběhy získané z měření jsou k dispozici na Obr. 44, kde jsou vyneseny jak naměřené hodnoty tak jednotlivé regrese naměřených průběhů podle (11.2).



Obr. 44 Průběhy z měření pro jednotlivá umístění chladicího systému

12.3. Ekvivalentní numerický model pro experiment

Pro účely ověření korektně vytvořených numerických modelů byl proveden experiment, který však svým rozsahem nepokrýval možnost definitivně určit zda velikosti ustálených teplot získané metodou MKP jsou správné.

Za tímto účelem se provedly úpravy numerických modelů, jednalo se zejména o úpravu tepelné vodivosti vinutí a tepelného toku generovaného ve vinutí, tak aby se modely přiblížily v co největším rozsahu experimentálnímu přípravku.

Z výsledků měření byly stanoveny přibližné ztráty ve vinutí $P_J = 130\text{W}$. Celkový průtok vody byl nastaven na průtok vody v experimentu $Q = 1\text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$. Problém však tvořilo určení náhradní vodivosti vinutí ve směru os kolmých na střednici vodiče. Vinutí, jehož průměr byl $d' = 0,45\text{mm}$ bylo natlačeno do drážek a nebylo možné jednoznačně stanovit

uspořádání vodičů v drážce, což má vliv na stanovení náhradní vodivosti. Na základě zkušeností byla odhadována náhradní tepelná vodivost v rozsahu $\lambda_n = \langle 0,1; 0,3 \rangle$. Nebylo použito impregnačních laků, výplň mezi vodiči tvořil vzduch, čímž tepelná vodivost výrazně poklesla, původně se u motoru předpokládala přibližně $\lambda = 3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Po několika zkušebních výpočtech se nejlepších výsledků dosáhlo s náhradní tepelnou vodivostí $\lambda_n = 0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Pro všechny možnosti uspořádání chladicího potrubí byly nastaveny do numerického modelu následující parametry:

Ztráty ve vinutí $P_J = 130 \text{ W}$,

celkový průtok chladiva $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$,

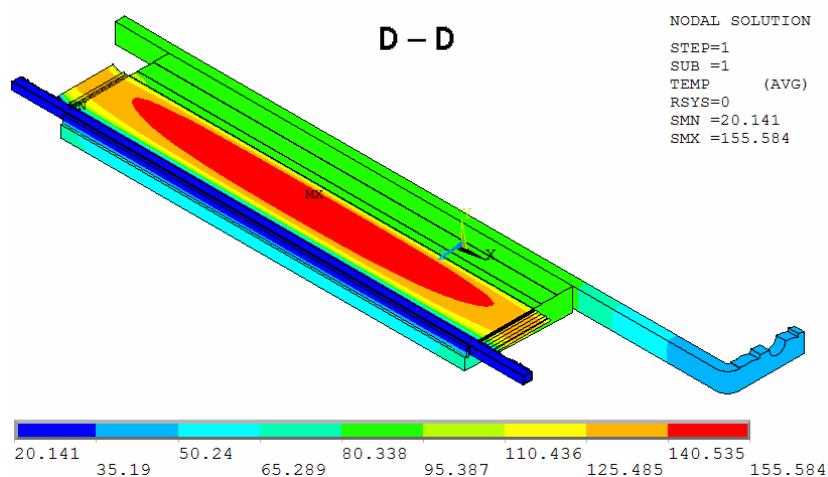
náhradní tepelná vodivost $\lambda_n = 0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, pro směry os kolmé ke střednici vodiče. Jak tyto parametry začlenit do numerického modelu je podrobně popsáno v [kapitole 8](#).

