

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Martin Vlasák**

**2013**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2012/2013

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin VLASÁK**  
Osobní číslo: **E11N0155P**  
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Program pro výpočet ventilace a oteplení asynchronních strojů**  
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte literární rešerši komerčních software používaných k výpočtům oteplení elektrických strojů.
2. Seznamte se s metodami modelování oteplení elektrických strojů.
3. Sestavte ventilační a tepelnou síť asynchronního motoru.
4. Ve vhodném programovacím jazyce vytvořte program pro výpočet ventilace a oteplení asynchronního motoru.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. veřejně dostupné informační zdroje, databáze [www.ieee.org](http://www.ieee.org)
2. Hak, J. , Ošlejšek, O.: Výpočet chlazení elektrických strojů, VÚES, Brno, 1973
3. Kopylov, I., P. : Stavba elektrických strojů, SNTL, 1988
4. Vlach, R.: Tepelné procesy v mechatronických soustavách, VUT, 2007

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Roman Pechánek, Ph.D.**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



*Karel Noháč*

Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

**Anotace:**

Práce se zabývá problematikou ventilačního a tepelného výpočtu asynchronního stroje s kotvou nakrátko. Při výpočtu se řídíme aplikací základních fyzikálních zákonů z oboru hydromechaniky a termomechaniky a proto jim jsou věnovány úvodní kapitoly. Dále je v práci popsán výpočet charakteristik ventilátoru a množství chladiva ve stroji. Součástí práce je také literární rešerše programů používaných k výpočtu oteplení elektrických strojů. Ke konci práce je představen analyzovaný motor včetně jeho tepelné sítě. Dále jsou v práci uvedeny výsledky tepelného výpočtu konkrétního asynchronního motoru a tyto výsledky jsou následně porovnány s katalogovými údaji tohoto stroje.

**Klíčová slova:**

asynchronní motor, hydraulický odpor, náhradní tepelná síť, oteplení, tepelný odpor, tepelný výpočet, ventilační výpočet

**Annotation:**

My diploma thesis deals with issues of calculation of ventilation and thermal asynchronous machine with short armature. We follow fundamental physical laws from hydromechanics and thermomechanics in the process of calculation. That's way the introductory chapters deal with them. In this diploma thesis I described also calculation of characteristics of fan and calculation of flow rate of coolant in the motor. This thesis includes literary summary of used programs for calculation of warming electrical machines. At the end of my thesis analysed engine and his thermal network are presented. I also present results of heat calculation of particular asynchronous engine and these results are compared with catalogue figures of this machine.

**Keywords:**

Asynchronous engine, hydraulic resistance, spare thermal network, warming, thermal resistance, thermal calculation, calculation of ventilation

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 3. 5. 2013

Martin Vlasák

## **Poděkování**

*Touto formou bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě mé diplomové práce. Především bych chtěl poděkovat mému školiteli Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D za ochotu a za poskytnuté konzultace při vypracovávání práce.*

# Obsah

Obsah .....	8
Seznam použitých značek a symbolů .....	10
1. Úvod .....	15
2. Cíl práce.....	16
3. Programy pro ventilační výpočty .....	17
3.1. CFD .....	17
3.2. Metoda konečných prvků (též MKP).....	17
3.3. ANSYS CFX .....	18
3.4. ANSYS FLUENT.....	20
3.5. COMSOL Multiphysics® .....	21
3.6. Motor-CAD .....	22
4. Mechanismy sdílení tepla .....	24
4.1. Sdílení tepla vedením.....	24
4.2. Sdílení tepla prouděním.....	25
4.3. Součinitelé přestupu tepla .....	25
4.3.1. Součinitel přestupu tepla pro vnitřní strany kostry a štítů .....	26
4.3.2. Přestup tepla z podélně obtékané desky .....	26
4.3.3. Součinitel přestupu tepla z čel .....	26
4.3.4. Součinitel přestupu tepla z válcové plochy .....	26
4.3.5. Součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery .....	27
4.3.6. Samovolná konvekce.....	27
5. Ventilační okruh .....	29
5.1. Atkinsonův kvadratický zákon.....	29
5.2. Hydraulické odpory .....	30
5.2.1. Odpory třením.....	30
5.2.2. Odpory místní.....	30
5.2.3. Řazení hydraulických odporů .....	32
5.3. Ventilační síť analyzovaného motoru .....	33
5.4. Tlakový zdroj (ventilátor) .....	34
5.4.1. Tlaková charakteristika .....	34



5.4.2. Pracovní bod ventilátoru.....	38
5.5. Výsledné rychlosti vzduchu ve stroji.....	39
6. Vývojový diagram programu.....	41
7. Analyzovaný motor.....	44
7.1. Parametry analyzovaného motoru.....	44
7.1.1. Štítkové údaje.....	44
7.1.2. Ztráty motoru.....	45
7.2. Tepelná síť analyzovaného motoru.....	46
8. Výsledky.....	53
9. Závěr.....	56
Literatura.....	58
Přílohy.....	60

## Seznam použitých značek a symbolů

$a$	teplotní vodivost	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
$A$	průřez	$[\text{m}^2]$
$b$	šířka lopatky	$[\text{m}]$
$C$	tepelná kapacita	$[\text{J} \cdot \text{K}^{-1}]$
CAD	computer aided design	
$C_d$	konstanta	
CFD	computational fluid dynamics	
CFX	komerční označení pro computational fluid dynamics	
$c_p$	hmotnostní měrné teplo chladícího média	$[\text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$C_T$	matice tepelných kapacit	
$D$	průměr	$[\text{m}]$
$D$	charakteristický rozměr	$[\text{m}]$
$D_H$	hydraulický průměr	$[\text{m}]$
EKM	Engineering Knowledge Manager	
$F_g$	geometrický faktor	
FSI	Fluid Structure Interaction	
$g$	gravitační zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
$G$	matice tepelných vodivostí	
$Gr$	Grashofovo číslo	
$H$	tlak	$[\text{Pa}]$
$K$	hydraulický odpor	$[\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-8}]$
$L$	délka	$[\text{m}]$
$m$	poměr zúžení	
MKP	metoda konečných prvků	
$n$	počet otvorů mříže nebo síta	
$Nu$	Nusseltovo číslo	
$P$	ztráty	$[\text{W}]$
$p$	tlak	$[\text{Pa}]$
$Pr$	Prandtlovo číslo	

---

---

$\Delta p$	tlakový úbytek	[Pa]
$\Delta P$	vektor ztrát	
$q$	tepelný tok	[W.m <sup>-2</sup> ]
$Q$	teplo	[J]
$Q$	objemový průtok	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Re$	Reynoldsovo číslo	
$r_m$	střední poloměr vzduchové mezery	[m]
$R$	tepelný odpor	[K.W <sup>-1</sup> ]
$S$	plocha	[m <sup>2</sup> ]
$t$	čas	[s]
$T$	teplota	[°C]
$T$	termodynamická teplota	[T]
$\Delta T$	matice teplot	
$Ta_m$	Taylorovo číslo	
$T_{oi}$	teplota okolí	[°C]
$T_{S2}$	teplota povrchu	[°C]
$U$	obvod	[m]
$v$	rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$w$	rychlost	[m.s <sup>-1</sup> ]
$z$	počet lopatek	
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha$	úhel ohybu	[°]
$\beta$	relativní změna objemu při konstantním tlaku	
$\delta$	tloušťka stěny	[m]
$\zeta$	průměrový parametr	
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\xi$	součinitel hydraulického odporu	
$\rho$	hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$\varphi$	objemové číslo	
$\chi$	odporové číslo	

---

$\psi$	tlakové číslo	
$\omega$	úhlová rychlost	[rad. s <sup>-1</sup> ]
$\nu$	šířkový parametr	
$\nu$	viskozita	[Pa.s]

### indexy

x, y, z směr osy

### Zkratky použité při výpočtu tepelných odporů:

$b_{al}$	šířka drážky rotoru	[m]
$b_d$	tloušťka drážky statoru	[m]
$b_z$	tloušťka zubu v polovině výšky	[m]
$h_{al}$	hloubka drážky rotoru	[m]
$h_d$	hloubka drážky statoru	[m]
izol	celková tloušťka izolace v drážce (na šířku drážky)	[m]
izolč	tloušťka izolace čela	[m]
$j_r$	jho rotoru (vzdálenost od hřídele k vodičům rotoru)	[m]
$k_{\check{c}}$	činitel zakrytí čel	
$k_{izol}$	koeficient uvažující izolaci mezi plechy statoru	
$k_{izolr}$	koeficient uvažující izolaci mezi plechy rotoru	
$l_1$	délka elementu 26 viz tepelná síť stroje	[m]
$l_{26}$	délka úseku 26 (část hřídele)	[m]
$l_{\check{c}}$	délka čela	[m]
$nad_{al}$	železo, které je mezi vodičem (tyčí) rotoru a vzduchovou mezerou	[m]
O	obvod čela	[m]
$P_{al}$	ztráty v tyčích rotoru	[W]
$P_{cela}$	celkové ztráty ve všech čelech statoru	[W]
$P_{kruhy}$	celkové ztráty v kruzích rotoru	[W]
Q	počet drážek statoru	
$Q_r$	počet drážek rotoru	

---

$r_{\text{hřidele}}$	poloměr hřídele	[m]
$r_{\text{ložiska}}$	vnější poloměr ložiska	[m]
$r_{\text{rotoru}}$	poloměr rotoru	[m]
$r_{\text{stroje}}$	celkový poloměr stroje (osa-kostra)	[m]
$S_{\text{al}}$	průřez tyče rotoru	[m <sup>2</sup> ]
$S_{\text{kostra}}$	průřez kostry	[m <sup>2</sup> ]
$T_{\text{čelo-vzduch}}$	průměr teplot čela a vzduchu u čela	[°C]
$t_{\text{k}}$	tloušťka kostry	[m]
$t_{\text{kruhu}}$	tloušťka kruhu	[m]
$t_{\text{ložiska}}$	tloušťka ložiska	[m]
$w$	poloměr sahající do $\frac{3}{4}$ zubu (od osy stroje)	[m]
$x$	poloměr sahající do $\frac{1}{4}$ výšky jha (od osy stroje)	[m]
$y$	vzdálenost mezi izolací vinutí statoru a polovinou výšky jha statoru	[m]
$y_{\text{cu}}$	výška mědi v drážce (bez celkového započtení izolace)	[m]
$y_{\text{izol}}$	celková tloušťka izolace v drážce (na výšku drážky)	[m]
$y_{\text{medi}}$	tloušťka mědi v drážce (na výšku drážky)	[m]
$yz$	vzdálenost od osy stroje do jedné čtvrtiny výšky jha (bez zubu)	[m]
$z$	poloměr sahající do $\frac{3}{4}$ výšky jha (od osy stroje)	[m]
$\text{zub}_{\text{dole}}$	jedná se o spodní tloušťku zubu statoru	[m]
$\text{zubs}_{1/4}$	jedná se o tloušťku zubu statoru v jedné čtvrtině výšky	[m]
$\alpha_{\text{al}}$	teplotní součinitel měrné tepelné vodivosti hliníku	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\text{cu}}$	teplotní součinitel vodivosti mědi	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\text{č}}$	součinitel přestupu tepla čelo vzduch	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\text{Fe}}$	teplotní součinitel vodivosti plechů statoru	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\text{hjr}}$	součinitel přestupu (prostupu) tepla z hřídele do jha rotoru	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\text{hřidele}}$	teplotní součinitel vodivosti hřídele	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\text{izol}}$	teplotní součinitel izolace vinutí	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\text{izolč}}$	teplotní součinitel izolace čela	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{\text{jhoizol}}$	součinitel prostupu tepla mezi jhem a izolací mědi v drážce	

		[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{j\text{hokostra}}$	součinitel prostupu tepla přes jho statoru do kostry	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{k\text{ch}}$	součinitel přestupu tepla z kostry do chladiva	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{kostry}$	teplotní součinitel vodivosti kostry	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{kv}$	součinitel přestupu tepla z kruhu rotoru do vzduchu	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{lh}$	součinitel přestupu (prostupu) tepla mezi hřídelí a ložiskem	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{lk}$	součinitel prostupu tepla z ložiska do kostry	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{loziska}$	teplotní součinitel měrné tepelné vodivosti ložiska	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{lv}$	součinitel přestupu tepla z ložiska do vzduchu	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{lo}$	součinitel přestupu tepla z ložiska do okolního vzduchu	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_r$	teplotní součinitel měrné tepelné vodivosti jha rotoru	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{rdelta}$	součinitel přestupu tepla z rotoru do vzduchové mezery	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{sdelta}$	součinitel přestupu tepla mezi statorem a vzduchovou mezerou	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{stito}$	součinitel přestupu tepla ze štítu do okolního vzduchu	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{stitv}$	součinitel přestupu tepla ze štítu do vzduchu ve stroji	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_{zubizol}$	součinitel přestupu tepla mezi zubem a izolací vodičů statoru	[W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_{al}$	teplotní součinitel ztrát hliníku	[K <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_{cu}$	teplotní součinitel ztrát mědi	[K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{al}$	měrná tepelná vodivost hliníku při 0°C (tyče rotoru)	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{cu}$	tepelná vodivost mědi při teplotě 0°C	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{hridele}$	teplená vodivost hřídele při 0°C	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{izol}$	teplená vodivost izolace vinutí při 0°C	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{izolc}$	teplená vodivost izolace čela při 0°C	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{Fe}$	tepelná vodivost plechů statoru při 0°C	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{kostra}$	tepelná vodivost kostry při 0°C	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_{loziska}$	měrná tepelná vodivost ložiska	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$\lambda_r$	měrná tepelná vodivost jha rotoru při 0°C	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]

## 1. Úvod

Mezi podstatnou součást vývoje elektrického stroje patří návrh chlazení a výpočet oteplení jeho jednotlivých částí. Tato problematika nabírala s postupujícím vývojem elektrických strojů na důležitosti už jen proto, že životnost a spolehlivost elektrických strojů omezuje v provozu spíše teplota vinutí než elektrické a mechanické namáhání [1]. Lze zmínit, že při nárůstu teploty o 10 K nad dovolenou teplotu klesá životnost izolace na polovinu [2].

Abychom mohli, zjistit teploty již zmiňované izolace, je nutné provést ventilační a tepelný výpočet. To lze provést za pomoci profesionálních programů založených například na metodě konečných prvků popřípadě metodě konečných objemů, jako jsou například ANSYS a Comsol multiphysics. Další možností je provést ventilační a tepelný výpočet metodou hydraulické a náhradní tepelné sítě, což je předmětem této diplomové práce. Ventilační výpočet slouží k určení průtoku chladiva ve stroji, což je potřebné znát k následujícímu tepelnému výpočtu. Úkolem tepelného výpočtu je zjištění teplot jednotlivých částí stroje.

Princip výpočtu je následující. Metodou hydraulické sítě se určí množství a rozložení chladiva ve stroji, což se posléze využije v tepelném výpočtu, konkrétně při určování součinitelů přestupu tepla ze stroje do chladiva a dále se započítává množství chladiva do matice odporů rozšířené o ventilační okruh. Dále se sestaví tepelná síť, kde jednotlivé uzly sítě budou reprezentovat určitou část stroje a uzly budou propojeny náhradními tepelnými odpory. Z jednotlivých tepelných odporů se vytvoří matice, která bude vhodně rozšířena o chladicí okruh, z důvodu započítání odvodu tepla chladivem, dále se sestaví matice ztrát a tepelných kapacit. Z těchto matic se sestaví soustava rovnic, kde neznámou této soustavy budou teploty jednotlivých uzlů, tedy jednotlivých částí stroje.

