

# 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

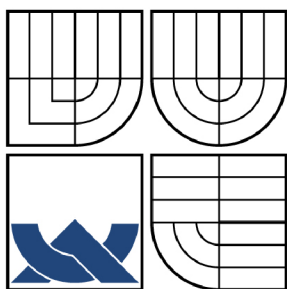
MĚŘICÍ STANOVISŤE PRO OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ROTAČNÍ  
TEPELNÉ TRUBICE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN LIŠKA

BRNO 2009



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

## MĚŘICÍ STANOVIŠTĚ PRO OVĚŘOVÁNÍ VLASTNOSTÍ ROTAČNÍ TEPELNÉ TRUBICE

EXPERIMENTAL STAND FOR ROTATIONAL HEAT PIPE VERIFICATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN LIŠKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADEK VLACH, Ph.D.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2008/09

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Liška Martin

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Měřicí stanoviště pro ověřování vlastností rotační tepelné trubice**

v anglickém jazyce:

### **Experimental stand for rotational heat pipe verification**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem je navrhnout experimentální pracoviště včetně sensoriky, na kterém by bylo možné ověřit funkci rotační tepelné trubice.

Cíle bakalářské práce:

- literární studie
- návrh experimentálního stanoviště
- ověřovací měření

Seznam odborné literatury:

- [1] Hak, J. , Ošlejšek, O. : Výpočet chlazení elektrických strojů , 1.díl. VUES Brno 1973
- [2] Ondruška, E. , Maloušek, A. : Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých. SNTL Praha 1985

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/09.

V Brně, dne



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu



doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

# LICENČNÍ SMLOUVA

## POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

### 1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Martin Liška  
Bytem: Klostermannova 131 Štěkeň 38751  
Narozen/a (datum a místo): 6.4.1984 ve Strakonících

(dále jen „autor“)

a

### 2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství  
se sídlem Technická 2896/2, 61669 FSI VUT v Brně  
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:  
doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.

(dále jen „nabyvatel“)

### Čl. 1

#### Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
  - diplomová práce
  - bakalářská práce
  - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Měřicí stanoviště pro ověřování vlastností rotační tepelné trubice

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Radek Vlach, Ph.D.

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Datum obhajoby VŠKP: .....

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v\*:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů .....

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.

3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.

---

\* hodící se zaškrtněte

4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

## **Článek 2**

### **Udělení licenčního oprávnění**

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
  - ihned po uzavření této smlouvy
  - 1 rok po uzavření této smlouvy
  - 3 roky po uzavření této smlouvy
  - 5 let po uzavření této smlouvy
  - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

## **Článek 3**

### **Závěrečná ustanovení**

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: .....

.....  
Nabyvatel

.....  
Autor

## **ANOTACE**

Bakalářská práce se zabývá chlazením elektrických strojů pomocí rotační tepelné trubice a především návrhem a konstrukcí experimentálního stanoviště, který představuje rotační tepelnou trubici skutečného rotoru stroje. Trubice je ohřívána pomocí vinutí z odporového vodiče a střední teplota povrchu trubice je snímána paralelním přídatným vinutím. Stanoviště bylo navrženo pro ověření vlastností rotační tepelné trubice a experimentům při změně některých parametrů trubice.

## **ANNOTATION**

This bachelor thesis presents a design of an experimental stand for testing of cooling effects on electrical machines through rotational heat pipe and mainly with design and construction of experimental stand, that represents rotational heat pipe of real machine rotor. Pipe is heated by means of resistance conductor winding and average temperature on a pipe surface is scanned with an additional parallel winding. Experimental stand was designed for subsequent experiments and for evaluating of rotational heat pipe parameters.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli svůj čas a svými cennými radami přispěli k vypracování této bakalářské práce. Především pak, vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Radku Vlachovi, Ph.D.

Dále bych rád poděkoval svým rodičům a prarodičům, kteří mě po celou dobu studia podporovali.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně a pod vedením mého vedoucího bakalářské práce, s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 25.5.2009

Martin Liška

.....

## Obsah

1	Úvod.....	6
2	Tepelná trubice.....	7
2.1	Rotační tepelná trubice.....	7
2.1.1	Vlastnosti rotační tepelné trubice.....	7
2.2	Konstrukční řešení a měření konkrétních typů elektromotorů.....	8
3	Návrh měřicího stanoviště.....	10
3.1	Využití grafického prostředí Autodesk Inventor.....	10
3.2	Volba trubice.....	10
3.3	Elektromotor.....	10
3.4	Volba rotačního upevnění trubice.....	11
3.5	Výroba chladiče.....	11
3.6	Výroba plastových redukcí.....	13
3.7	Výroba kartáčů.....	13
3.8	Návrh topného a měřicího vinutí.....	14
3.9	Možnosti modifikace.....	15
4	Experimentální měření.....	16
4.1	Vliv kartáčů na snímání teploty.....	16
4.2	Odečítání teploty na měřicím stanovišti.....	17
4.3	Rozložení teplot po délce trubice.....	18
4.4	Ověření závislosti odporu měřicího vinutí na teplotě.....	18
4.5	Ověření vlivu izolace a rotace.....	18
4.6	Závislost proudu na teplotě.....	20
5	Závěr.....	21
6	Seznam použité literatury.....	22
7	Přílohy.....	23