12.4. Porovnání výsledků získaných ze simulace a experimentu

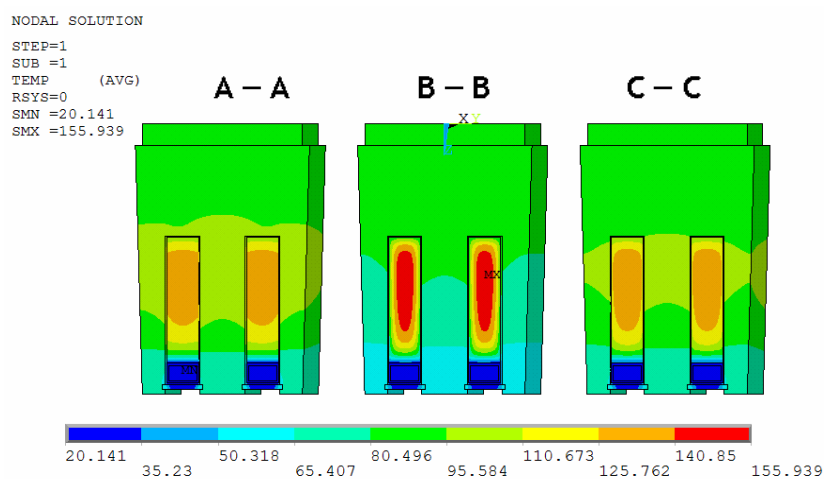
Po provedení výpočtových simulací, které byly zaměřeny na aproximaci numerického modelu k přípravku se získaly následující hodnoty:

Tab. 10 Výsledky získané z výpočtové simulace pro model aproximovaný přípravku

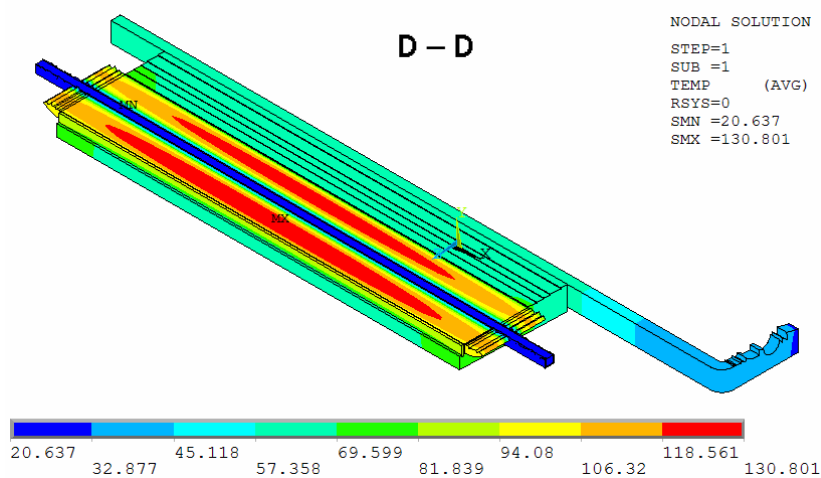
Průtok vody $Q=1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$	chlazení dole $x = 0$	Chlazení uprostřed $x = 50$	chlazení nahore $x = 100$
Průměrná teploty vinutí $v_{ave} [^{\circ}\text{C}]$	115,587	90,635	109,585
Oteplení vody $\Delta v_w [^{\circ}\text{C}]$	1,6358	1,6708	1,7400
Maximální teplota vinutí $v_{max} [^{\circ}\text{C}]$	155,94	131,02	150,84
Ztráty odvedené do vody $P_w [\text{W}]$	106,32	110,08	112,81
Ztráty odvedené přirozenou konvekcí a sáláním $P_{\alpha} [\text{W}]$	22,43	18,14	16,62
Energetická bilance $P_J = P_{\alpha} + P_w [\text{W}]$	128,27	128,22	129,43
Numerická odchylka $e = 130 - P_J [\text{W}]$	1,25	1,78	0,57