## 2. Cíl práce

Cílem diplomové práce je ventilační a tepelná analýza asynchronního stroje metodou náhradní tepelné sítě. Výpočetní program byl vytvořen za pomoci programu Matlab. Dalším úkolem je zpracování literární rešerše používaných programů pro ventilační a tepelné výpočty elektrických strojů. Díky vytvořenému programu je možno sledovat teploty motoru při různých provozních stavech. Program byl ověřen a vytvořen pro asynchronní motor firmy Siemens.

Hlavními úkoly diplomové práce jsou:

- Provést literární rešerši komerčních softwarů používaných k výpočtům oteplení elektrických strojů.
- Seznámit se s metodami modelování oteplení elektrických strojů.
- Sestavit ventilační a tepelnou síť asynchronního motoru.
- Ve vhodném programovacím jazyce vytvořit program pro výpočet ventilace a oteplení asynchronního motoru.



### **3. Programy pro ventilační výpočty**

Z dostupných programů pro ventilační a tepelné výpočty je k dispozici program Motor-CAD od anglické firmy Motor Design Ltd, což je program vytvořený speciálně pro výpočty elektrických strojů. Další možností je použít programy, ve kterých je možné provést tepelnou analýzu a výpočet proudění užitím metody konečných prvků nebo objemů. Nejznámějšími CFD programy pro řešení proudění jsou například ANSYS CFX nebo ANSYS Fluent, dále program COMSOL Multiphysics. V programech ANSYS a COMSOL Multiphysics lze provést i tepelnou analýzu motoru.

#### **3.1.CFD**

Jedná se o výpočetní technologii, která umožňuje pozorovat dynamiku proudících částic. Díky této technologii můžeme předpovídat chování tekutin se všemi zákonitostmi, jako jsou víry a podobně. Postup celého CFD modelování je vždy rozdělen minimálně do tří fází. První fází je preprocesor, který zahrnuje vytvoření geometrického modelu, vytvoření a kontrolu konečně prvkového modelu, nastavení počátečních a okrajových podmínek atd. Druhou fází je samotný výpočet. A fází poslední je post procesor, který slouží k zobrazení výsledků [3].

#### **3.2.Metoda konečných prvků (též MKP)**

Je to jedna z neúčinnějších [4] přibližných metod pro řešení problémů popsaných diferenciálními rovnicemi. Základní myšlenkou MKP je, že se nejprve modelovaná oblast rozdělí na konečný počet jednotlivých elementů, což jsou pro rovinnou úlohu většinou trojúhelníky či čtyřúhelníky a pro prostorové úlohy čtyřstěny, pětistěny, kvádry a podobně. Poté se minimalizuje odpovídající potenciální energie na množině spojitých a po částech polynomických funkcí pro modelovanou oblast. Vhodnou volbou báze funkcí lze tuto úlohu převést na řešení soustavy lineárních (popř. nelineárních) algebraických rovnic, jejíž matice je řídká, tj. obsahuje většinou nulové prvky. Řídkost matice snižuje nároky na paměť

---

Martin VLASÁK      Program pro výpočet ventilace a oteplení asynchronních strojů počítače a počet prováděných aritmetických operací. To umožňuje řešit obrovské soustavy až o miliónech rovnic a miliónech neznámých. Pokud je úloha nelineární, její řešení se většinou převádí na posloupnost lineárních rovnic. Hlavní výhodou MKP je, že umožňuje dokonale aproximovat vyšetřované těleso a že celý výpočtový proces lze na počítačích zautomatizovat: interpolace vstupních dat, generování elementů, sestavení soustavy algebraických rovnic, vyřešení soustavy algebraických rovnic, vyhlazení numerického řešení, aposteriorní odhady chyby, grafické znázornění výsledků. Zjemňování sítě probíhá buď interaktivně, kdy si uživatel sám volí oblasti, kde chce získat lepší aproximaci řešení, nebo adaptivně (tj. bez zásahu uživatele).

### **3.3.ANSYS CFX**

Jedná se o výkonný software [5] určený pro výpočty v oblasti dynamiky tekutin. Vznikl před více než dvaceti lety. Je vhodný pro uživatele s inženýrskými znalostmi i pro specialisty na dynamiku tekutin a poskytuje pokročilé techniky pro řešení dynamiky tekutin v kombinaci s moderním uživatelským rozhraním. Ansys CFX je plně integrován do prostředí programu Ansys Workbench.

Ansys Workbench je program určený k řešení nejrůznějších fyzikálních problémů ve strojírenství.

Program Ansys CFX umožňuje analýzu jednoduchých úloh proudění tekutiny až po řešení složitých navzájem se ovlivňujících dějů.

Program obsahuje nástroje pro tvorbu geometrie a sítě. Geometrii lze tvořit v prostředí ANSYS DesignModeler, který lze propojit se všemi známými CAD softwary. Síť lze tvořit pomocí nástroje ANSYS ICEM CFD.

Výrobce uvádí, že program je navržen tak, aby poskytoval rychlé řešení, a je zkonstruován tak, že nárůst výpočetního času roste lineárně s velikostí řešeného problému. Uživatel ANSYSU může při řešení problému sledovat konvergenční proces, tedy stav řešení v daném okamžiku. Dále je možno nastavit okrajové podmínky a jiné parametry „za letu“, tedy bez zastavení řešení problému.

Vlastností programu ANSYS CFX je „paralelizace“, program byl navržen tak, aby umožňoval paralelní řešení problémů, a tedy využít výhody nových více jádrových procesorů. Dále program ANSYS CFX umožňuje řešit spousty druhů fyzikálních problémů. Mezi nejdůležitější fyzikální modely dostupné v ANSYS CFX patří.

- 1) Turbulence- Většina průmyslových proudění jsou turbulentní. Proto program ANSYS CFX klade důraz na poskytování a rozvíjení nejmodernějších turbulentních modelů.
- 2) Rotační stroje- ANSYS CFX patří k nejlepším programovým vybavením pro CFD simulace v elektrických strojích. Program splňuje požadavky přesnosti a rychlosti řešení CFD problémů. Program dokáže zachytit interakci mezi rotačními a nehybnými částmi stroje a je ušitý na míru lidem, kteří se zabývají dynamikou tekutin v rotačních strojích.
- 3) Multiphase- Langrangeův transportní model umožňuje řešit modely, kde je jedna či více diskrétních částecek nebo kapiček uvnitř spojitě tekuté fáze. Eulerův mnoho fázový model umožňuje zachytit výměnu hybnosti, energie a hmoty, dále lze započítat odpor prostředí a je možno použít modely pro změnu fáze v důsledku vypařování, kavitace, kondenzace a varu.
- 4) Přestup tepla a záření- Mimo řešení přestupu tepla proudící tekutinou, umožňuje program ANSYS CFX řešit přenos tepla vedením, který se uplatňuje v pevných látkách a dále je možno řešit sdílení tepla radiací mezi tekutinami a pevnými látkami.
- 5) Spalování- Software umožňuje modelovat chemické reakce a spalování sdružené s prouděním tekutin.
- 6) Fluid Structure Interaction (FSI)- V programu je možno simulovat interakci mezi tekutinami a pevnými látkami.
- 7) Moving Mesh (Pohybující se síť), Remeshing (opětovné sestavení mřížky) a Immersed Solids- Tyto volby v programu umožňují modelovat účinek pohybu pevné části na proudění tekutiny. Immersed Solids je volba, která umožňuje neomezený pohyb pevné části přes tekutinu bez znetvoření sítě.

### 3.4.ANSYS FLUENT

Program ANSYS FLUENT je program vyrobený [6] světoznámými experty s podporou extrémně zkušených inženýrů, je určen pro simulaci problémů spojených s prouděním tekutin (vícefázových, reagujících) se zahrnutím vlivu tepla (vedení, konvekce, radiace).

Program ANSYS FLUENT nabízí:

- Univerzální práci s mřížkou pro všechny typy proudění
- Vynikající škálovatelnost výpočtu na více procesorech
- Možnost výpočtu měnící se mřížky, jako je například otevírání a uzavírání ventilů
- Rozsáhlá nabídka modelů turbulence v celém jejím rozsahu a výpočet akustických polí
- Výpočty se zahrnutím vlivu šíření tepla (vedení, konvekce, radiace) a na ně navazující fyzikální modely (kavitace, modely reálných plynů a mokré páry, stlačitelné proudění)
- Modelování chemických reakcí a spalování, včetně modelu pro emise
- Simulace vícefázového proudění (Lagrange, Euler)
- Zpracování výsledků v CFD-Post
- Možnost spouštění programu v prostředí ANSYS Workbench

Program spolupracuje [6] s ostatními CAD programy, a zvládne vytvořit síť objektu vytvořeného za pomoci rozličných CAD softwarů a použít tento objekt pro CFD simulace. Program by měl být velmi přesný a měl by poskytnout rychlé řešení analyzovaného problému. Dále je program optimalizován pro řešení za pomoci více jádrových procesorů. V programu lze řešit chování jednotlivých součástí a systémů v různých fyzikálních podmínkách jako jsou proudění, mechanické namáhání, vliv teploty, elektromagnetismus a další, a samozřejmě je možné řešit vzájemné ovlivňování mezi nimi. Dále je možné si program upravovat a psát své vlastní skripty pro řešení různých fyzikálních problémů. Software obsahuje výkonný post-processor, který poskytuje vysoce kvalitní post-processorové schopnosti, počínaje ve snadném vytvoření grafů, vysoce kvalitních obrazů a videí. Dále software nabízí ANSYS

---

Martin VLASÁK      Program pro výpočet ventilace a oteplení asynchronních strojů  
Engineering Knowledge Manager™ (EKM), který umožňuje zálohovat simulační data a uchovat je pro další simulaci nebo pro přehledné prohledávání.

### **3.5.COMSOL Multiphysics®**

Program COMSOL Multiphysics® řeší, ostatně jako [7],[8] ostatní programy, metodou konečných prvků fyzikální úlohy popsané parciálními diferenciálními rovnicemi. Program je určen pro modelování multifyzikálních dějů v inženýrské praxi a v mnoha vývojových oblastech technických i vědeckých oborů.

Při řešení problému lze uvažovat několik fyzikálních vlivů najednou a provést tak komplexnější analýzu modelu (multifyzikální úlohy). Program je možno propojit s nástrojem MATLAB určeným pro vědecko-technické výpočty. Úlohy parciálních diferenciálních rovnic jsou numericky řešitelné při zadání všech potřebných parametrů (definici prostředí, fyzikálních vlastností jednotlivých oblastí a zadání počátečních a okrajových podmínek). Program COMSOL Multiphysics® využívá obdobný postup.

Nejprve se vytvoří geometrický model řešeného problému, který se zobrazí v grafickém editoru. Geometrický model může znázorňovat například zatěžovanou strojní součást nebo proud vzduchu v aerodynamickém tunelu. Dále je potřeba vědět, jaké vlivy působí na zobrazovanou geometrii a zadat je do modelu. To znamená, že pokud například sledujeme proces zahřívání součásti, je třeba zvolit parciální diferenciální rovnici popisující šíření tepla, atd. Zvolenou parciální diferenciální rovnici nazýváme fyzikálním rozhraním. Poté co vybereme určité fyzikální rozhraní se nám zpřístupní možnost zadávat potřebné vlastnosti oblastí (hustota prostředí, tepelná vodivost,...), a okrajové nebo počáteční podmínky (teplota na hranici, rychlost tekutiny na vstupu,...). Jak již bylo zmíněno velkou výhodou programu je kombinace několika fyzikálních rozhraní do multifyzikálního modelu. Další z podstatných výhod je takzvaná multifyzika, což znamená, že vypočtená data mohou být promítnuta do její jiné části nebo dokonce do jiné geometrie.

V programu COMSOL Multiphysics® lze řešit například úlohy z elektromagnetismu, elektro-mechanických mikro zařízení (MEMS), přestupu tepla,

Martin VLASÁK      Program pro výpočet ventilace a oteplení asynchronních strojů  
pružnosti a pevnosti, akustiky, dynamiky tekutin, chemických reakcí,... Popřípadě si  
uživatel může zavést vlastní parciální diferenciální rozhraní pro řešení dalších typů  
úloh.

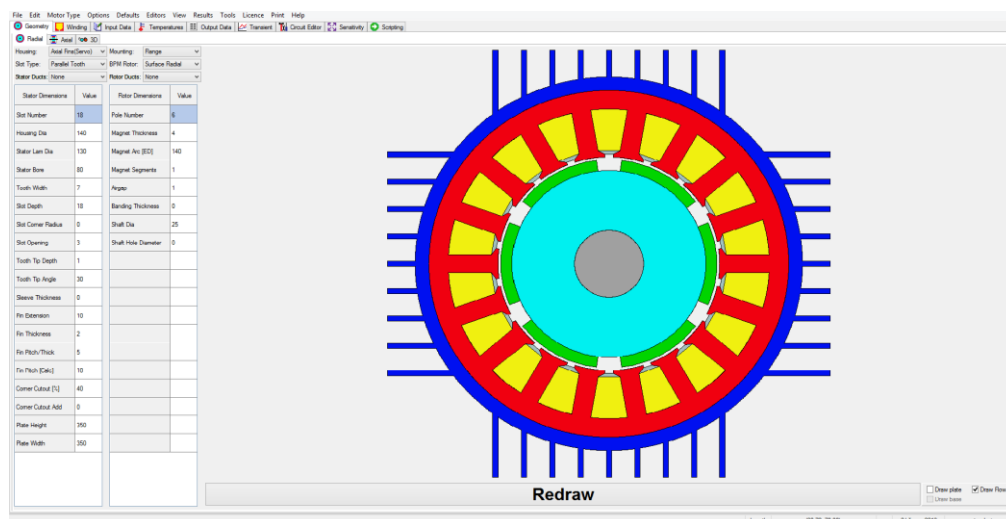
Postup při modelování úlohy v programu COMSOL lze popsat v následujících  
základních krocích.

1. Nejprve je potřeba vytvořit geometrii zkoumaného modelu, to lze učinit  
přímo v CAD nástroji programu COMSOL Multiphysics®, nebo ji lze  
importovat z jiných podporovaných CAD programů.
2. Dále je potřeba zadat okrajové podmínky a vlastnosti oblastí. Lze i využít  
knihovnu předdefinovaných materiálů a chemických prvků.
3. Dále je nutné vygenerovat výpočetní síť, v jejíchž uzlech budou vypočtena  
potřebná data. Síť si lze libovolně nastavit podle potřeby.
4. Dalším krokem je vybrání vhodného typu řešičů pro danou úlohu (například  
přímý nebo iterační řešič, atd.) a spustit řešení.
5. Na závěr lze zpracovávat konečné výsledky a popřípadě je exportovat do  
obrázků, grafů,...

Na závěr bych rád zmínil, že tento postup platí i pro většinu ostatních programů  
založených na metodě konečných prvků nebo objemů, tedy i pro programy ANSYS  
CFX a Fluent.

### **3.6.Motor-CAD**

Jedná se o unikátní softwarový balík [8] určený pro tepelnou analýzu  
elektromotorů a generátorů. Software je používán pro rychlou analýzu navrženého  
elektrického stroje nebo pro analýzu výrobních změn již funkčního elektrického  
stroje. Díky analyticky založeným algoritmům dosahuje vynikajících výpočetních  
rychlostí a lze ho použít pro analýzu v reálném čase. Software má důmyslné  
uživatelské rozhraní, které poskytuje snadný vstup dat a interpretaci výsledků. Na  
obrázku níže (obr. 1) lze vidět ukázkou uživatelského rozhraní.