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$\vartheta$	teplota povrchu trubice	[°C]
$\vartheta_0$	výchozí teplota povrchu trubice	[°C]
$R_{\vartheta}$	odpor měřícího vinutí při teplotě $\vartheta$	[ $\Omega$ ]
$R_0$	odpor měřícího vinutí při teplotě $\vartheta_0$	[ $\Omega$ ]
$\alpha_0$	teplotní součinitel pro teplotu $\vartheta_0$	[K <sup>-1</sup> ]
t	čas	[min]

## 1 ÚVOD

V dnešní době je chlazení elektrických strojů a zařízení téměř nutností a proto efektivní odvod tepla do okolního prostředí má nemalý vliv na jejich konstrukční řešení. Účinným chlazením elektrických strojů, mohou být významným způsobem ovlivněny jejich vlastnosti, jako například zvýšení jejich účinnosti, prodloužení životnosti stroje nebo také objemová kompaktnost elektromotoru. Tyto vlastnosti jsou zapotřebí ve většině moderních aplikací a s tím spojený potřebný vývoj v těchto oblastech.

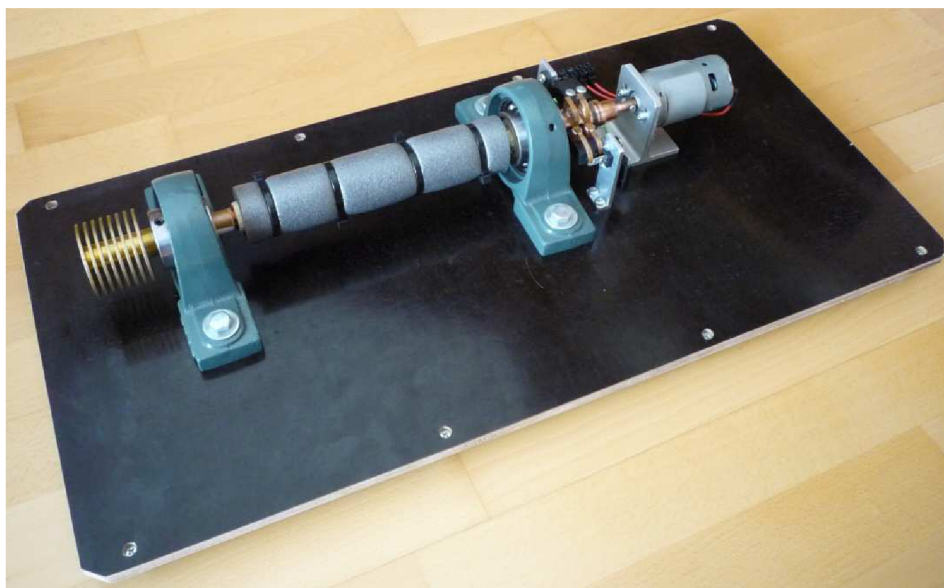
V minulosti nebyl na toto kladen důraz, a proto nebylo zapotřebí nuceného odvodu tepla a tepelné ztráty se odváděly přestupem tepla mezi jednotlivými částmi elektromotoru a následným přirozeným sáláním do okolního prostředí.

Tepelné ztráty v elektrických strojích vznikají při přeměně elektrické energie na energii mechanickou a jsou tvořeny mechanickými ztrátami (třením v ložiscích a ventilacích), ztrátami v magnetickém obvodu (hysterezními v důsledku střídavé magnetizace, vířivými proudy), ztrátami ve vinutí (průchodem elektrického proudu vinutím) a dalšími méně významnými ztrátami.

Nucený odvod tepla je možný několika způsoby. Nejrozšířenější způsob je chlazení prouděním vzduchu okolo vnější části statoru nebo vzduch protéká ve ventilačních kanálech a chlazené je více částí motoru. Dalším způsobem je chlazení kapalinou, jako například vodou a chlazené mohou být různé části stroje.

Méně používaným způsobem chlazení je například použití tepelných trubice. Tepelné trubice se používají pro chlazení jak statoru, tak rotoru stroje. Pokud je chlazen stator trubice jsou vloženy přímo mezi statorové vinutí. U rotoru je vytvoření trubice konstrukčně jednodušší a je tvořena vyvrtáním otvoru osou hřídele a na jejím konci opatřena chladičem, který odvedené teplo předává do okolí. Právě konstrukční a výrobní jednoduchost jsou předností tohoto řešení a tento způsob je velmi efektivním při odvodu tepla z rotoru stroje.