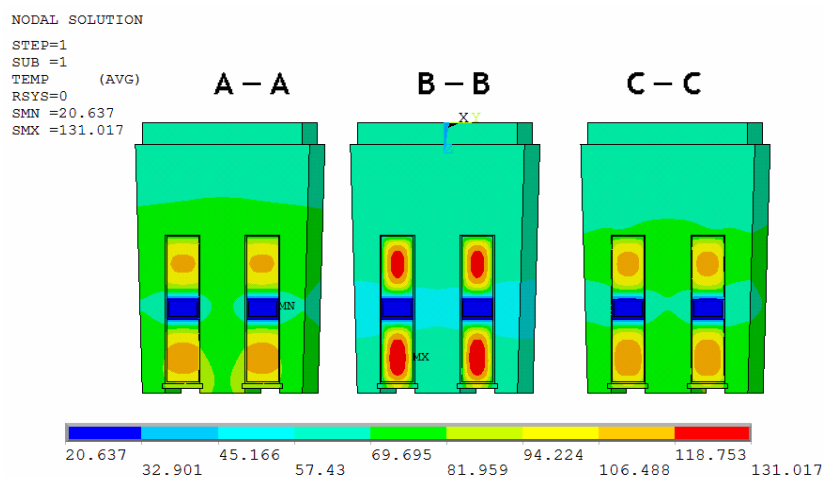
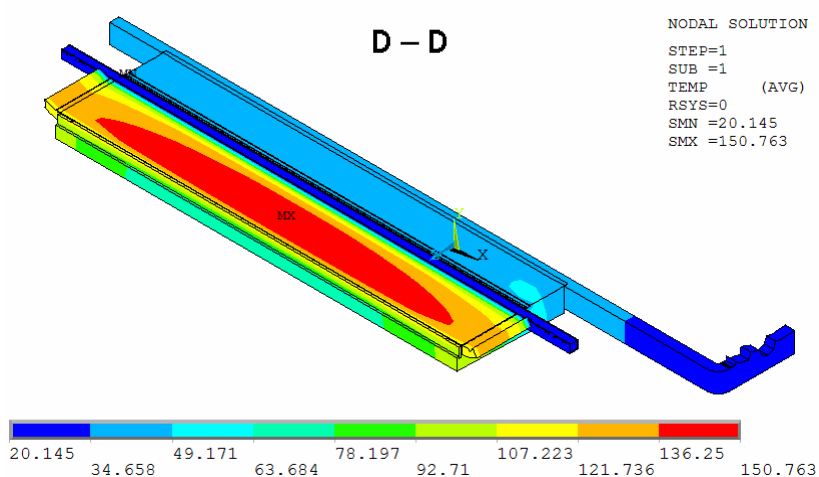
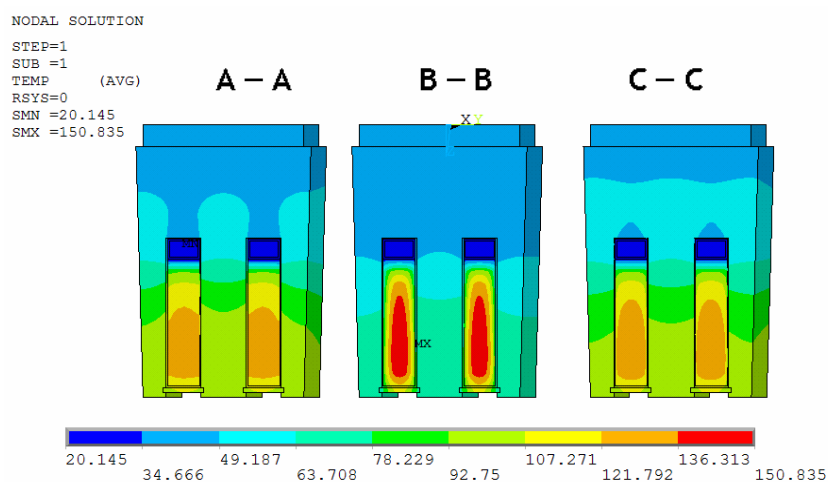
Obr. 45 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno dole, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 46 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno dole, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$



Obr. 47 Rozložení teplot v podélném řezu přípravku, chlazení umístěno uprostřed, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Obr. 48 Rozložení teplot v příčných řezech, chlazení umístěno uprostřed, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ Obr. 49 Rozložení teplot v příčných řezech přípravku, chlazení umístěno nahoře, $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ Obr. 50 Rozložení teplot v příčných řezech, chlazení umístěno nahoře, $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Srovnání průměrných ustálených teplot vinutí získaných při experimentu a výpočtem je znázorněno v následující tabulce.