Obr.1 Uživatelské rozhraní programu Motor-CAD (Převzato z [8])

Při zadávání vstupních hodnot je na obrázcích vidět vizuální odezva k vyloučení chyby ve vstupních datech. Program je naprogramován pro různá provedení motorů, to jsou například různé druhy vinutí, počet žebor, atd. Motor umožňuje provést výpočet ustáleného stavu a zobrazit teploty v určitých částech stroje, nebo též lze provést výpočet přechodového děje a zjistit jak se mění teploty s časem. Před tepelným výpočtem stroje vykonává program ventilační analýzu k určení množství chladiva v částech stroje podstatných pro tepelný výpočet.

## 4. Mechanismy sdílení tepla

Teplu se šíří [10] od místa s větší teplotou k místu s nižší teplotou. Jaké množství tepla se vymění, určuje teplotní gradient, tedy velikost teplotního spádu. Sdílení tepla probíhá třemi základními mechanismy, nebo jejich kombinací. A to

- kondukcí (vedení),
- konvekcí (proudění)
- radiací (vyzařování).

Dále budou popisovány pouze první dva způsoby, které budou uvažovány v tepelném výpočtu.

### 4.1. Sdílení tepla vedením

Tento způsob sdílení tepla [10] se projevuje především v látkách pevného skupenství a je zprostředkován vzájemným srážením stavebních částic hmoty, tyto částice si vzájemně předávají kinetickou energii, což se navenek projevuje vedením tepla.

Velikost tepelného toku při sdílení tepla definuje Fourierův zákon

$$dq = -\lambda gradT \quad (4.1)$$

Ve výrazu vystupuje součinitel tepelné vodivosti  $\lambda$ , který je závislý na teplotě, tuto závislost vyjadřuje vztah

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad (4.2)$$

Kde  $\alpha$  je teplotní součinitel a  $\lambda_0$  je tepelná vodivost při teplotě  $0^\circ\text{C}$ .

Z Fourierova zákona (vztah 4.1) lze odvodit tepelný odpor, který lze použít při řešení tepelné sítě motoru. Pro rovinnou stěnu [11] znázorněnou na obrázku (obr. 2) platí

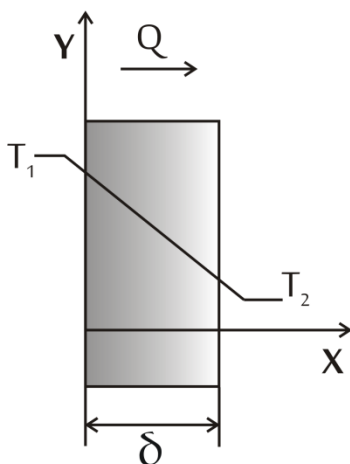
$$Q = \frac{S \cdot \lambda}{\delta} (T_{S1} - T_{S2}) \quad (4.3)$$

Kde  $Q$  je teplo prošlé přes stěnu a výraz

$$(S \cdot \lambda) / \delta \quad (4.4)$$



Je převrácená hodnota tepelného odporu vedením. Tento tepelný odpor bude vystupovat v tepelném výpočtu stroje na základě metody náhradní tepelné sítě.



Obr. 2 Přestup tepla přes rovinnou stěnu (Převzato z [11])

## 4.2. Sdílení tepla prouděním

Tento způsob sdílení tepla [10],[11] se uplatňuje při styku pevné látky s tekutinou, která má odlišnou teplotu. Proudění tekutiny se dělí na dva druhy a to přirozené proudění a proudění nucené, kde je proudící tekutině dodána mechanická energie například ventilátorem.

Pro teplo přenesené z povrchu pevné látky do tekutiny platí vztah

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_{\text{tekutiny}} - T_{\text{povrchu}}) \quad (4.5)$$

Součin  $\alpha \cdot S$  je převrácená hodnota tepelného odporu prouděním, potřebného pro stanovení tepelného odporu v tepelném výpočtu. V rovnici (4.5) vystupuje součinitel přestupu tepla  $\alpha$ , který je obtížně stanovitelný a závisí na mnoha parametrech například rychlosti proudící tekutiny, druhu tekutiny, typu proudění a dalších parametrech.

## 4.3. Součinitel přestupu tepla

Na základě různých experimentálních a teoretických prací [1] byly určeny základní vztahy pro určení součinitelů přestupu tepla vyskytujících se v elektrických

Martin VLASÁK      Program pro výpočet ventilace a oteplení asynchronních strojů  
strojích. V následujících kapitolách budou uvedeny některé z nich, vhodné pro  
tepelný výpočet analyzovaného motoru.

#### 4.3.1. Součinitel přestupu tepla pro vnitřní strany kostry a štítů

Tento součinitel přestupu tepla byl určen na základě experimentů a převzal  
jsem ho z [2].

$$\alpha = (Nu \cdot \lambda) / L \quad (4.6)$$

$$Nu = 0,21 \cdot Re^{0,677} \quad (4.7)$$

$$Re = (v \cdot L) / \nu \quad (4.8)$$

Kde L je délka příslušné části,  $\nu$  viskozita proudící tekutiny a  $v$  její rychlost. Stejný  
součinitel přestupu tepla je použit i pro rotující plochy, jako například hřídel, s tím  
rozdílem, že za charakteristický rozměr L je brán střední průměr rotace příslušné  
části.

#### 4.3.2. Přestup tepla z podélně obtékané desky

Pro podélně [1] obtékanou desku a turbulentní proudění platí přibližný vztah

$$Nu = \alpha \cdot L / \lambda = C_d Re^n Pr \quad (4.9)$$

$$Re = (v \cdot L) / \nu \quad (4.10)$$

Kde L je délka obtékané desky. Pro vzduch a v rozmezí  $Re = 5 \cdot 10^5 - 10^7$  lze  
položít

$$Nu = 0,026 Re^{0,8} \quad (4.11)$$

#### 4.3.3. Součinitel přestupu tepla z čel

V experimentální práci [12] jsou uvedeny součinitelé přestupu tepla z čel  
vinutí. Výsledky této studie mohou být přibližně linearizovány pro malé rychlosti  
proudícího vzduchu, a tedy vztah pro součinitel přestupu tepla bude

$$\alpha = 15,5(0,29 \cdot v + 1) \quad (4.12)$$

#### 4.3.4. Součinitel přestupu tepla z válcové plochy

Kniha [13] uvádí součinitel přestupu tepla pro obtékanou válcovou plochu, a to

$$\alpha = 3,89 \sqrt{v/l} \quad (4.13)$$

#### 4.3.5. Součinitel přestupu tepla do vzduchové mezery

Součinitel přestupu [13] tepla je dán vztahem

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / \delta \quad (4.14)$$

Kde  $\lambda$  je tepelná vodivost vzduchu a  $\delta$  tloušťka vzduchové mezery.

Nusseltovo číslo ( $Nu$ ) závisí na druhu proudění, které je dáno modifikovaným Taylorovým číslem ( $Ta_m$ ).

$$\begin{aligned} Nu &= 2 && \text{pro } Ta_m < 1700 && \text{(pro laminární proudění)} \\ Nu &= 0,128Ta_m^{0,367} && \text{pro } 1700 < Ta_m < 10000 \\ Nu &= 0,409Ta_m^{0,241} && \text{pro } 10000 < Ta_m < 10000000 \\ Ta_m &= T_a / F_g \end{aligned} \quad (4.15)$$

Kde  $F_g$  je geometrický faktor definovaný vztahem

$$F_g = \frac{\pi^4 \left[ \frac{2r_m - 2.304\delta}{2r_m - \delta} \right]}{1697 \left[ 0.0056 + 0.0571 \left( \frac{2r_m - 2.304\delta}{2r_m - \delta} \right)^2 \right] \left[ 1 - \frac{\delta}{2r_m} \right]^2} \quad (4.16)$$

$T_a$  je Taylorovo číslo dané vztahem

$$T_a = \frac{\rho^2 \cdot \Omega^2 \cdot r_m \cdot \delta^3}{\mu^2} \quad (4.17)$$

Kde  $\Omega$  je úhlová rychlost rotoru,  $\rho$  hustota vzduchu,  $\nu$  dynamická viskozita a  $r_m$  střední poloměr vzduchové mezery.

#### 4.3.6. Samovolná konvekce

Stanovením součinitele přestupu tepla při samovolné konvekci se zabývá literatura [15]. Součinitel přestupu tepla se stanoví z Nusseltova čísla dle vztahu

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / D \quad (4.18)$$

Kde  $\lambda$  je tepelná vodivost tekutiny a  $D$  takzvaný charakteristický rozměr tělesa.

Nusseltovo číslo se stanoví ze znalostí Prandtlova ( $Pr$ ) a Grashofova ( $Gr$ ) čísla dle následujících vztahů

$$Nu = 1.18 * (Gr * Pr)^{1/8} \quad \text{pro} \quad 10^{-3} \leq Gr * Pr < 500 \quad (4.19)$$

$$Nu = 0.54 * (Gr * Pr)^{1/4} \quad \text{pro} \quad 500 \leq Gr * Pr < 2 * 10^7 \quad (4.20)$$

$$Nu = 0.135 * (Gr * Pr)^{1/3} \quad \text{pro} \quad 2 * 10^7 \leq Gr * Pr < 10^{13} \quad (4.21)$$

Uvedené vztahy jsou použitelné pro  $D \geq 1\text{mm}$ .

Grashofovo číslo  $Gr$  je určeno vztahem (4.22)

$$Gr = \frac{\beta * |T_s - T_0 * g * D^3|}{\nu^2} \quad (4.22)$$

Kde

$$\beta = 1/T_{def} \quad (4.23)$$

Kde  $\beta$  je relativní změna objemu při konstantním tlaku,  $g$  je gravitační zrychlení,  $\nu$  viskozita tekutiny a  $T_{def}$  je takzvaná definiční teplota a je nutno ji dosazovat v kelvinech.  $T_{def}$  je dána vztahem (4.24)

$$T_{def} = T_s + T_0/2 \quad (4.24)$$

Kde  $T_s$  je teplota povrchu a  $T_0$  teplota tekutiny oboje v kelvinech [K].

Prandtlovo číslo vypočteme ze vztahu (4.25)

$$Pr = \nu/a \quad (4.25)$$

Teplotní vodivost  $a$  je definovaná vztahem

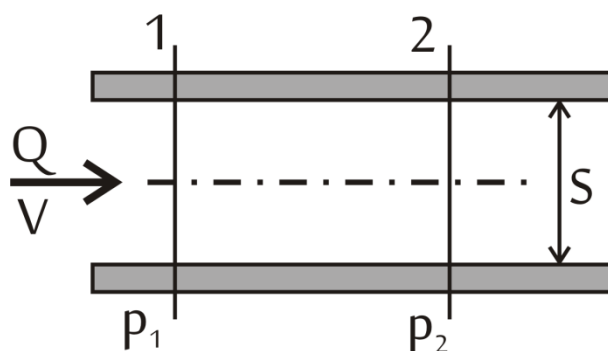
$$a = \lambda/\rho * c_p \quad (4.26)$$

Kde  $\rho$  je hustota a  $c_p$  měrná tepelná kapacita tekutiny při konstantním tlaku.

## 5. Ventilační okruh

### 5.1. Atkinsonův kvadratický zákon

Pro turbulentní proudění, kdy je po celém průřezu kanálu přibližně stejná rychlost, lze odvodit vztah mezi tlakovým úbytkem a množstvím proudící [14] tekutiny.



Obr. 3 Tlakový úbytek v trubici mezi plochou 1 a 2 (Převzato z [14])

Při naznačeném proudění viz (obr. 3), vychází mezi úseky 1 a 2 k tlakovému úbytku  $\Delta p$ , který je dán vztahem

$$\Delta p = \xi \frac{\rho Q^2}{2S^2} \quad (5.1)$$

Výraz

$$K = \xi \left( \frac{\rho}{2S^2} \right) \quad (5.2)$$

označíme jako hydraulický odpor a dostaneme důležitý vztah

$$\Delta p = KQ^2 \quad (5.3)$$

který se nazývá Atkinsonův zákon. Atkinsonův zákon platí pouze pro turbulentní proudění, kdy rychlostní profil v kanálu je téměř po celém průřezu konstantní a blíží se profilu ideální tekutiny, kdy je tření mezi tekutinou a kanálem, stejně jako uvnitř tekutiny mezi jednotlivými proudovými vlákny nulové.

## 5.2. Hydraulické odpory

V elektrických strojích převládají dva druhy hydraulických odporů, a to odpory třením a odpory místní [14].

### 5.2.1. Odpory třením

Jedná se o tření mezi proudící tekutinou [14] a stěnou kanálu uvnitř proudící tekutiny. V tomto případě je dán součinitel hydraulického odporu  $\xi$  vztahem

$$\xi = \lambda \cdot l / D_H \quad (5.4)$$

Kde  $l$  je délka kanálu a  $D_H$  hydraulický průměr kanálu. Hydraulický průměr je průměr kruhového kanálu, kterým nahrazujeme průměr obecného kanálu, a je dán vztahem

$$D_H = 4S / U \quad (5.5)$$

kde  $S$  je průřez obecného kanálu a  $U$  jeho obvod.

Při určování součinitele odporu  $\lambda$  záleží na drsnosti kanálů a typu proudění a jedná se o složitou problematiku.

### 5.2.2. Odpory místní

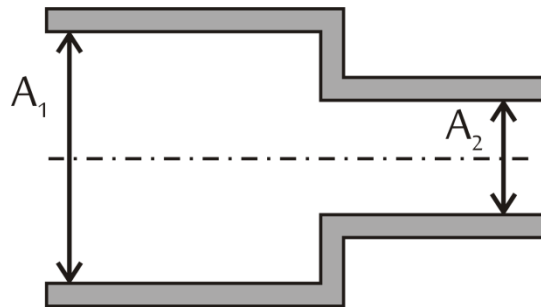
Jedná se o odpory způsobené [14] změnou vektoru rychlosti proudění. Následně budou uvedeny jednotlivé typy těchto odporů potřebné k ventilačnímu výpočtu analyzovaného motoru.

#### Kontrakce (náhlé zúžení)

Jedná se o jeden z nejdůležitějších případů místního odporu. Činitel odporu je v tomto případě přibližně vyjádřen [16] vztahem

$$\xi = 0,5(1 - A_2/A_1) \quad (5.6)$$

Kde  $A_2$  je zúžený průřez a  $A_1$  průřez před zúžením, jak vysvětluje obrázek (Obr. 4).



Obr. 4 Náhlé zúžení průřezu

### Vstup z velkého prostoru

Jedná se o mezní [16] případ náhlého zúžení, kdy může být v mezním případě  $A_2/A_1 \rightarrow 0$ . Pro tento případ bude dán úbytek tlaku vztahem

$$\Delta p = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot w_2^2 \cdot (1,5) \quad (5.7)$$

Součinitel odporu  $\xi$  tedy bude roven číslu 1,5.

### Ohyb

Odpor ohybu [17] byl stanoven podle následujícího vztahu

$$K = \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{1}{S_1^2} - \frac{1}{S_2^2} - \frac{2 \cdot \cos(\alpha)}{S_1 \cdot S_2} + \frac{2}{S_2^2} \right) \quad (5.8)$$

Ve výrazu vystupují hustota vzduchu  $\rho$ , průřez před ohybem  $S_1$ , průřez za ohybem  $S_2$  a úhel ohybu  $\alpha$ .

### Síto

Mříž se skládá [1] z paralelně umístěných tyčí libovolného průřezu umístěných ve stejné vzdálenosti od sebe. Síto vznikne překrýváním dvou mříží. Mříže a síta zvyšují hydraulický odpor, což je na škodu, ale je nutné je použít jako předepsanou ochranu vstupu a výstupu. Prostup tekutiny přes mříž doprovází zúžení toku, poměr zúžení je dán výrazem

$$m = S_0/S_1 \quad (5.9)$$

Kde  $S_0$  je průřez mříže nebo síta mezi tyčemi (tedy zúžený průřez) a  $S_1$  původní průřez před zúžením.