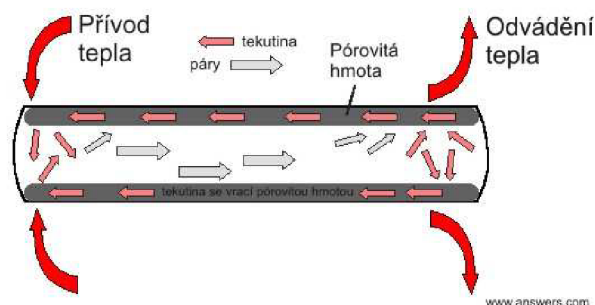
Experimentální přípravek představuje rotační tepelnou trubicí, u které je chladič vyroben s kuželovým otvorem pro nucené vytlačování zkondenzované kapaliny na chladiči zpět do trubice.



Obr. 1.1.: Měřící stanoviště

## 2 TEPELNÁ TRUBICE

Tepelná trubice dokáže přenést velké množství tepla při zachování malého teplotního spádu a je vlastně přenašeč tepla z místa jeho zdroje na chladič. Trubice je hermeticky uzavřená a naplněna pracovní látkou, kterou může být voda, metanol nebo jiné kapaliny. Trubice obsahuje část, kde dochází k odpařování, část, kde tekutina opět kondenzuje a mezi nimi dochází k přenosu odpařené látky. Vnitřní stěny trubice jsou zpravidla upraveny, aby mohlo probíhat vztlínání kapaliny po stěnách a to např. pórovitou strukturou, drážkováním nebo vložením sítě. Princip tepelné trubice je znázorněn na obrázku *Obr.2.1*. Kapalina se uvnitř trubice u zdroje tepla odpařuje a páry proudí k části s chladičem, kde se ochlazují a kondenzují zpět do kapalného stavu. Tato kapalina vztlíná zpět a proces se opakuje [2].



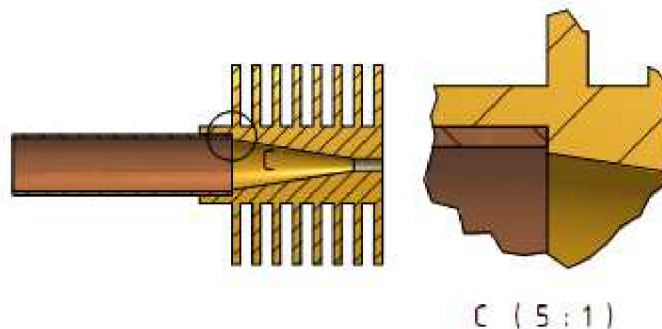
*Obr.2.1.: Princip tepelné trubice*

### 2.1 Rotační tepelná trubice

Rotační tepelná trubice v hřídeli je efektivním řešením pro odvod tepla vzniklého ztrátami v rotoru a značně zvyšují jeho tepelnou vodivost. Využitím toho způsobu chlazení dokážeme velkou část těchto ztrát přenést prostřednictvím chladicí kapaliny na kondenzační chladič a následně předat okolnímu prostředí a proto tento způsob odvodu tepla je vhodný především u strojů uzavřené konstrukce. Takto provedenými motory, které nemají konstrukčně řešený odvod tepla z rotoru, se teplo odvádí pouze vedením hřídelí, přestupem tepla na další části elektromotoru nebo vířením vzduchu okolo rotoru samotnou rotací. Z toho důvodu často rotor elektromotoru představuje část stroje, která je nejvíce tepelně zatížena.

#### 2.1.1 Vlastnosti rotační tepelné trubice

Vlastnosti rotační tepelné trubice v první řadě ovlivňuje tvar a konstrukce chladiče. Množství tepla předané chladiči závisí na odvodu tepla z kondenzační plochy, tedy na materiálu chladiče, velikosti povrchu, kterým je teplo přenášeno na žebra chladiče, vrstvě kondenzátu a oteplení samotné kondenzační plochy a jejím tvaru. Dále je zapotřebí, aby spojení mezi trubicí a chladičem nebránilo proudění kapaliny z kuželové plochy zpět do trubice. Přechod musí být hladký nebo spíše průměr kužele menší oproti trubicí, jak můžeme vidět na *Obr 2.2*.



Obr 2.2.: Spojení chladič – trubice

Vlastnosti trubice jsou závislé také na pracovní kapalině, především na její termofyzikálních vlastnostech a množství pracovní látky. Trubice má být naplněna pouze nezbytně nutným množstvím kapaliny pro přenos odpovídajícího tepelného toku. Pokud se termofyzikální vlastnosti kapaliny snižují, je zapotřebí jejího většího množství, pro přenesení stejného tepelného toku. Potřebné množství látky se zmenšuje, čím vyšší jsou otáčky a naopak se zvětšuje, pokud přenášený tepelný tok narůstá. Rotační tepelná trubice neobsahuje žádnou specifickou úpravu vnitřních stěn, naopak stěny trubice by měly být hladké, aby nebyl kladen odpor proudění teplotonosné látky.