Tab. 11 Porovnání teplot z experimentu a výpočtového modelu MKP

Umístění chlazení	Průměrná teplota vinutí získaná z měření ϑ_{∞} [°C]	Průměrná teplota vinutí získaná z výpočtu ANSYS ϑ_{AVE} [°C]	Rozdí teplot z experimentu a výpočtu $ \vartheta_{\infty} - \vartheta_{AVE} $ [°C]	Odchylka [%]
dole	120,57	115,59	4,98	4,13
uprostřed	90,63	90,64	0,01	0,01
nahoře	112,78	109,59	3,19	2,83

Na závěr ještě vyhodnotíme zda náhradní tepelná vodivost použita pro numerický model je korektní. Budeme-li vycházet pro určení náhradní vodivosti z Vidmarova vztahu (10.7), bude průměr holého vodiče a vodiče s izolací

$$\frac{d}{d'} = 1 - \frac{0,6 \cdot \lambda i}{\lambda n} = 1 - \frac{0,6 \cdot 0,026}{0,14} = 0,88857 \quad (12.3)$$

dosadíme-li do levé strany rovnice velikosti průměrů $\frac{d}{d'} = \frac{0,4}{0,45} = 0,88889$ vidíme že vodivost

kterou jsme určily je v mezích, neboť rozdíl podílů průměrů je

$$e = 0,88889 - 0,88857 = 0,00032 \text{ což odpovídá odchylce } E = \frac{0,00032}{0,88889} = 0,036\%.$$

13. ZÁVĚR

Předmětem zkoumání v této práci bylo zjištění vlivu různého uspořádání chladicího systému ve vinutí synchronního motoru na jeho oteplení. Pro tyto účely byl vytvořen konečnoprvkový model v softwaru ANSYS a přípravek pro experimentální měření. Model i přípravek představovaly pouze část statoru skutečného motoru dodávaný výrobcem VUES Brno.

V softwaru ANSYS byly namodelovány dva různé modely. Geometrie obou modelů byla identická. Rozdílnost modelů spočívala v materiálových vlastnostech a tepelném zatěžování. První model byl vytvořen z materiálů používaných výrobcem při konstrukci a byl zatížen energetickým tokem generovaným ve vinutí $P_j = 300W$. Druhý model byl definován tak, aby se co nejvíce přiblížil přípravku použitým při měření. U tohoto modelu nebyla uvažována impregnace vinutí, která obecně zlepšuje tepelnou vodivost. Ztráty generované ve vinutí odpovídaly ztrátám generovaných v experimentu $P_j = 130W$. Oba modely byly ještě modelovány v různých modifikacích, jenž se lišily v umístění chladicího kanálu v cívce statoru a v případě prvního modelu navíc ještě průtokem vody v chladicím okruhu.

Na základě poznatků z metodiky plánů výpočtových simulací se provedly na prvním modelu výpočty podle úplného faktoriálního návrhu 3^n . Tento návrh posloužil k vytvoření regresního modelu, který jednoznačně, po vynesení do grafů, znázornil citlivost na sledované faktory (parametry). Jako faktory byly zvoleny průtoky vody v kanále a umístění kanálu ve vinutí. Z výsledků výpočtových simulací se jeví jako nejlepší chlazení statorového vynutí umístěného ve středu cívky při maximálním průtoku $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Naopak nejhorší výsledky byly u chlazení s průtokem vody $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ a umístění chlazení ve spodní části vinutí, tedy pro $x = 0$. Při regresní analýze se zjistilo, že faktor nejvíce ovlivňující ustálenou teplotu vinutí je právě poloha chladicího systému v drážce a pak až průtok vody v kanále.