Po kontrakci se tok opět rozšíří na původní průřez. Odpor mříže nebo síta o celkovém volném průřezu

$$S_{0c} = S_0 \cdot n \quad (5.10)$$

kde  $n$  je počet otvorů mříže nebo síta, je dán vztahem

$$K = \frac{\rho \cdot \xi}{2 \cdot S_{0c}^2} \quad (5.11)$$

Kde součinitel odporu  $\xi$  je dán vztahem

$$\xi = (1 - m)^2 \quad (5.12)$$

### 5.2.3. Řazení hydraulických odporů

Podobně jako v elektrických [14] obvodech i v obvodech hydraulických můžeme řadit hydraulické odpory sériově, paralelně nebo kombinovaně. Zde uvedu pouze základní dva druhy řazení odporů a to sériové a paralelní, pro výpočet analyzovaného motoru stačí řadit odpory jen do série.

#### a) Sériové řazení

Při sériovém řazení prochází všemi prvky stejný tok chladiva  $Q$  a celkový hydraulický odpor větve je dán součtem jednotlivých hydraulických odporů.

$$K = \sum_{i=1}^n K_i \quad (5.13)$$

#### b) Paralelní řazení

Při paralelním řazení vyházíme z Atkinsonova zákona a obdoby 1. Kirchhoffova zákona, který vyjadřuje rovnice 2.2

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (5.14)$$

Aplikací Atkinsonova zákona (12.2) na vztah (12.2) získáme rovnici

$$\sqrt{\frac{\Delta p}{K}} = \sqrt{\frac{\Delta p}{K_1}} + \sqrt{\frac{\Delta p}{K_2}} + \dots + \sqrt{\frac{\Delta p}{K_n}} \quad (5.15)$$

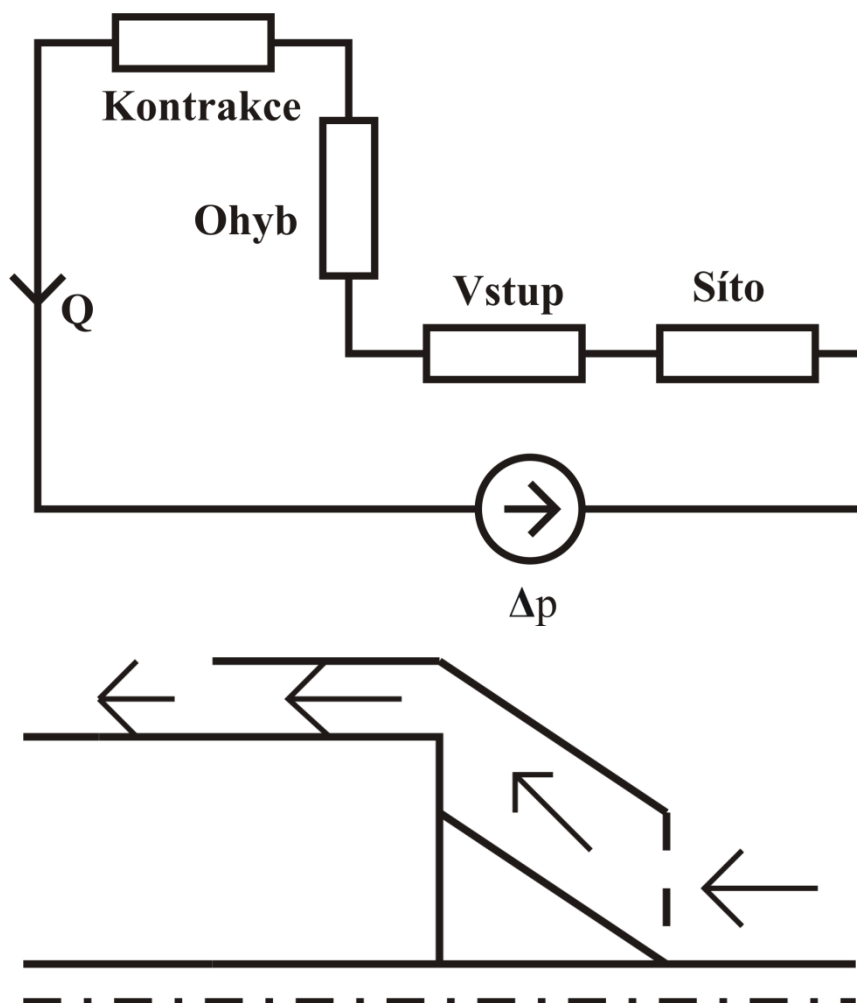
Po jednoduché úpravě získáme vztah pro výsledný hydraulický odpor (10.2)



$$\sqrt{\frac{1}{K}} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{1}{K_i}} \quad (5.16)$$

### 5.3. Ventilací sít' analyzovaného motoru

Ve ventilací síti vystupují dříve zmíněné hydraulické odpory a to, vstup, síto, ohyb a náhlé zúžení. Náhradní schéma je zobrazeno na obrázku (Obr. 5 nahoře).



Obr. 5 Náhradní schéma ventilacího obvodu

Vzduch je nejprve nasán (z velkého prostoru) přes síto do ventilátoru, kde dojde k jeho ohybu, na konci ventilátoru (u vstupu do výfuku) dojde k zúžení a vzduch projde přes výfuk ven, kde proudí kolem žeber stroje, viz (Obr. 5 dole).

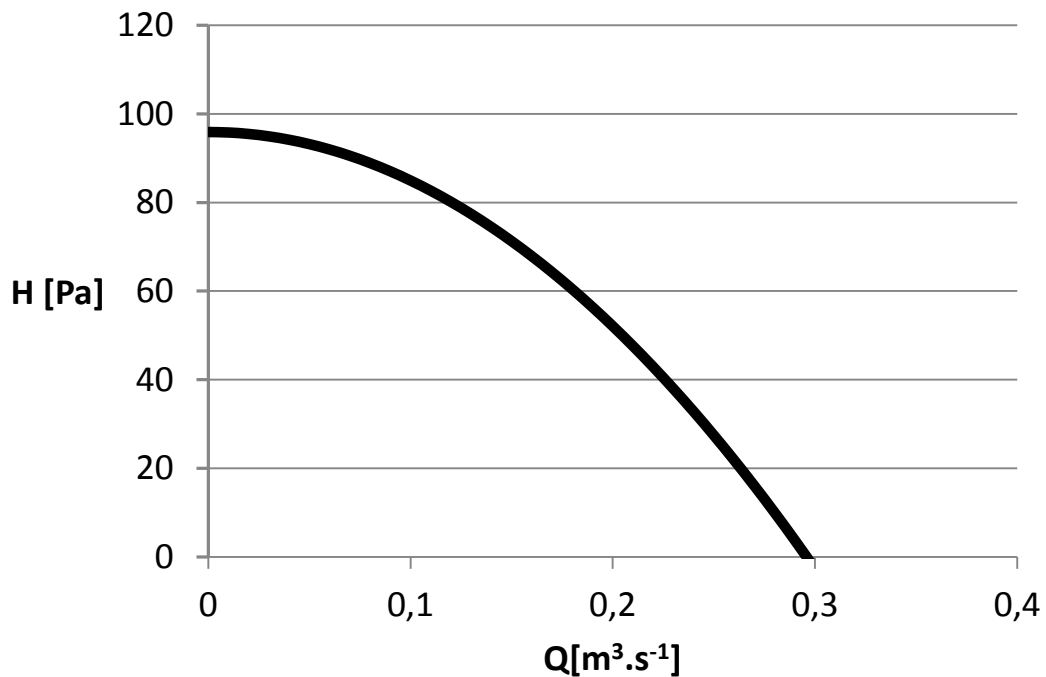
## 5.4. Tlakový zdroj (ventilátor)

### 5.4.1. Tlaková charakteristika

Vlastnosti zdroje [16] tlaku ve ventilační síti jsou obecně vyjádřeny závislostí  $H=f(Q)$ , tedy tlakovou charakteristikou. Závislost tlaku, který protlačí ventilátor na objemovém množství chladiva je vyjádřena následujícím vztahem

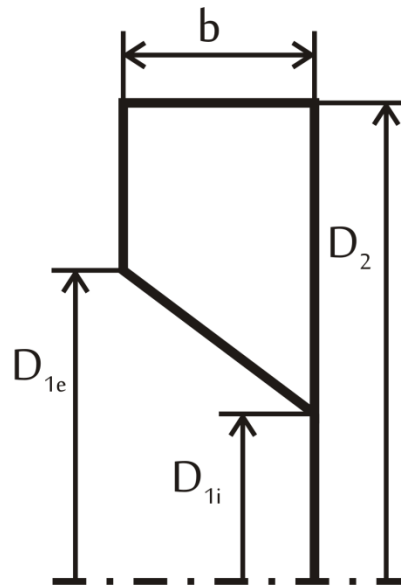
$$H = H_0 + K_V \cdot Q^2 \quad (5.17)$$

Tlakovou charakteristiku znázorňuje obrázek (Obr. 6).



Obr. 6 Tlaková charakteristika ventilátoru

Dále budou uvedeny vzorce pro výpočet radiálního ventilátoru [1] s rovnou lopatkou (Obr. 7), který byl použit pro výpočet analyzovaného asynchronního motoru, včetně dosazení konkrétních hodnot daného stroje.



Obr. 7 Lopatka ventilátoru

Střední vnitřní průměr ventilátoru  $D_1$

$$D_1 = (D_{1e} + D_{1i})/2 \quad (5.18)$$

Střední vnější průměr ventilátoru  $D_2$

Střední šířka lopatky  $b$

Počet lopatek  $z$

Následující tabulka (5.1) zobrazuje dosazené parametry ventilátoru.

Tabulka 5.1 parametry ventilátoru

Veličina	Hodnota
$n$ [ $ot. min^{-1}$ ]	1460
$D_2$ [m]	0,28
$D_1$ [m]	0,14
$D_v$ [m]	0.31
$\alpha$	$2\pi$
$m$	0,651
$z$	7
$b$ [m]	0.06

Obvodovou rychlost lopatek ventilátoru, lze vyjádřit následujícím vztahem

$$u = \frac{\pi \cdot n}{60} \cdot D_2 = \frac{\pi \cdot 1460}{60} \cdot 0,28 = 21,4[m.s^{-1}] \quad (5.19)$$

Průměrový parametr je vyjádřen vztahem

$$\zeta = 1 - \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^2 = 1 - \left( \frac{0,14}{0,28} \right)^2 = 0,75 \quad (5.20)$$

Parametr šířkový je definován následujícím vztahem

$$\nu = \frac{b}{D_2} = \frac{0,06}{0,28} = 0,2143 \quad (5.21)$$

Na základě podobnosti radiálních ventilátorů byly odvozeny bezrozměrné vztahy, s jejichž pomocí je možné stanovit tlakovou charakteristiku ventilátoru. Pro náhradní průběh lze psát dle [1] následující empirické vztahy, vzniklé lineární interpolací skutečných charakteristik.

Pro tlakové číslo naprázdno byl empiricky stanoven vztah

$$\begin{aligned} \psi_0 &= [1,042 + 0,343 \cdot \nu - (3 + 44 \cdot \nu) \cdot z \cdot 10^{-3}] \cdot \zeta - (22,785 \cdot \nu - 0,74 \cdot z) \cdot 10^{-2} = \\ &= [1,042 + 0,343 \cdot 0,2143 - (3 + 44 \cdot 0,2143) \cdot 7 \cdot 10^{-3}] \cdot 0,75 - (22,785 \cdot 0,2143 - 0,74 \cdot 7) \cdot 10^{-2} = \\ &= 0,7783 \end{aligned} \quad (5.22)$$

Pro maximální objemové číslo byl odvozen vztah

$$\begin{aligned} \varphi_m &= [(1,2 - \zeta) \cdot \zeta + 1,26 \cdot (0,6 - \zeta) \cdot z \cdot 10^{-2} - 0,11] \cdot (3,42 \cdot \nu + 0,13) - (1 - 0,06 \cdot z) \cdot 10^{-2} = \\ &= [(1,2 - 0,75) \cdot 0,75 + 1,26 \cdot (0,6 - 0,75) \cdot 7 \cdot 10^{-2} - 0,11] \cdot (3,42 \cdot 0,2143 + 0,13) - (1 - 0,06 \cdot 7) \cdot 10^{-2} = \\ &= 0,1791 \end{aligned} \quad (5.23)$$

Vztahy (5.22) a (5.23) je možné využít pouze rozsahu platnosti aproximace a to:

$$\xi = 0,15 \div 0,9$$

$$\nu = 0,05 \div 0,3$$

$$z = 6 \div 30$$

Odporové číslo je dáno vztahem

$$\chi = \frac{\psi_0}{\varphi_m} \quad (5.24)$$

Charakteristiky ventilátoru pracujícího do víka [1] se podstatně liší od charakteristik ventilátoru prostého, pracujícího v normálním okolí, proto byly nalezeny adaptační konstanty, kterými se násobí v našem případě maximální objemové a tlakové číslo naprázdno.

Adaptační konstanty představující vliv víka na charakteristiku ventilátoru mají dle [5], tato empirická funkční vyjádření

$$\begin{aligned} \psi_a &= \left[ 1,2 + 0,6 \cdot \left( \frac{D_v}{D_2} \right) - 0,23 \cdot \alpha \right] \cdot (1,2 - 0,2m) = \\ & \left[ 1,2 + 0,6 \cdot \left( \frac{0,31}{0,28} \right) - 0,23 \cdot 2 \cdot \pi \right] \cdot (1,2 - 0,2 \cdot 0,651) = 0,4484 \end{aligned} \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned} \varphi_a &= \left[ -0,38 + 0,65 \cdot \left( \frac{D_v}{D_2} \right) + 0,16 \cdot \alpha \right] \cdot (-0,3 + 3m - 1,7m^2) = \\ & \left[ -0,38 + 0,65 \cdot \left( \frac{0,31}{0,28} \right) + 0,16 \cdot 2 \cdot \pi \right] \cdot (-0,3 + 3 \cdot 0,651 - 1,7 \cdot 0,651^2) = 1,2542 \end{aligned} \quad (5.26)$$

Kde  $D_v$  je ekvivalentní průměr víka,  $\alpha$  středový úhel otevření víka udávaný v obloukové míře a  $m$  je poměrný volný průřez výstupu.