Chování kondenzátu uvnitř trubice můžeme rozdělit na dva případy:

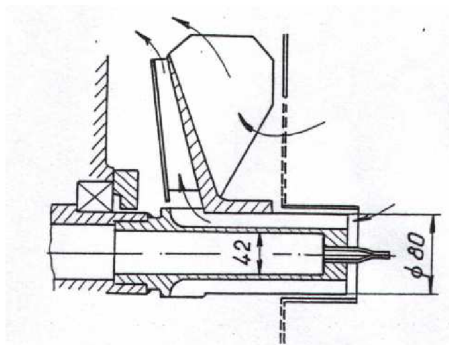
- Kondenzát tvoří stružku v dolní části trubice (<51 ot/min)
- Kondenzát tvoří film na stěnách trubice při vyšších otáčkách

V prvním případě přenos tepla je prostřednictvím časově nestálého bublinkového varu a v druhém případě se vytvoří film na stěnách trubice, přenos tepla se stabilizuje a odvod tepla dosahuje maximální hodnoty. Takové chování látky trvá až do mezních otáček a pokud se otáčky ještě více zvětšují, začne se tloušťka filmu zvětšovat a tím dojde ke zmenšování tepelného toku. Tento jev trvá, až do situace kdy odstředivá síla vytvoří konstantní vrstvu kondenzátu po vnitřním povrchu trubice. Mezní otáčky lze zvýšit, pokud do výparné části umístíme síťku. V důsledku toho, ale dojde k nárůstu tloušťky filmu a tím ke zhoršení přenosu tepla.

Pro výpočet elektrického stroje s tepelnou trubicí v hřídeli, používáme metodu tepelné sítě, stejně jako u stroje bez trubice s tím rozdílem, že mezi větve tepelných odporů je ještě zařazena větev pro tepelnou trubicí.

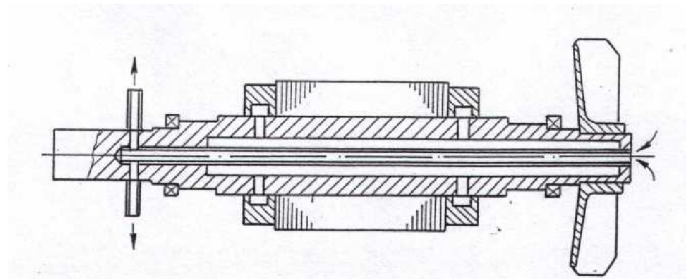
## 2.2 Konstrukční řešení a měření konkrétních typů elektromotorů

Měřením zkušebních vzorků, které popisuje zpráva [1], byl zjištěn vliv tepelné trubice na chlazení těchto vzorků. Chladiče na kondenzačním konci trubice jsou zpravidla řešena jednodušší konstrukcí ve formě radiátoru, který je ofukován samotnou rotací radiátoru nebo je ochlazován přidavným ventilátorem. Jako další řešení je odvod tepla přes ventilátor na hřídeli viz. Obr. 2.3. Takovéto řešení dosahuje o 25% lepšího účinku, nežli radiátor s ventilátorem.



Obr. 2.3.: Kondenzační ústrojí motoru 4A 180 M4

U konstrukce motoru na Obr. 2.4 jsou použity kondenzační komůrky v kruzích nakrátko, které jsou spojeny s tepelnou trubicí pomocí kanálků. Dalším způsobem, jak zvýšit odvod tepla, je použití kondenzační trubky umístěné středem tepelné trubice, teplo se tak odvádí prouděním vzduchu uvnitř. Tento způsob je schopen odvést 350W a snížit teplotu u rotoru o 40% a statoru 24%.