Z výsledků regresního modelu se stanovilo optimální umístění chladicího kanálu tak, aby bylo docíleno maximální účinnosti chlazení. Nejlepších chladicích účinků by bylo dosaženo při umístění chlazení v poloze $x = 63$ a průtoku vody $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

Jako další cíle bylo posouzení možnosti uspořádání chladicího systému z hlediska technologického a ekonomického. Tyto dva aspekty spolu velice úzce souvisí, neboť

jakýkoliv technologický postup, který je časově náročný se odrazí i v ceně. Je-li zapotřebí více montážních kroků k výrobě, znamená to opět finanční navýšení hodnoty výrobku. Jako nejlepší způsob přímého chlazení statorového vinutí vychází umístění chladicího kanálu v okolí středu drážky. To ovšem přináší problém z hlediska technologie výroby, protože je zapotřebí dvakrát impregnovat vinutí. První impregnace se provádí pro vinutí nad chladicím kanálem, poté se usadí chladicí kanál a následně po nasazení zbylé části vinutí se provede druhá impregnace. Z technologického a současně i ekonomického hlediska je na tom lépe model s chlazením nahoře resp. dole. Zde se provede pro vinutí pouze jedna impregnace. Pokud by se však konstruktér rozhodl pro jednu z těchto variant, z hlediska účinnosti chladicího systému, je na tom lépe případ umístění chlazení nahoře tedy $x = 100$.

Experiment prováděný na přípravku posloužil k ověření výpočtového modelu. Pomocí experimentálního a výpočtového modelování se stanovila ekvivalentní tepelná vodivost vinutí použitého při laboratorním měření. Tato vodivost nebyla předem přesně známa. Výsledkem z experimentu i simulace byly průměrné teploty vinutí pro ustálený stav. Porovnáním těchto teplot se stanovila odchylka, která představovala v nejhorším případě 4,13% od teploty získané měřením. Při experimentálním měření byly použity tři různé případy umístění chladicích trubic. Průtok byl nastaven na $Q = 1 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$.

Na diplomovou práci je možné navázat v několika oblastech. Model je možné upravit tak, aby reprezentoval celý stator a ne pouze jeho část. Dále je možné řešit jaký dopad má změna izolace mezi vinutím a statorovým svazkem na celkové oteplování motoru. Výběrem vhodného elementu ve výpočtovém modelu, je možné odhadnout velikost magnetického toku s chlazením umístěným v drážce a bez chlazení. Současná koncepce modelu představuje dva kanály zapojené paralelně, bylo by vhodné tyto kanály zapojit do série a porovnat oteplení vinutí této modifikace chladicího systému.

U sestaveného experimentálního přípravku je možné provádět měření a sledovat jaký vliv na oteplení části statoru má jeho poloha (horizontální, vertikální a šikmá). Stejně jako u výpočtového modelu tak i u experimentálního můžeme měnit chladicí médium a srovnávat oteplení vinutí.

14. LITERATURA

- [1] Nebojme se nelineární regrese, Javůrek, M., Taufer, I., Univerzita Pardubice
- [2] Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých, Ondrůška E., Maloušek A.
- [3] Technická dokumentace k ANSYSu
- [4] Výpočty chlazení součástí elektrických strojů, Hynšt, Ošlejšek, Kašík, Charvát
- [5] Synchronní momentové motory s PM řady ROL – Technický návod, dokumentace VUES Brno
- [6] Metodika sběru dat pro verifikaci pásu lyže pro VS ProMechanika
- [7] <http://ansys.net>

15. SEZNAM PŘÍLOH

Přiložený CD-R disk obsahuje:

Adresáře:

MKP Modely – zde nalezneme binární soubory modelu přípravku pro ANSYS v11

SolidWorks Modely – soubory s modely vytvořené v CAD systému SolidWorks 2005

Soubory:

at.mac – macro pro výpočet průměrné teploty vybraných uzlů, určeno pro ANSYS

ZtratyDoVody.m – soubor pro výpočet regresních koeficientů

PrumernaTeplotaVinuti.m – soubor pro výpočet regresních koeficientů

MaximalniTeplotaVinuti.m – soubor pro výpočet regresních koeficientů

2008_DP_Kolaja_Adam.pdf – soubor s diplomovou prací