Úprava bezrozměrných charakteristik na ventilátor pracující ve víku vypadá následovně

$$\psi_a^* = \psi_0 \cdot \psi_a = 0,7783 \cdot 0,4484 = 0,349 \quad (5.27)$$

$$\varphi_m^* = \varphi_m \cdot \varphi_a = 0,1791 \cdot 1,2542 = 0,2246 \quad (5.28)$$

Nyní můžeme určit vnitřní odpor ventilátoru

$$\begin{aligned} K_v &= \chi \cdot \left( \frac{4}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left( \frac{1}{D_2} \right)^4 = \\ & \frac{0,349}{0,2246^2} \cdot \left( \frac{4}{\pi} \right)^2 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot \left( \frac{1}{0,28} \right)^4 = 1094,83 [\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-8}] \end{aligned} \quad (5.29)$$

a tlak ventilátoru naprázdno, který je dán vztahem

$$H_0 = \psi_a^* \cdot \frac{\rho}{2} \cdot u_v^2 = 0,349 \cdot \frac{1,2}{2} \cdot 21,4^2 = 95,9 [Pa] \quad (5.30)$$

Maximální průtočné množství vzduchu můžeme stanovit na základě následujícího vztahu

$$Q_m = \varphi_a^* \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_2^2 \cdot u_v = 0,2246 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 0,28^2 \cdot 21,4 = 0,296 [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (5.31)$$

#### 5.4.2. Pracovní bod ventilátoru

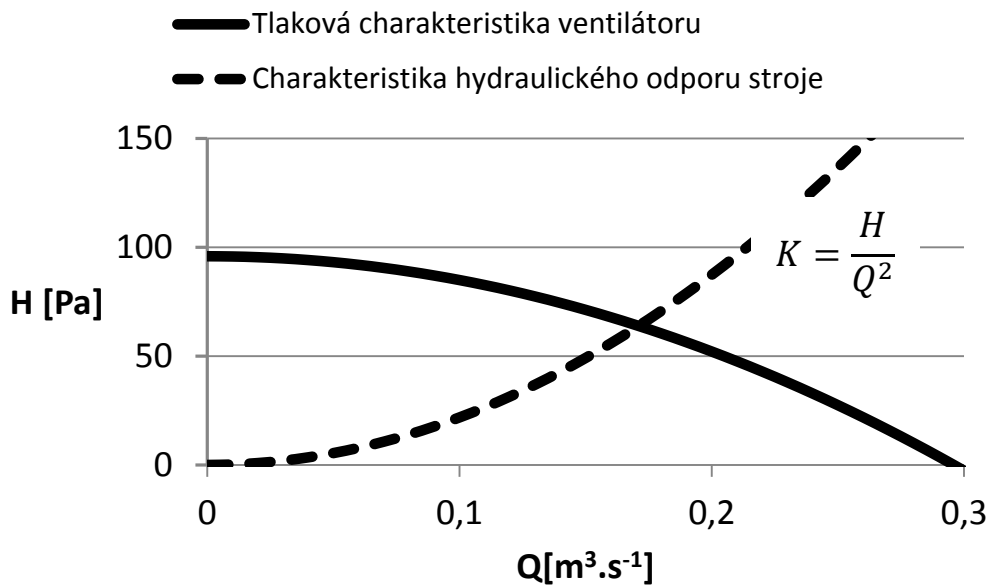
Jedná se o průsečík [14],[18] tlakové charakteristiky ventilátoru s charakteristikou hydraulického odporu stroje. Množství chladiva odpovídající tomuto bodu je množství, které protlačí ventilátor a mělo by odpovídat množství chladiva, které je nutné k odvedení všech ztrát ze stroje.

$$Q = \frac{\sum \Delta P}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta T} \quad (5.32)$$

Ve výrazu vystupuje množství chladiva, které má projít strojem  $Q$ , dále součet všech ztrát, které se budou chladícím médiem odvádět  $\sum \Delta P$ , hmotnostní měrné teplo chladícího média  $c_p$  a oteplení chladícího média  $\Delta T$ .

Pokud by ventilátor protlačil menší množství chladiva, stroj by se přehříval. Naopak pokud by ventilátor protlačil zbytečně velké množství chladiva, stroj by nedosáhl dovolené teploty, ale narostly by ventilační ztráty v důsledku předimenzovaného ventilátoru.

Znázornění pracovního bodu, jako průsečíku charakteristiky ventilátoru a hydraulického odporu stroje je vidět na následujícím obrázku (Obr. 8).



Obr. 8 Pracovní bod ventilátoru jako průsečík tlakové charakteristiky ventilátoru a charakteristiky hydraulického odporu stroje

### 5.5. Výsledné rychlosti vzduchu ve stroji

Z průsečíku tlakové charakteristiky ventilátoru a charakteristiky hydraulického odporu stroje vychází objemový průtok strojem  $Q = 0,1711 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Z čehož by vycházela rychlost chladiva před strojem

$$v = \frac{Q}{\text{průřez vstupu}} = \frac{0,1711}{0,035} = 4,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.33)$$

což by odpovídalo naměřené hodnotě, rychlost za strojem by vycházela

$$v = \frac{Q}{\text{průřez výstupu}} = \frac{0,1711}{0,0278} = 6,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (5.34)$$

Což naměřené hodnotě neodpovídá, proto byla výsledná rychlost vynásobena konstantou 1,8. Pro výpočet součinitelů přestupu tepla nad strojem je tato rychlost průběžně snižována s rostoucí vzdáleností od výfuku stroje.

Rychlost vzduchu proudícího kolem čel byla stanovena z rychlosti lopatek rotoru a vynásobena konstantou, protože výsledná rychlost bude o něco nižší. Výpočet byl proveden podle vztahu (5.35)

$$v = \omega \cdot r \cdot \eta = 152,9.0,07187 * 0,75 = 8,25m \cdot s^{-1} \quad (5.35)$$

Stejný postup byl použit pro výpočet rychlosti vzduchu kolem štítů, s tím že použitá konstanta se lišila. Rychlost proudění kolem hřídele se spočítala z toho samého vztahu, s tím že konstanta byla rovna jedné.

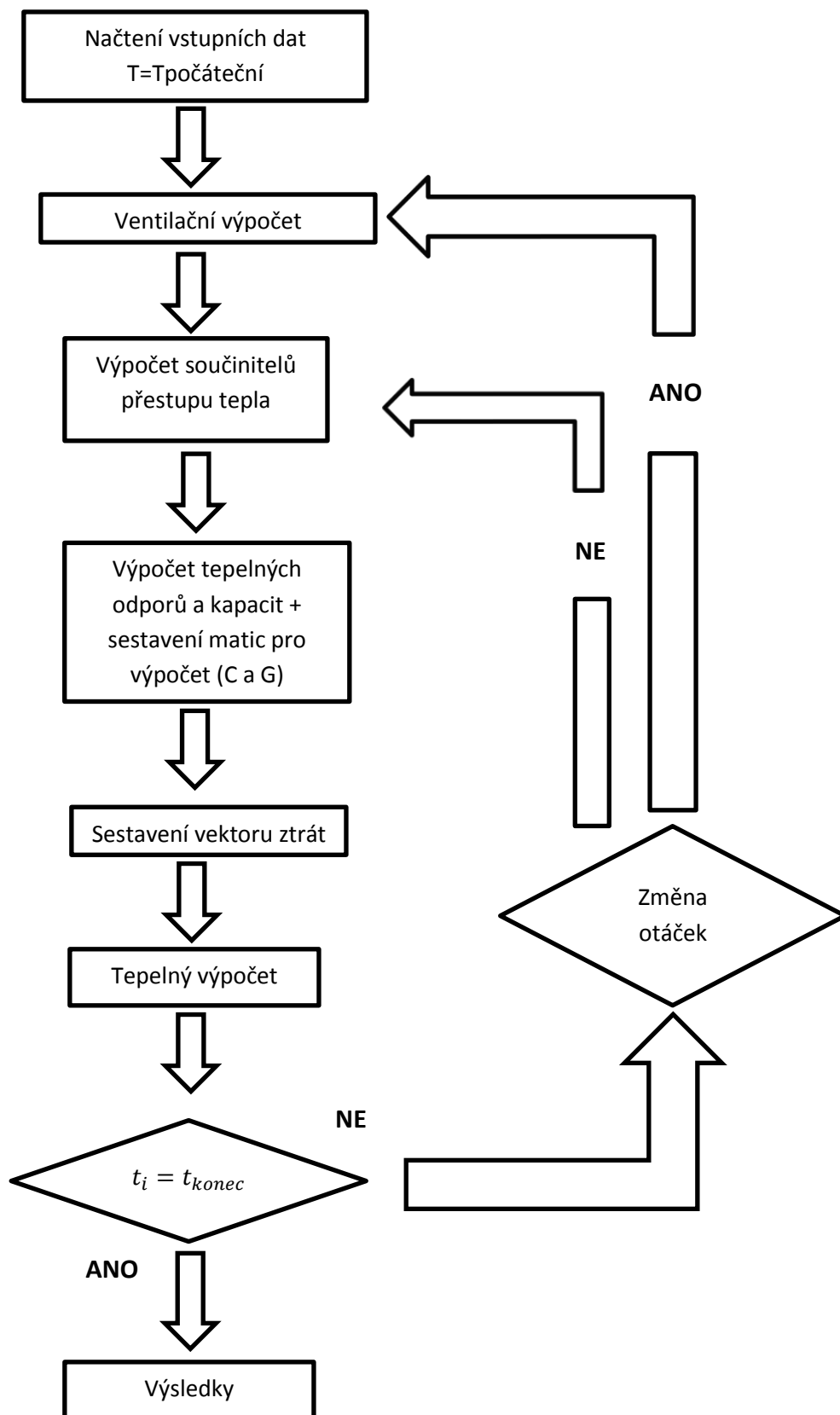


## 6. Vývojový diagram programu

Výpočet teplot ve stroji je řešen metodou náhradní tepelné sítě, které se podrobněji věnuje literatura [2],[19] a [20], nebudu proto zde tuto metodu popisovat. Uvedu zde pouze rovnici, která vystupuje v programu a to:

$$(d\Delta T/dt)C_T + G \times \Delta T = \Delta P \quad (6.1)$$

Matic  $G$  je matice tepelných vodivostí a vystupují v ní jednotlivé tepelné odpory stroje,  $C_T$  representuje tepelné kapacity jednotlivých částí stroje, ve vektoru  $\Delta P$  vystupují ztráty jednotlivých částí stroje rozšířené o odvod tepla do okolí (pomocí tepelných odporů) a  $\Delta T$  representuje střední teploty jednotlivých uzlů v náhradní tepelné síti. Dále je matice  $G$  rozšířena o chladicí okruh stroje a vektor  $\Delta P$  spolu s maticí  $G$  poupraven pro započítání vlivu ztrát na teplotu. Postup výpočtu oteplení motoru zobrazuje blokové schéma programu (Obr. 9).



Obr. 9 Blokové schéma programu

Program nejprve načte vstupní data, mezi něž patří rozměry stroje, materiálové konstanty, průběh ztrát, počáteční teplota, časový krok atd. Poté následuje ventilační výpočet k určení množství chladiva, které prochází chladícím kanálem, to poslouží k určení některých součinitelů přestupu tepla a sestavení výpočetní matice (matice  $G$ ) rozšířené o odvod tepla do chladícího kanálu viz literatura [2]. Po ventilačním výpočtu se provede již zmiňovaný výpočet součinitelů přestupu tepla. Dále následuje výpočet tepelných odporů a tepelných kapacit, pomocí nichž jsou sestavené matice  $G$  a  $C_T$  potřebné pro tepelný výpočet. Poté je provedeno sestavení vektoru ztrát, které následuje vlastní tepelný výpočet, kdy je se zadaným časovým krokem řešena rovnice (6.1), tím se zjistí teploty stroje v čase zvýšeném o časový krok, pokud tento čas odpovídá času, do kterého se má počítat, vypíší se výsledky a program je ukončen, pokud tomu tak není, provede se přepočítání veličin pro nové teploty, změní se součinitelé přestupu tepla (viskozita se mění s teplotou), vektor ztrát, tepelné odpory a kapacity. Následně se tepelný výpočet opakuje. V programu je ještě uvedena smyčka, která uvažuje změnu otáček stroje v průběhu výpočtu, pokud tato změna nastane, je nutné opětovně provést ventilační výpočet.

## 7. Analyzovaný motor

### 7.1. Parametry analyzovaného motoru

Zkoumaným strojem byl trojfázový asynchronní motor nakrátko 1LA7 163-4AA od firmy Siemens. Tyto motory jsou určeny pro teplotu okolí od  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Izolační systém motoru je teplotní třídy izolace 155 (F) s oteplením ve třídě B.

Pro informaci a porovnání výsledků uvedu katalogové údaje týkající se využití izolačního systému při napájení ze sítě.

Využití na tepelnou třídu 155 (F), zvýšený výkon

Jmenovitý výkon motoru 1LA7 je možno zvýšit o 10 %.

Využití na tepelnou třídu 155 (F), zvýšená teplota okolí

U motorů se jmenovitým výkonem se může teplota okolí zvýšit na  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Využití na tepelnou třídu 130 (B), teplota okolí  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , výkon snížený cca o 4 %.

Motory mají jmenovitý výkon snížený cca o 4 %.

Využití na tepelnou třídu 130 (B), teplota okolí  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ , výkon snížený cca o 8 %.

Motory mají jmenovitý výkon snížený cca o 8 %.

Využití na tepelnou třídu 130 (B), teplota okolí  $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ , výkon snížený cca o 13 %.

Motory mají jmenovitý výkon snížený cca o 13 %.

Využití na tepelnou třídu 130 (B), teplota okolí  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , výkon snížený cca o 18 %.

Motory mají jmenovitý výkon snížený cca o 18 %.

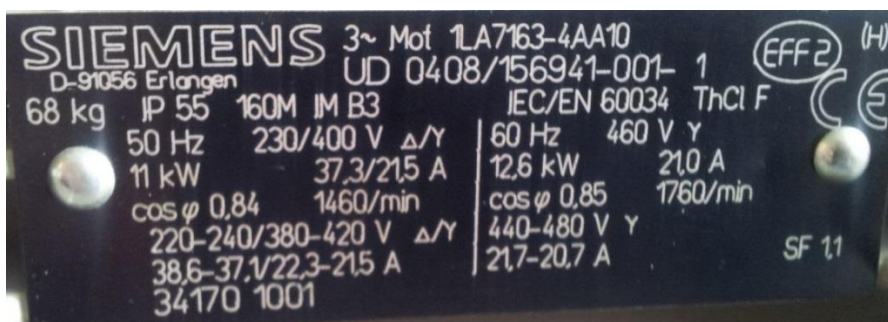
#### 7.1.1. Štítkové údaje

V tabulce 8.1 jsou znázorněny některé štítkové údaje analyzovaného motoru, štítek je ofocen na obrázku pod ní (Obr. 10).

---

Tabulka 8.1 Štítkové údaje

Výrobce	SIEMENS
Typ motoru	1LA7163-4AA10
Výrobní číslo	UD 0408/156941-001-1
Druh stroje	3~ Motor
Jmenovité napětí [V]	230/400 Δ/Y
Jmenovitý proud [A]	37,3/21,5
Kmitočet [Hz]	50
Jmenovité otáčky	1460/min
Teplotní třída izolace	F
Účinník	0,84
Výkon [kW]	11
Krytí	IP 55
Servis faktor	SF 1,1



Obr. 10 Štítek analyzovaného motoru

### 7.1.2. Ztráty motoru

Dle katalogových údajů má analyzovaný motor 1LA7 163-4AA výkon  $P=11\text{kW}$  a účinnost 88,5% tomu odpovídají celkové ztráty

$$\Delta P = P_1 \left( \frac{1}{\eta} - 1 \right) = 11 * \left( \frac{1}{0,885} - 1 \right) = 1430\text{W} \quad (7.1)$$

Ztráty pro výpočet byly rozděleny dle podobného navrženého stroje v poměrech, které ukazuje následující tabulka.

**Tabulka 8.2 Ztráty stroje**

Vinutí statoru	763 W
Vinutí rotoru	282 W
Jho statoru	181 W
Zuby statoru	60 W
Ložiska	60 W
Zuby rotoru	83 W

Konkrétně pro drážky statoru byly stanoveny ztráty na 440 W a pro čela 323 W, pro drážky rotoru 181 W a pro kruhy 101 W.