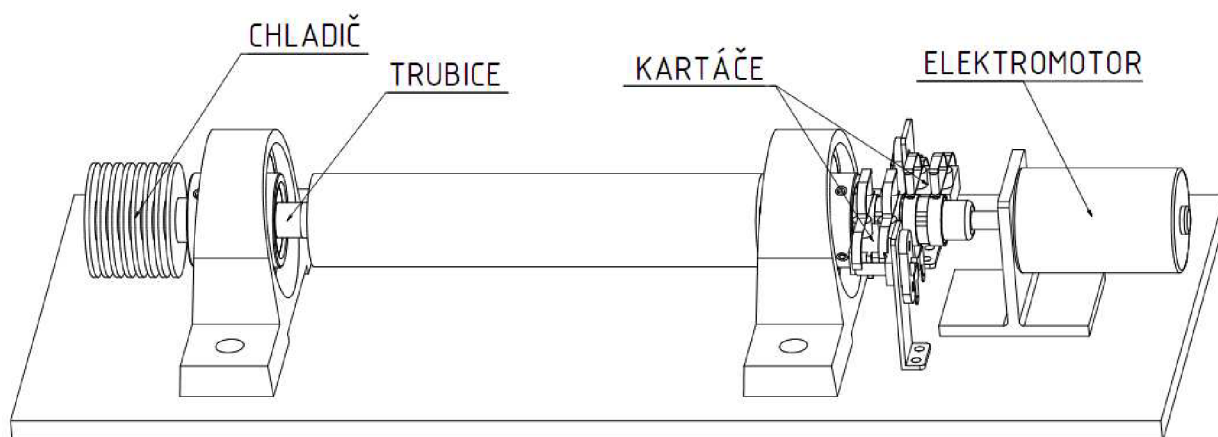


Obr. 2.4.: Motor s kondenzačními komůrkami a kondenzační trubkou

Tepelné trubice jsou schopné na měřených vzorcích odvádět výkon až 1500W, jako například u asynchronního motoru s plným rotorem a rotační tepelnou trubicí. Tento motor je pro konstrukci tepelné trubice vhodný především pro možnost vytvoření velkého průměru trubice, kdy se zvětšuje plocha vytvořeného filmu kapaliny a dojde ke zvýšení přenosu trubice. Uplatnění trubice je také vhodné u motorů s velkým skluzem, přerušovaným chodem a reverzacemi, u motorů bez vnějšího chlazení statoru a obecně u motorů, u kterých dochází k velkým ztrátám v rotoru. Z tohoto důvodu, je možné velké množství tepla odvést tepelnou trubicí a tak snížit teplotu celého stroje. U těchto elektromotorů může být odváděno až 60% celkového ztrátového tepla. Tepelné trubice jsou většinou používány ve vodorovné poloze, ale lze je v některých případech použít i svisle, kdy kondenzační radiátor je v horní části.

### 3 NÁVRH MĚŘÍCIHO STANOVIŠTĚ

Při návrhu experimentálního stanoviště rotační tepelné trubice bylo zapotřebí přihlídnout k několika požadavkům. Jedním z nich byla možnost přípravek později modifikovat podle potřeby a také finanční nenáročnost přípravku. Ne všechny požadavky však bylo možné splnit v plné míře, protože byly v protikladu s jinými. (Například: konstrukční jednoduchost a zmíněný požadavek na modifikaci) Byl proto zvolen kompromis mezi nimi. Na *Obr. 3.1* jsou uvedeny základní části měřícího stanoviště.



*Obr. 3.1.: Hlavní části stanoviště*

#### 3.1 Využití grafického prostředí Autodesk Inventor

Pro návrh stanoviště byl vytvořen digitální prototyp a vznikla tak přesná představa o vhodnosti volby některých částí stanoviště. Jednotlivé části byly vytvářeny pouze jako digitální modely, bez nutnosti jejich výroby. K výrobě byly dány až v konečné fázi návrhu.

#### 3.2 Volba trubice

Trubice byla vyrobena z měděné trubky o rozměru 15x1mm. Měď je pro své dobré tepelné vlastnosti vhodná a výroba trubek odstředivým odléváním zajišťuje hladký povrch uvnitř trubice, který je zapotřebí pro snadné proudění tekutiny uvnitř trubice.

#### 3.3 Elektromotor

Přípravek je poháněn stejnosměrným elektromotor SPEED 720 BB Torque. Stejnosměrný elektromotor byl zvolen pro jeho snadné řízení otáček a velký krouticí moment již při nízkých otáčkách.

Některé hodnoty elektromotoru:

Nominální napětí 12 V

Rozsah pracovního napětí 6 - 13 V

Otáčky naprázdno 4100 ot/min



Proud naprázdno 0,75 A  
Odebíraný proud při maximálním výkonu 3 A

Motor byl upevněn k podložce pomocí držáku. Výkres držáku je v příloze P5. Připojení elektromotoru k trubici je realizováno pomocí jednoduchého sklíčidla a zároveň tvoří uzavření tohoto konce tepelné trubice.