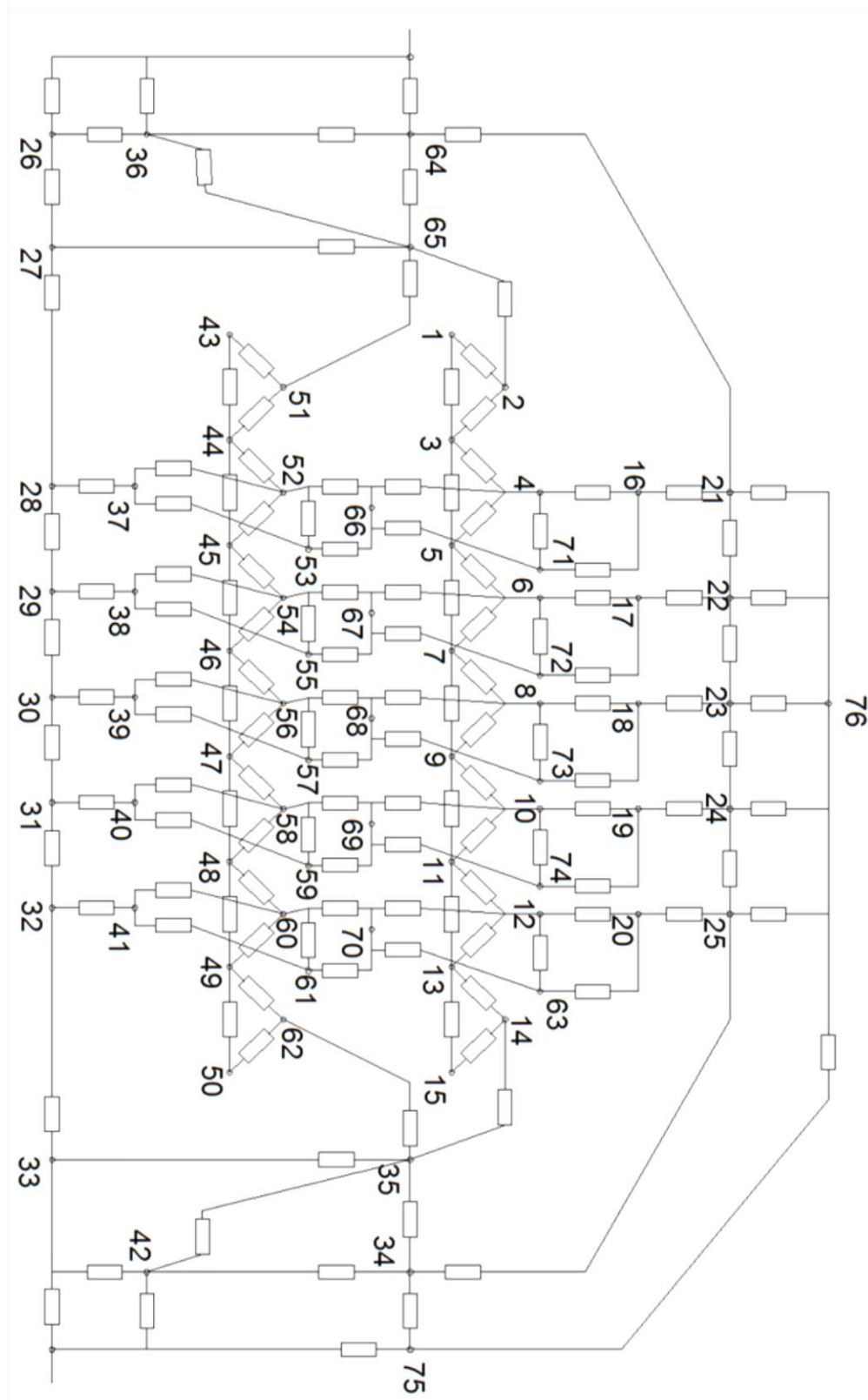
Do kterých uzlů tyto ztráty vstupují, zobrazuje tabulka 8.3.

**Tabulka 8.3 Rozložení ztrát v uzlech**

Ztráty	Uzly
Jho statoru	16,17,18,19,20
Zuby statoru	71,72,73,74,63
Ložiska	36,42
Zuby rotoru	53,55,57,59,61
Vinutí statoru	
Drážky	4,6,8,10,12
Čela	2,14
Vinutí rotoru	
Drážky	52,54,56,58,60
Kruhy	51,62

## 7.2. Tepelná síť analyzovaného motoru

Tepelnou síť analyzovaného motoru s jednotlivými odpory lze vidět na obrázku níže (Obr. 11).



Obr. 11 Tepelná síť motoru 1LA7 163-4AA

Na následujících stránkách je uveden seznam tepelných odporů vyskytujících se v tepelné síti.

R(1,2)	čelo (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(1,3)	čelo (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(2,3)	čelo (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(2,65)	čelo - vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(3,4)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(3,5)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(4,5)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(4,16)	vinutí statoru – jho statoru
R(4,66)	vinutí statoru – vzduchová mezera
R(4,71)	vinutí statoru – zub statoru
R(5,6)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(5,7)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(6,7)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(6,17)	vinutí statoru – jho statoru
R(6,67)	vinutí statoru – vzduchová mezera
R(6,72)	vinutí statoru – zub statoru
R(7,8)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(7,9)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(8,9)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(8,18)	vinutí statoru – jho statoru
R(8,68)	vinutí statoru – vzduchová mezera
R(8,73)	vinutí statoru – zub statoru
R(9,10)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(9,11)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(10,11)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(10,19)	vinutí statoru – jho statoru
R(10,69)	vinutí statoru – vzduchová mezera
R(10,74)	vinutí statoru – zub statoru
R(11,12)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)

---



R(11,13)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(12,13)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(12,20)	vinutí statoru – jho statoru
R(12,70)	vinutí statoru – vzduchová mezera
R(12,75)	vinutí statoru – zub statoru
R(13,14)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(13,15)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(14,15)	vinutí statoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(14,35)	čelo - vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(16,21)	jho statoru – kostra
R(16,71)	jho statoru – zub statoru
R(17,22)	jho statoru – kostra
R(17,72)	jho statoru – zub statoru
R(18,23)	jho statoru – kostra
R(18,73)	jho statoru – zub statoru
R(19,24)	jho statoru – kostra
R(19,74)	jho statoru – zub statoru
R(20,25)	jho statoru – kostra
R(20,63)	jho statoru – zub statoru
R(21,22)	kostra – kostra
R(21,64)	kostra – štít
R(21,76)	kostra – vzduch nad strojem
R(22,23)	kostra – kostra
R(22,76)	kostra – vzduch nad strojem
R(23,24)	kostra – kostra
R(23,76)	kostra – vzduch nad strojem
R(24,25)	kostra – kostra
R(24,76)	kostra – vzduch nad strojem
R(25,34)	kostra – štít
R(25,76)	kostra – vzduch nad strojem
R(26,27)	hřídel – hřídel

---

R(26,36)	hřídel - ložisko
R(27,28)	hřídel – hřídel
R(27,65)	hřídel – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(28,29)	hřídel – hřídel
R(28,37)	hřídel – jho rotoru
R(29,30)	hřídel – hřídel
R(29,38)	hřídel – jho rotoru
R(30,31)	hřídel – hřídel
R(30,39)	hřídel – jho rotoru
R(31,32)	hřídel – hřídel
R(31,40)	hřídel – jho rotoru
R(32,33)	hřídel – hřídel
R(32,41)	hřídel – jho rotoru
R(33,35)	hřídel – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(33,42)	hřídel – ložisko
R(34,35)	štít – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(34,42)	štít – ložisko
R(34,75)	štít – vzduch ve ventilátoru
R(35,62)	kruh – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(36,64)	ložisko – štít
R(36,65)	ložisko – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(37,52)	jho rotoru – tyče rotoru
R(37,53)	jho rotoru – zub rotoru
R(38,54)	jho rotoru – tyče rotoru
R(38,55)	jho rotoru – zub rotoru
R(39,56)	jho rotoru – tyče rotoru
R(39,57)	jho rotoru – zub rotoru
R(40,58)	jho rotoru – tyče rotoru
R(40,59)	jho rotoru – zub rotoru
R(41,60)	jho rotoru – tyče rotoru
R(41,61)	jho rotoru – zub rotoru

---

R(43,44)	kruh (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(43,51)	kruh (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(44,45)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(44,51)	kruh (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(44,52)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(45,46)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(45,52)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(45,54)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(46,47)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(46,54)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(46,56)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(47,48)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(47,56)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(47,58)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(48,49)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(48,58)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(48,60)	tyč rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(49,50)	kruh (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(49,60)	tyče rotoru (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(49,62)	kruh (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(50,62)	kruh (s uvažováním vedení tepla v podélném směru)
R(51,65)	kruh – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(52,53)	tyč rotoru – zub rotoru
R(52,66)	tyč rotoru – vzduchová mezera
R(53,66)	zub rotoru – vzduchová mezera
R(54,55)	tyč rotoru – zub rotoru
R(54,67)	tyč rotoru – vzduchová mezera
R(55,67)	zub rotoru – vzduchová mezera
R(56,57)	tyč rotoru – zub rotoru
R(56,68)	tyč rotoru – vzduchová mezera
R(57,68)	zub rotoru – vzduchová mezera

---

R(58,59)	tyč rotoru – zub rotoru
R(58,69)	tyč rotoru – vzduchová mezera
R(59,69)	zub rotoru – vzduchová mezera
R(60,61)	tyč rotoru – zub rotoru
R(60,70)	tyč rotoru – vzduchová mezera
R(61,70)	zub rotoru – vzduchová mezera
R(63,70)	zub statoru – vzduchová mezera
R(64,65)	štít – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem
R(66,71)	vzduchová mezera – zub statoru
R(67,72)	vzduchová mezera – zub statoru
R(68,73)	vzduchová mezera – zub statoru
R(69,74)	vzduchová mezera – zub statoru

Odpory mezi strojem a okolím

Rp(26)	hřídel-okolní vzduch
Rp(33)	hřídel-okolní vzduch
Rp(36)	ložisko-okolní vzduch
Rp(42)	hřídel-okolní vzduch
Rp(64)	štít-okolní vzduch

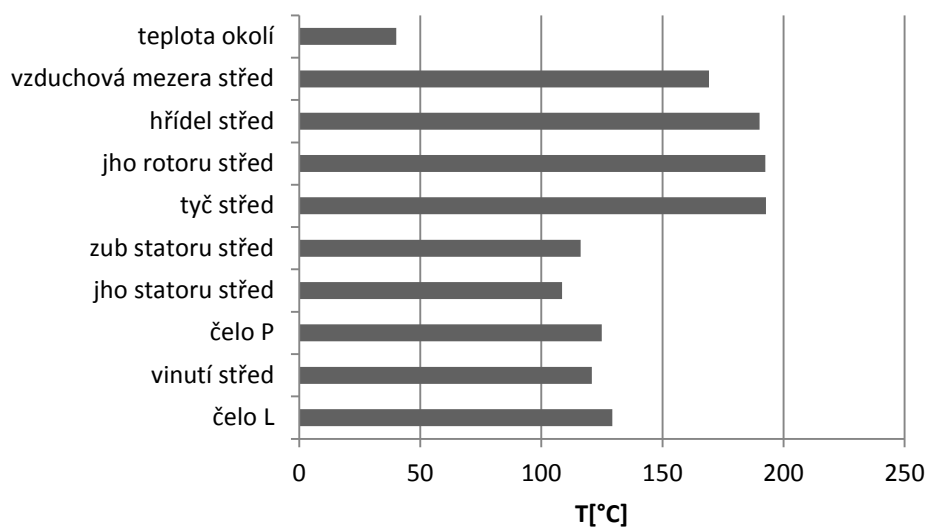
## 8. Výsledky

Do vytvořeného programu byly zadány všechny rozměry stroje potřebné pro výpočet hydraulických a tepelných odporů, rozměry ventilátoru, materiálové parametry, počáteční teploty, ztráty a další. Poté byl proveden výpočet. V následující tabulce jsou vidět výsledky výpočtu nejvyšší teploty vinutí stroje (tedy v méně chlazeném čele) a porovnání s katalogovými údaji, kterými se zabývá kapitola 7.1.

**Tabulka 8.1 Porovnání výpočtu s katalogovými údaji**

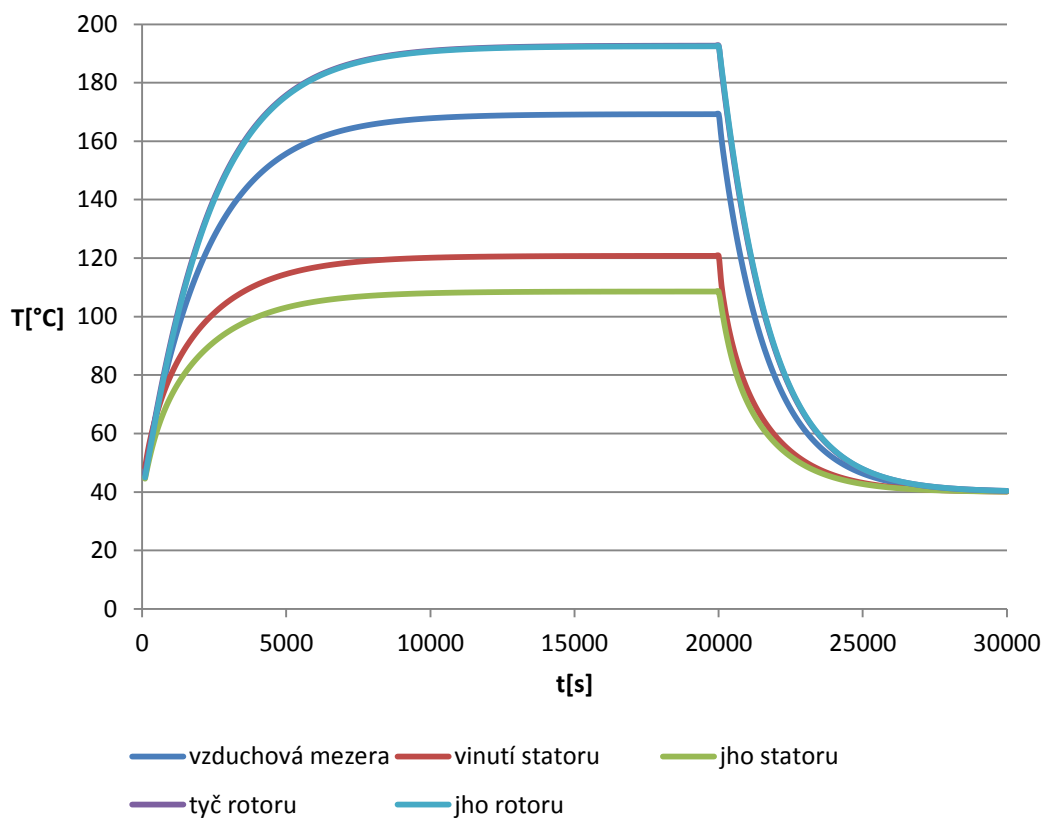
Katalogové údaje			Výpočet
Teplota okolí [°C]	Výkon [procenta $P_n$ ]	Využití izolace	Teplota [°C]
40	100	130(B)	129,6
40	110	155(F)	141,3
55	100	155(F)	144,2
45	96	130(B)	130
50	92	130(B)	130,5
55	87	130(B)	130,1
60	82	130(B)	129,7

Pro prezentaci výsledků byl dále proveden výpočet ustáleného stavu při jmenovitém výkonu, otáčkách a teplotě okolí 40°C, vypočítané teploty ukazuje následující obrázek (Obr. 12).



Obr. 12 Vypočítané rozložení teplot stroje

Na následujícím obrázku (Obr. 13) lze vidět přechodný děj oteplení a následného ochlazování určitých částí stroje, výpočet byl proveden pro teplotu okolí 40°C a jmenovitý výkon stroje.



Obr. 13 Přechodný děj oteplení různých částí stroje

Z obrázku je vidět, že největších teplot dosahují tyče rotoru a jeho rotoru, jejichž teploty se téměř překrývají, následuje vzduchová mezera, vinutí statoru a jeho statoru.

## 9. Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit program pro výpočet ventilace a oteplení asynchronních strojů. Program byl vytvořen v programu Matlab a ověřen na konkrétním stroji a to asynchronním motorem 1LA7 163-4AA firmy Siemens.

Začátek práce obsahuje rešerši dostupných programů používaných pro výpočet oteplení elektrických strojů, mezi něž patří software od firem ANSYS, COMSOL a Motor Design Ltd. Software od firem ANSYS a COMSOL jsou založeny na výpočtech pomocí metody konečných prvků (MKP) nebo objemů, oproti tomu program Motor CAD od firmy Motor Design Ltd využívá k výpočtu oteplení metodu náhradní tepelné sítě, na této metodě je založen i program, který je předmětem diplomové práce.

Následují kapitoly věnované základním vztahům hydromechaniky a termomechaniky a kapitola věnovaná ventilátoru. Kapitoly o termomechanice objasňují elementární poznatky nutné pro sestavení tepelných odporů, které jsou použity v náhradní tepelné síti. Kapitoly věnované termomechanice a ventilátoru jsou podstatné pro ventilační výpočet, který předchází výpočtu tepelnému, a je nutný ke stanovení množství chladiva ve stroji.

Kapitola 7 se věnuje analyzovanému motoru, tedy motoru, který slouží pro ověření funkčnosti vytvořeného programu. V této kapitole jsou uvedeny katalogové údaje stroje týkající se jeho možných teplot, dále jsou uvedeny štítkové údaje a předpokládané rozložení ztrát.

Poslední kapitola se věnuje výsledkům výpočtu programu, z výsledků je vidět, že teploty vypočtené programem s malou tolerancí odpovídají katalogovým údajům stroje. Bohužel nebylo možné zjistit přesné teploty ostatních částí stroje.

Dále musím zmínit, že literatura, ze které jsem čerpal, bohužel neuváděla, pro jaká rozmezí Reynoldsových čísel jsou platné vztahy použité pro výpočet součinitelů přestupu tepla, a proto nelze přesně určit, pro jaké otáčivé rychlosti rotoru uvedený výpočet platí. Domnívám se, že čím více se budou otáčky rotoru blížit nule, tím víc bude výpočet nepřesný a bylo by potřeba, aby se touto problematikou někdo dále zabýval a popřípadě program vylepšil, aby výsledky platili i pro nízké otáčky rotoru.



Další problém, který se mi nepovedlo vyřešit, je problém týkající se teplot kostry a hřídele poblíž okolního vzduchu, tyto teploty vychází bohužel větší než by ve skutečnosti měli být. Mezi další věci, které by se daly vylepšit, patří přesné rozpočítání rozložení ztrát s uvažováním toho, že budou vznikat i ztráty ve ventilátoru.

## Literatura

- [1] Hak, Josef a Ošlejšek, Oldřich: Výpočet chlazení elektrických strojů 1.Díl, Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, Brno 1973
- [2] Pechánek, Roman. Ventilační a tepelná analýza trakčního asynchronního motoru, Fakulta elektrotechnická, ZČU v Plzni, Plzeň 2011
- [3] Co je to CFD. KOŇAS, Petr a Jiří ZEJDA. Ústav nauky o dřevě [online]. Brno: Ústav nauky o dřevě, 2006 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/CFD/?q=node/11>
- [4] VLASÁK, Martin. Modelování ohřevu materiálu při laserovém značení. Plzeň, 2007. Bakalářská práce. ZČU v Plzni.
- [5] ANSYS CFX. ANSYS, Inc. ANSYS [online]. 2010 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-cfx-brochure.pdf>
- [6] ANSYS Fluent. ANSYS, Inc. ANSYS [online]. 2011 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-fluent-brochure-14.0.pdf>
- [7] COMSOL Multiphysics. HUMUSOFT. Humusoft [online]. © 1991-2013 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/comsol/comsol/>
- [8] COMSOL Multiphysics. COMSOL. Comsol [online]. © 1998-2013 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.comsol.com/products/multiphysics/>
- [9] Motor-CAD. MOTOR DESIGN LTD. Motor Design Ltd [online]. © 2013 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: <http://www.motor-design.com/motorcad.php>
- [10] Richter M.: Úvod do průmyslových technologií, skripta FŽP UJEP, ISBN 80-7044-828-8, s. 300, Ústí n.L., 2006
- [11] MLÍKA, Jiří. Termomechanika I: Přepis přednášek Prof. Ing. Radima Mareše CSc. Plzeň, 23. 3. 2003, 84 s. Dostupné z: <http://www.volny.cz/jmlika/>

- [12] Mellor, P. H.; Roberts, D.R.; Turner, D.R: Lumped Parameter Thermal Model for Electrical Machines of TEFC Design, Ve sborníku konference IEEE Proceedings B, Vol.-138, No.5, Sept.1991
- [13] PYRÖNEN, J.; JOKINEN, T.; HRABOVCOVÁ, V.; Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK., 2008, ISBN: 9780470695166
- [14] ČERVENÝ, Josef. Stavba elektrických strojů [Přednášky KEV/SES2]. Plzeň: ZČU v Plzni, 2012, 136 s. [cit. 16. 4. 2013].
- [15] Určování součinitele přestupu tepla při samovolné konvekci. PowerWiki [online]. 2004 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: [www.powerwiki.cz/attach/ET1/konvekce2.doc](http://www.powerwiki.cz/attach/ET1/konvekce2.doc)
- [16] ONDRUŠKA, E., MALOUŠEK, A.: Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. Praha, SNTL, 1985
- [17] VLACH, R.: Chlazení elektrických strojů. Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, VUT Brno, 2004. ISBN 80-214-2848-1.
- [18] Program pro výpočet ventilace a oteplení synchronních strojů [online]. Brno, 2009 [cit. 2013-04-16]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15040](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15040). Diplomová práce. VUT v Brně.
- [19] HYNŠT, R.: Řešení obecné tepelné sítě elektrického stroje s oběhem chladiva. Technika elektrických strojů, roč. 14, 1969, s. 37-51. VÚES Brno.
- [20] VLACH, Radek. Tepelné procesy v mechatronických soustavách. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3976-4. Dostupné z: [www.umt.fme.vutbr.cz/~rvlach/skripta.doc](http://www.umt.fme.vutbr.cz/~rvlach/skripta.doc)

## Přílohy

### Příklady výpočtu jednotlivých odporů

Jednotlivé tepelné odpory byly vypočteny na základě vztahu

$$R = l / \lambda \cdot S$$

který platí pro přestup tepla v pevných látkách a vztahu

$$R = 1 / \alpha \cdot S$$

který platí pro přestup tepla z pevné látky do tekutiny.

#### Čela vinutí

$$R(1,2) = R_{vcela} * 1 / \xi_s$$

$$R(2,3) = R(1,2)$$

$$R(1,3) = R_{vcela} * 1 / \xi_k$$

kde

$$R_{vcela} = \frac{1}{\lambda_{cu} * (1 + \alpha_{cu} * T_{cu})} * \frac{l_{\check{c}}}{2} * \frac{1}{y_{cu}} * \frac{1}{(b_d - izol)}$$

$$\frac{1}{\xi_s} = \frac{1}{\rho} * \left( \cotgh(\rho) + \frac{1}{\sinh(\rho)} - \frac{2}{\rho} \right)$$

$$\frac{1}{\xi_k} = \frac{1}{\rho} * \frac{(\rho * \sinh(\rho) - 2 * \cosh(\rho) - 1)}{\rho - \sinh(\rho)}$$

kde

$$\rho = \sqrt{\left( \frac{1}{R(2,65)} - \varepsilon_{cu} * \left( \frac{P_{cela}}{Q} \right) \right) * R_{vcela}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\lambda_{cu}$  tepelná vodivost mědi při teplotě 0°C

$\alpha_{cu}$  teplotní součinitel vodivosti mědi

$l_{\check{c}}$  délka čela

$y_{cu}$  výška mědi v drážce (bez celkového započtení izolace)

---

$b_d$	tloušťka drážky statoru
$izol$	celková tloušťka izolace v drážce (na šířku drážky)
$\varepsilon_{cu}$	teplotní součinitel ztrát mědi
$P_{cela}$	celkové ztráty ve všech čelech statoru
$Q$	počet drážek statoru

### Čelo-vzduch

$$R(2,65) = \frac{1}{\lambda_{izolč}} * \frac{1}{(1 + \alpha_{izolč} * T_{čelo-vzduch})} * \frac{izolč}{2 * O * \frac{l_č}{2}} + \frac{1}{\alpha_č} * \frac{1}{k_č * 2 * O * \frac{l_č}{2}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\lambda_{izolč}$	teplená vodivost izolace čela při 0°C
$\alpha_{izolč}$	teplotní součinitel izolace čela
$T_{čelo-vzduch}$	průměr teplot čela a vzduchu u čela
$izolč$	tloušťka izolace čela
$O$	obvod čela
$\alpha_č$	součinitel přestupu tepla čelo vzduch
$k_č$	činitel zakrytí čel

### Vinutí statoru

$$R(3,4) = 1/\xi_s * Rvmedis$$

$$R(3,5) = 1/\xi_k * Rvmedis$$

$$R(4,5) = R(3,4)$$

Kde koeficienty  $\xi_s$  a  $\xi_k$  se vypočtou obdobně jako v předešlém případě

$$\frac{1}{\xi_s} = \frac{1}{\rho} * (\cotgh(\rho) + \frac{1}{\sinh(\rho)} - \frac{2}{\rho})$$

$$\frac{1}{\xi_k} = \frac{1}{\rho} * \frac{(\rho * \sinh(\rho) - 2 * \cosh(\rho) - 1)}{\rho - \sinh(\rho)}$$

Pro součinitel  $\rho$  platí v tomto případě

---

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{R(4,66)} + \frac{1}{R(4,16)} - \varepsilon_{cu} * \left(\frac{P_{cu}}{Q * elmt}\right) * Rvmedis}$$

$$Rvmedis = \frac{1}{\lambda_{cu}} * \frac{1}{(1 + \alpha_{cu} * T_{cu})} * \frac{l_{elmt}}{S_{cu}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$P_{cu}$  ztráty ve všech drážkách statoru

$elmt$  počet elementů, na které je na délku rozdělen stator a rotor

$l_{elmt}$  délka elementu statoru nebo rotoru

$S_{cu}$  průřez mědi

### Odpor mezi vinutím statoru a jhem statoru

$$R(4,16) = \frac{1}{\lambda_{cu} * (1 + \alpha_{cu} * T_{cu})} * \frac{\frac{y_{cu}}{2}}{l_{elmt}} * \frac{1}{(b_d - izol)} + \frac{1}{\alpha_{jhoizol}}$$

$$* \frac{1}{b_d * l_{elmt}} * \frac{1}{k_{izol}} + \frac{1}{\lambda_{izol}} * \frac{1}{(1 + \alpha_{izol} * (T_{izol}))}$$

$$* \frac{\frac{y_{izol}}{2}}{l_{elmt} * (b_d - izol)} + \frac{1}{\lambda_{Fe}} * \frac{1}{(1 + \alpha_{Fe} * T)} * \frac{y}{l_{elmt} * k_{izol}}$$

$$* \frac{1}{\frac{2 * pi(yz)}{Q}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$y_{medi}$  tloušťka mědi v drážce (na výšku drážky)

$\alpha_{jhoizol}$  součinitel přestupu (prostupu) tepla mezi jhem a izolací mědi v drážce

$k_{izol}$  koeficient uvažující izolaci mezi plechy statoru

$\lambda_{izol}$  tepelná vodivost izolace vinutí při 0°C

$\alpha_{izol}$  teplotní součinitel izolace vinutí

$y_{izol}$  celková tloušťka izolace v drážce (na výšku drážky)

$\lambda_{Fe}$  tepelná vodivost plechů statoru při 0°C

$\alpha_{Fe}$  teplotní součinitel vodivosti plechů statoru

$y$  vzdálenost mezi izolací vinutí statoru a polovinou výšky jha statoru

$yz$  vzdálenost od osy stroje do jedné čtvrtiny výšky jha (bez zubu)

---

**Odpor mezi vinutím statoru a vzduchovou mezerou**

$$R(4,66) = \frac{1}{\lambda_{cu} * (1 + \alpha_{cu} * T_{cu})} * \frac{\frac{y_{cu}}{2}}{l_{elmt} * (b_d - izol)}$$

$$+ \frac{1}{\lambda_{izol} * (1 + \alpha_{izol} * (T_{izol}))} * \frac{\frac{y_{izol}}{2}}{l_{elmt} * b_d} + \frac{1}{\alpha_{sdelta}}$$

$$* \frac{1}{l_{elmt} * b_d}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\alpha_{sdelta}$  součinitel přestupu tepla mezi statorem a vzduchovou mezerou

**Odpor mezi vinutím statoru a zubem statoru**

$$R(4,71) = \frac{1}{\frac{1}{R(\text{půl drážky, půl zubu})} + \frac{1}{R(\text{půl drážky, půl zubu})}}$$

$$= \frac{R(\text{půl drážky, půl zubu})}{2}$$

$R(\text{půl drážky, půl zubu})$

$$= \frac{1}{\lambda_{cu} * (1 + \alpha_{cu} * T_{cu})} * \frac{\frac{(b_d - izol)}{2}}{y_{medi} * l_{elmt}} + \frac{1}{\alpha_{zubizol}}$$

$$* \frac{1}{h_d * l_{elmt} * k_{izol}} + \frac{1}{\lambda_{izol} * (1 + \alpha_{izol} * (T_{izol}))} * \frac{\frac{izol}{2}}{l_{elmt} * h_d}$$

$$+ \frac{1}{\lambda_{Fe} * (1 + \alpha_{Fe} * T)} * \frac{\frac{b_z}{2}}{l_{elmt} * h_d}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\alpha_{zubizol}$  součinitel přestupu tepla mezi zubem a izolací vodičů statoru

$h_d$  hloubka drážky statoru

$b_z$  tloušťka zubu v polovině výšky

**Odpor mezi jhem statoru a kostrou**

$$R(16,21) = \frac{1}{\alpha_{jhokostra}} * \frac{1}{\frac{2 * \pi * (r_{stroje} - t_k)}{Q} * l_{elmt} * k_{izol}}$$

$$+ \frac{1}{\lambda_{Fe} * (1 + \alpha_{Fe} * T)} * \frac{y}{\frac{2 * \pi * z}{Q} * l_{elmt} * k_{izol}}$$

$$+ \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{\frac{t_k}{2}}{\frac{2 * \pi * r_{stroje}}{Q} * l_{elmt}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

- $\alpha_{jhokostra}$  součinitel přestupu (prostupu) tepla přes jho statoru do kostry  
 $r_{stroje}$  celkový poloměr stroje (osa-kostra)  
 $t_k$  tloušťka kostry  
 $z$  poloměr sahající do  $\frac{3}{4}$  výšky jha (od osy stroje)  
 $\lambda_{kostra}$  tepelná vodivost kostry při 0°C  
 $\alpha_{kostry}$  teplotní součinitel vodivosti kostry

**Odpor mezi jhem statoru a zubem statoru**

$$R(16,71) = \frac{1}{\lambda_{Fe} * (1 + \alpha_{Fe} * T)} * \frac{y}{\frac{2 * \pi * x}{Q} * l_{elmt} * k_{izol}}$$

$$+ \frac{1}{\lambda_{Fe} * (1 + \alpha_{Fe} * T)} * \frac{\frac{h_d}{2}}{\frac{2 * \pi * w}{Q} - b_d}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

- $x$  poloměr sahající do  $\frac{1}{4}$  výšky jha (od osy stroje)  
 $w$  poloměr sahající do  $\frac{3}{4}$  zuby (od osy stroje)