### 3.4 Volba rotačního upevnění trubice

Pro upevnění trubice byly zvoleny kompletní ložiskové jednotky UCP2 pro jejich snadné použití a finanční nenáročnost viz. *Obr. 3.2.*

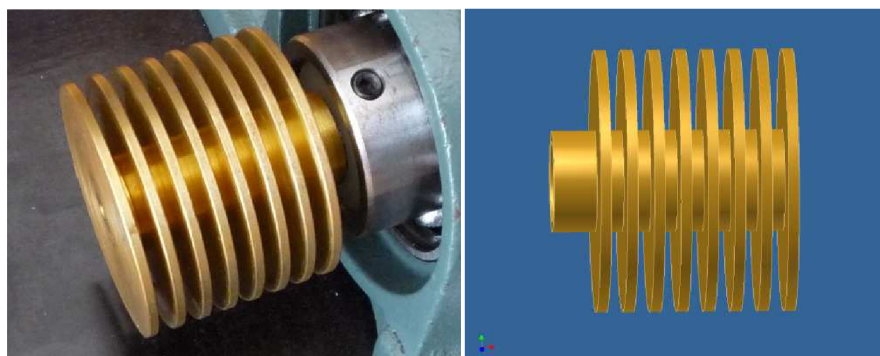


*Obr. 3.2.: Ložisková jednotka*

Vnitřní průměr ložiska pro hřídel byl zvolen 30mm (UCP206), aby bylo možné případně použít větších průměrů trubice. Pomocí stavěcích šroubů je možné lepší uchycení plastových redukcí. Ložiska byla opatřena prachovkami, které bylo nutné odstranit z důvodu velkého odporu. Rozměry jednotek jsou v příloze P1.

### 3.5 Výroba chladiče

Pro výrobu chladiče *Obr. 3.3* byl zvolen jako materiál mosaz (CuZn40Pb2) pro její dobré tepelné vlastnosti a dobré vlastnosti při pájení.



*Obr. 3.3.: Chladič*

Hlavním problémem při výrobě chladiče byla výroba kuželového otvoru a volba vhodného nástroje pro jeho výrobu. Jako nejvhodnější způsob byl zvolen kuželový vrták, který se používá pro vrtání otvorů do plechu viz. *Obr. 3.4.* Nejvhodnější průměr vrtáku z vyráběné řady byl  $\varnothing 3-14\text{mm}$  podle kterého byly voleny příslušné rozměry chladiče.

Chladič je opatřen plnicím otvorem, který umožňuje naplnění trubice potřebným množstvím tekutiny. Výkres chladiče je uveden v příloze P2.

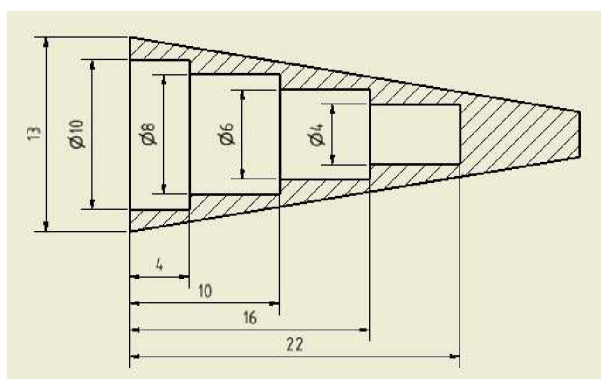


*Obr. 3.4.: Kuželový vrták*

Některé parametry chladiče:

Celková vnější plocha chladiče	5838	$\text{mm}^2$
Plocha vnitřního kuželového otvoru	764,4	$\text{mm}^2$
Hmotnost chladiče	0,289	kg
Měrná hustota mosazi	8,470	$\text{g/cm}^3$
Měrná tepelná kapacita mosazi při $20^\circ\text{C}$	0.378	$\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Tepelná vodivost mosazi při $20^\circ\text{C}$	105	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Tepelná kapacita chladiče	109,2	$\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$

Při výrobě kuželového otvoru chladiče, bylo doporučeno předvrtat otvorem o průměru 2,4mm, který prochází celou výškou chladiče a následně ve zbylém otvoru vyrobít závit M3 pro plnicí šroub trubice. Při případných problémech s odebráním materiálu u výroby kuželového otvoru bylo doporučeno podle potřeby předvrtat potřebným počtem odstupňovaných otvorů podle *Obr. 3.5.* U výroby vnitřního průměru 15mm u chladiče, bylo potřeba podle rozměru měděné trubky 15x1mm zajistit suvné uložení.

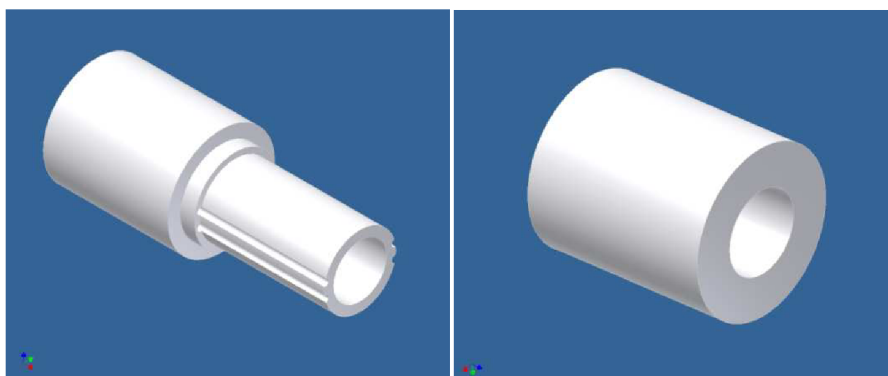


*Obr. 3.5.: Předvrtání kuželového otvoru*

### 3.6 Výroba plastových redukcí

Plastové redukce na *Obr. 3.6* byly vyrobeny z technického plastu Ertalonu. Tento plast je odolný teplotám do 130°C a tím je vhodný pro tuto aplikaci. Výkres plastových redukcí je uveden v příloze P3. Suvné uložení bylo potřeba zajistit u vnějších průměrů 30mm redukcí podle ložiskové jednotky a u vnějšího průměru 20mm, na kterém jsou nasunuty měděné kroužky z trubky 22x1mm a také pro vnitřní průměry 15mm u plastových redukcí podle rozměru měděné trubky 15x1mm.

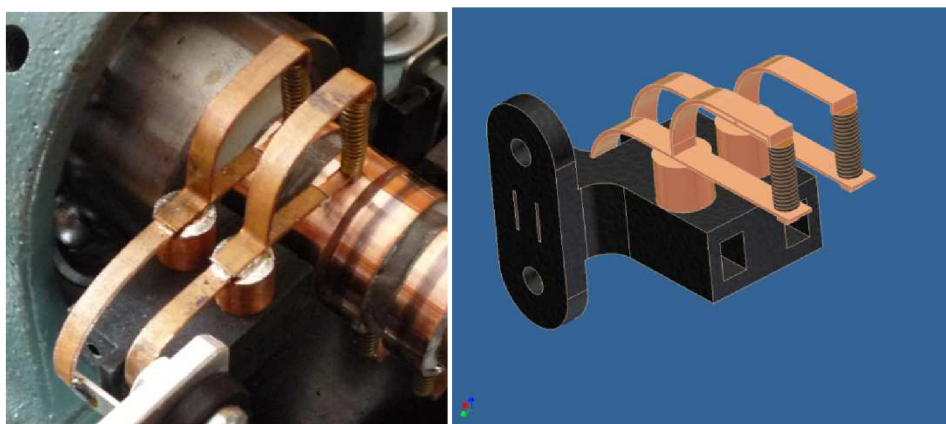
Na tuto redukci byly vytvořeny drážky pro připojení vodičů a epoxidovým lepidlem zalepeny kroužky.



*Obr. 3.6.: Plastové redukce*

### 3.7 Výroba kartáčů

Jedním z nejvíce řešených problémů bylo vyvedení vinutí přes kroužky a kartáče na svorky. Kartáče na *Obr. 3.7* byly nejprve použity jako hotový celek, ale pozdějším ověřením se ukázala jejich nevhodnost pro tuto aplikaci. Z tohoto důvodu bylo nutné hledat jiné řešení. Jako vhodný se ukázal, po odzkoušení několika různých typů kartáčů, typ z malého stejnosměrného motoru. Nové kartáče vznikly modifikací původních, byly doplněny o přítláčnou pružinu viz. *Obr. 3.7*, které zaručují dostatečný přítlak na kroužky. Tímto způsobem bylo dosaženo dostatečně vhodných vlastností pro snímání odporu měřícího vinutí.

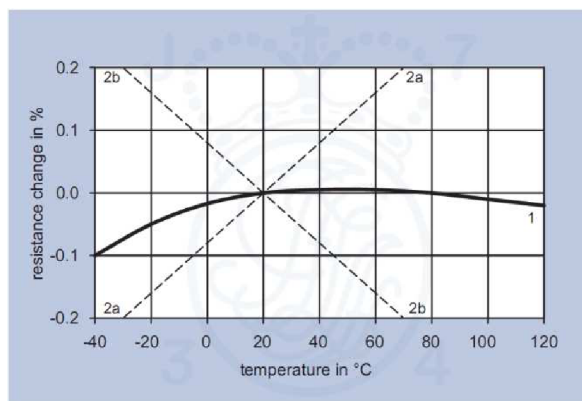


*Obr. 3.7.: Kartáče*

Aby bylo možné kartáče připevnit k desce, bylo potřeba vyrobit dva kusy držáků z duralového profilu. Výkres držáku kartáčů je v příloze P4.

### 3.8 Návrh topného a měřícího vinutí

Na ohřev trubice a tím simulaci ztrát v rotoru stroje bylo použito vinutí z odporového vodiče. Vodič byl požit z materiálu ISOTAN CuNi44, který je vhodný pro svoje stálé vlastnosti při měnící se teplotě a tím je dosaženo stejného topného výkonu v průběhu celého měření viz. Obr. 3.8.