### Odpor kostra-kostra

$$R(21,22) = \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{l_{elmt}}{\frac{\text{celkový průřez kostry}}{\text{počet drážek statoru}}}$$

Odpor mezi kostrou a štítem

$$R(21,64) = \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{r_{stroje} - r_{rotoru}}{\frac{2 * \pi * r_{stroje} - 2 * \pi * r_{rotoru}}{2} * t_k} + \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{l_{šk} + l_{elmt}/2}{\frac{S_{kostra}}{Q}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$r_{rotoru}$	poloměr rotoru
$l_{šk}$	vzdálenost štítu od jha statoru
$S_{kostra}$	průřez kostry

### Odpor mezi kostrou a vzduchem nad strojem

$$R(21,76) = \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{\frac{t_k}{2}}{\frac{2 * \pi * r_{stroje}}{Q} * l_{elmt}} + \frac{1}{\alpha_{kch}} * \frac{1}{Q * l_{elmt}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\alpha_{kch}$	součinitel přestupu tepla z kostry do chladiva
----------------	--

Odpor hřídel-hřídel

$$R(26,27) = \frac{1}{\lambda_{hridele} * (1 + \alpha_{hridele} * T)} * \frac{\text{délka uvažovaného úseku}}{\frac{\pi * r_{hridele}^2}{Q}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\lambda_{hridele}$	teplená vodivost hřídele při 0°C
$\alpha_{hridele}$	teplotní součinitel vodivosti hřídele
$r_{hridele}$	poloměr hřídele

---

**Odpor mezi hřídelí a ložiskem**

$$R(26,36) = \frac{1}{\lambda_{hridele} * (1 + \alpha_{hridele} * T)} * \frac{r_{hridele}}{2 * \pi * \frac{r_{hridele}}{2} * l_{26}} + \frac{1}{\alpha_{lh}}$$

$$* \frac{1}{\frac{2 * \pi * r_{hridele}}{Q}} + \frac{1}{\lambda_{loziska} * (1 + \alpha_{loziska} * T)}$$

$$* \frac{\frac{r_{loziska} - r_{hridele}}{2}}{t_{loziska} * \frac{2 * \pi * r_{1/4loziska}}{Q}}$$

Kde

$$r_{1/4loziska} = r_{hridele} + 0,25 * (r_{loziska} - r_{hridele})$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

- $l_{26}$  délka úseku 26 (část hřídele)
- $\alpha_{lh}$  součinitel přestupu (prostupu) tepla mezi hřídelí a ložiskem
- $\lambda_{loziska}$  měrná tepelná vodivost ložiska
- $\alpha_{loziska}$  součinitel měrné tepelné vodivosti ložiska
- $r_{loziska}$  vnější poloměr ložiska
- $t_{loziska}$  tloušťka ložiska

**Odpor hřídel – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem**

$$R(27,65) = \frac{1}{\lambda_{hridele} * (1 + \alpha_{hridele} * T)} * \frac{r_{hridele}}{2 * \pi * \frac{r_{hridele}}{2} * l_{šk}} + \frac{1}{\alpha_{hv}}$$

$$* \frac{1}{\frac{2 * \pi * r_{hridele}}{Q} * l_{šk}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

- $\alpha_{hv}$  součinitel přestupu tepla mezi hřídelí a vzduchem

### Odpor mezi hřídelí a jhem rotoru

$$R(28,37) = \frac{1}{\lambda_r * (1 + \alpha_r * T)} * \frac{\frac{j_r}{2}}{2 * \pi * \left(r_{hridele} + \frac{j_r}{4}\right) * l_{elmt} * k_{izolr}} + \frac{1}{\alpha_{hjr}}$$

$$* \frac{1}{\frac{2 * \pi * r_{hridele}}{Q} * l_{elmt} * k_{izolr}} + \frac{1}{\lambda_{hridele} * (1 + \alpha_{hridele} * T)}$$

$$* \frac{r_{hridele}}{2 * \pi * \frac{r_{hridele}}{2} * l_{elmt}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\lambda_r$  měrná tepelná vodivost jha rotoru při 0°C

$\alpha_r$  teplotní součinitel měrné tepelné vodivosti jha rotoru

$j_r$  jho rotoru (vzdálenost od hřídele k vodičům rotoru)

$k_{izolr}$  koeficient uvažující izolaci mezi plechy rotoru

$\alpha_{hjr}$  součinitel přestupu (prostupu) tepla z hřídele do jha rotoru

### Odpor ložisko-štít

$$R(36,64) = \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{r_{rotoru} - r_{ložiska}}{2 * \pi * \frac{r_{rotoru} + r_{ložiska}}{2} * t_k} + \frac{1}{\alpha_{lk}}$$

$$* \frac{1}{\frac{2 * \pi * r_{ložiska} * t_k}{Q}} + \frac{1}{\lambda_{ložiska} * (1 + \alpha_{ložiska} * T)}$$

$$* \frac{\frac{r_{ložiska} - r_{hridele}}{2}}{t_{ložiska} * \frac{\pi * (r_{ložiska} * 1,5 + r_{hridele} * 0,5)}{Q}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\alpha_{lk}$  součinitel prostupu tepla z ložiska do kostry

Odpor ložisko – vzduch mezi štítem, statorem a rotorem

$$R(36,65) = \frac{1}{\alpha_{lv}} * \frac{1}{\pi * \frac{r_{ložiska}^2 - r_{hridele}^2}{Q}} + \frac{1}{\lambda_{ložiska} * (1 + \alpha_{ložiska} * T)}$$

$$* \frac{\frac{t_{ložiska}}{2}}{\pi * \frac{r_{ložiska}^2 - r_{hridele}^2}{Q}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\alpha_{lv}$  součinitel přestupu tepla z ložiska do vzduchu

### Odpor jho rotoru-tyč rotoru

$$R(37,52) = \frac{1}{\lambda_r * (1 + \alpha_r * T)} * \frac{\frac{j_r}{2}}{k_{izotr} * l_{elmt} * \frac{2 * \pi * (r_{hridele} + 0,75 * j_r)}{Q}}$$

$$+ \frac{1}{\lambda_{al} * (1 + \alpha_{al} * T)} * \frac{\frac{h_{al}}{2}}{l_{elmt} * b_{al} * \frac{Q_r}{Q}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\lambda_{al}$  měrná tepelná vodivost hliníku při 0°C (tyče rotoru)

$\alpha_{al}$  teplotní součinitel měrné tepelné vodivosti hliníku

$h_{al}$  hloubka drážky rotoru

$b_{al}$  šířka drážky rotoru

$Q_r$  počet drážek rotoru

### Odpor jho rotoru- zub rotoru

$$R(37,53) = \frac{1}{\lambda_r * (1 + \alpha_r * T)} * \frac{\frac{j_r}{2}}{k_{izotr} * l_{elmt} * \frac{2 * \pi * (r_{hridele} + 0,75 * j_r)}{Q}}$$

$$+ \frac{1}{\lambda_r * (1 + \alpha_r * T)} * \frac{\frac{h_{al}}{2}}{k_{izotr} * l_{elmt} * mezivypocet}$$

kde

$$mezivypocet = \frac{2 * \pi * (r_{hridele} + j_r + h_{al} * 0,25) - b_{al} * Q_r}{Q}$$

### Kruhy rotoru

$$R(43,51) = Rvkruhu * 1/\xi_s$$

$$R(44,51) = R(43,51)$$

$$R(43,44) = Rvkruhu * 1/\xi_k$$

kde

$$Rvkruhu = \frac{1}{\lambda_{al} * (1 + \alpha_{al} * T)} * \frac{t_{kruhu}}{\pi * ((r_{rotoru} - nad_{al})^2 - (r_{hridele} + j_r)^2) / Q}$$

$$\frac{1}{\xi_s} = \frac{1}{\rho} * (\cotgh(\rho) + \frac{1}{\sinh(\rho)} - \frac{2}{\rho})$$

$$\frac{1}{\xi_k} = \frac{1}{\rho} * \frac{(\rho * \sinh(\rho) - 2 * \cosh(\rho) - 1)}{\rho - \sinh(\rho)}$$

kde

$$\rho = \sqrt{\left( \frac{1}{RA} + \frac{1}{RB} + \frac{1}{RC} - \varepsilon_{al} * \left( \frac{P_{kruhy}}{Q} \right) \right) * Rvkruhu}$$

kde

$$RA = \frac{1}{\alpha_{kv}} * \frac{1}{2 * \pi * (r_{rotoru} - nad_{al}) / Q * t_{kruhu}}$$

$$RB = \frac{1}{\alpha_{kv}} * \frac{1}{2 * \pi * (r_{hridele} + j_r) / Q * t_{kruhu}}$$

$$RC = \frac{1}{\alpha_{kv}} * \frac{1}{\pi * ((r_{rotoru} - nad_{al})^2 - (r_{hridele} + j_r)^2) / Q}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$t_{kruhu}$	tloušťka kruhu
$nad_{al}$	železo, které je mezi vodičem (tyčí) rotoru a vzduchovou mezerou
$\varepsilon_{al}$	teplotní součinitel ztrát hliníku
$P_{kruhy}$	celkové ztráty v kruzích rotoru
$\alpha_{kv}$	součinitel přestupu tepla z kruhu rotoru do vzduchu

---

### Tyč rotoru

$$R(44,52) = 1/\xi_s * Rval$$

$$R(44,45) = 1/\xi_k * Rval$$

$$R(45,52) = R(44,52)$$

Kde koeficienty  $\xi_s$  a  $\xi_k$  se vypočtou obdobně jako v předešlém případě

$$\frac{1}{\xi_s} = \frac{1}{\rho} * \left( \cotgh(\rho) + \frac{1}{\sinh(\rho)} - \frac{2}{\rho} \right)$$

$$\frac{1}{\xi_k} = \frac{1}{\rho} * \frac{(\rho * \sinh(\rho) - 2 * \cosh(\rho) - 1)}{\rho - \sinh(\rho)}$$

Pro součinitel  $\rho$  platí v tomto případě

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{R(37,52)} + \frac{1}{R(52,66)} - \varepsilon_{al} * \left( \frac{P_{al}}{Q * elmt} \right) * Rval}$$

kde

$$Rval = \frac{1}{\lambda_{al}} * \frac{1}{(1 + \alpha_{al} * T)} * \frac{l_{elmt}}{S_{al}}$$

Kde  $P_{al}$  jsou ztráty v tyčích rotoru a  $S_{al}$  je průřez tyče rotoru, tedy výška drážky vynásobena šířkou drážky přepočtenou na stator.

### Odpor mezi tyčí rotoru a zubem rotoru

$$R(52,53) = 1/2 * R(zub, tyč)$$

$$R(zub, tyč) = \frac{1}{\lambda_r * (1 + \alpha_r * T)} * \frac{\frac{zub_{1/2}}{2}}{h_{al} * l_{elmt}} + \frac{1}{\lambda_{al} * (1 + \alpha_{al} * T)} * \frac{\frac{b_{al}}{2} * \frac{Q_r}{Q}}{l_{elmt} * h_{al}}$$

kde

$$zub_{1/2} = \frac{2 * \pi * \left( r_{hridete} + j_r + \frac{h_{al}}{2} \right) - Q_r * b_{al}}{Q}$$

Jedná se o tloušťku zubu rotoru v polovině zubu a přepočtenou na stator.

---

**Odpor mezi tyčí rotoru a vzduchovou mezerou**

$$R(52,66) = \frac{1}{\lambda_{al}} * \frac{1}{(1 + \alpha_{al} * T)} * \frac{\frac{h_{al}}{2}}{b_{al} * l_{elmt} * \frac{Q_r}{Q}} + \frac{1}{\alpha_{rdelta}}$$

$$* \frac{1}{l_{elmt} * k_{izolr} * \frac{2 * \pi * r_{rotoru}}{Q}} + \frac{1}{\lambda_r * (1 + \alpha_r * T)}$$

$$* \frac{nad_{al}}{k_{izolr} * l_{elmt} * \frac{2 * \pi * r_{rotoru}}{Q}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\alpha_{rdelta}$  součinitel přestupu tepla z rotoru do vzduchové mezery

**Odpor mezi zubem rotoru a vzduchovou mezerou**

$$R(53,66) = \frac{1}{\lambda_r * (1 + \alpha_r * T)}$$

$$* \frac{\frac{h_{al}}{2}}{k_{izolr} * l_{elmt} * \frac{2 * \pi * (r_{hridle} + j_r + h_{al} * 0,75) - Q_r b_{al}}{Q}}$$

$$+ \frac{1}{\lambda_r * (1 + \alpha_r * T)} * \frac{nad_{al}}{l_{elmt} * k_{izolr} * \frac{2 * \pi * r_{rotoru}}{Q}} + \frac{1}{\alpha_{rdelta}}$$

$$* \frac{1}{l_{elmt} * k_{izolr} * \frac{2 * \pi * r_{rotoru}}{Q}}$$

**Odpor mezi štítem a vzduchem mezi štítem, statorem a rotorem**

$$R(64,65) = \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{\frac{t_k}{2}}{S_{stit1}} + \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)}$$

$$* \frac{\frac{t_k}{2}}{S_{stit2}} + \frac{1}{\alpha_{stitv}} * \frac{1}{S_{stit1} + S_{stit2}}$$

Kde

$$\alpha_{stit1} = \frac{\pi * (r_{stroje}^2 - r_{hridel}^2)}{Q}$$

$$\alpha_{stit2} = \frac{\pi * r_{stroje}^2}{Q} * l_{šk}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\alpha_{stitv}$  součinitel přestupu tepla ze štítu do vzduchu ve stroji

### Odpor mezi vzduchovou mezerou a zubem statoru

$$R(66,71) = \frac{1}{\lambda_{Fe} * (1 + \alpha_{Fe} * T)} * \frac{\frac{h_d}{2}}{l_{elmt} * k_{izol} * zubs_{\frac{1}{4}}} + \frac{1}{\alpha_{sdelta}} * \frac{1}{k_{izotr} * zub_{dole}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$zub_{dole}$  jedná se o spodní tloušťku zubu statoru

$zubs_{1/4}$  jedná se o tloušťku zubu statoru v jedné čtvrtině výšky

### Hřidel-okolní vzduch

$$Rp(26) = \frac{1}{\lambda_{hridele} * (1 + \alpha_{hridele} * T)} * \frac{r_{hridele}}{2 * \pi * \frac{r_{hridele}}{2} * l_1} + \frac{1}{\alpha_{hv}} * \frac{1}{\frac{2 * \pi * r_{hridele}}{Q} * (l_1 - t_{ložiska})}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$l_1$  délka elementu 26 viz tepelná síť stroje

### Ložisko-okolní vzduch

$$Rp(36) = \frac{1}{\alpha_{lo}} * \frac{1}{\frac{\pi * (r_{ložiska}^2 - r_{hridele}^2)}{Q}} + \frac{1}{\lambda_{ložiska} * (1 + \alpha_{ložiska} * T)} * \frac{\frac{t_{ložiska}}{2}}{\frac{\pi * (r_{ložiska}^2 - r_{hridele}^2)}{Q}}$$

Veličiny vystupující ve výrazech:

$\alpha_{lo}$  součinitel přestupu tepla z ložiska do okolního vzduchu

---



**Štít-okolní vzduch**

$$Rp(64) = \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{\frac{t_k}{2}}{S_{stit1}} + \frac{1}{\lambda_{kostra} * (1 + \alpha_{kostry} * T)} * \frac{\frac{t_k}{2}}{S_{stit2}} + \frac{1}{\alpha_{stito}} * \frac{1}{S_{stit1} + S_{stit2}}$$

Kde  $\alpha_{stito}$  je součinitel přestupu tepla ze štítu do okolního vzduchu.