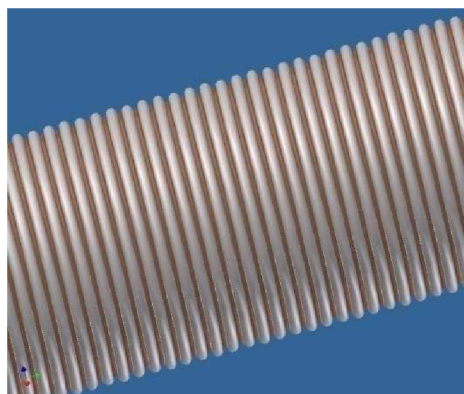


Obr. 3.8.: Vlastnosti materiálu ISOTAN

K ohřevu trubice se používá laboratorní zdroj, který má výstupní výkon 180W a to při napětí 60V. Z pomoci jednoduchého vztahu (3.1) vyplývá, že odpor vinutí musí mít hodnotu 20Ω.

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{60^2}{180} = 20\Omega \quad (3.1)$$

Použitý odporový vodič o průměru 0,7mm má nominální hodnotu odporu 1,233Ω/m a proto potřebná délka vodiče byla 16,2m. Pro předběžnou představu bylo zapotřebí navinout 344 závitů, topné vinutí bylo proto navinuto ve dvou vrstvách. Konečný odpor vinutí je 19,2Ω. Pro co největší přesnost bylo zapotřebí měřící vinutí umístit do prvních vrstev mezi vinutí topné viz. Obr. 3.9.



Obr. 3.9.: Způsob navíjení vodičů

Použitý měděný vodič je lakovaný a odděluje jednotlivé závity odporového vodiče. U měřícího vinutí bylo zapotřebí, aby odpor  $R_0$  dosahoval hodnoty jednotek až desítek ohmů a v důsledku toho byla změna odporu dostatečně velká. Takovým způsobem bylo dosaženo potřebné přesnosti snímání teploty.

Celé vinutí bylo izolováno pěnovým materiálem MIRELON, aby se snížily tepelné ztráty. Nedochází také k ochlazení vrchních vrstev měřícího vinutí a teplota celého vinutí se více přibližuje k teplotě povrchu trubice. Uzavření tepelné trubice a připevnění chladiče bylo provedeno měkkým pájením.

Některé vlastnosti měřícího stanoviště:

Odpor topného vinutí (při čistých kroužcích)	19,2 $\Omega$
Odpor měřícího vinutí (při 20°C a čistých kroužcích)	11,45 $\Omega$
Maximální teplota trubice	130°C
Interval pro čištění měřících kroužků	5min
Korekce odporu vlivem rotace	0,5 $\Omega$

### 3.9 Možnosti modifikace

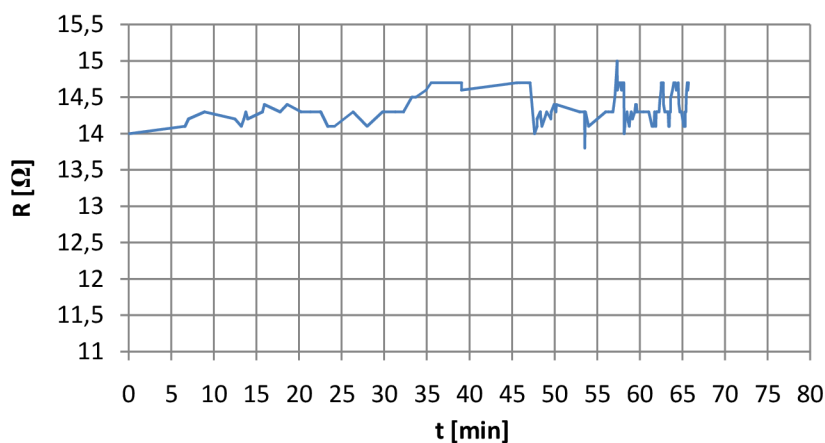
Při výměně chladiče ložiskovou jednotku u chladiče posuneme směrem k vinutí, chladič poté zahřejeme pomocí horkovzdušné pistole a po dosažení dostatečné teploty se chladič uvolní. Plastové redukce mají tepelnou odolnost 130°C a trubice ji v místě styku nesmí překročit. Zpětnou montáž provedeme opačným způsobem. Změna průměru trubice je také možná, ale obnáší převinutí topného a měřícího vodiče a výrobu nových kroužků. Oba vodiče jsou na kroužky připájeny a vytažením z drážek pod kroužky je uvolníme. Vodiče odvineme a posuneme ložiskové jednotky směrem ke středu trubice. Odpájíme chladič a stejným způsobem i připojení elektromotoru. Ložiskové jednotky stáhneme z trubice a plastové redukce po uvolnění stavěcích šroubů vyjmeme z ložisek. Po namontování nových plastových redukcí a trubice, je zapotřebí zkontrolovat a upravit házivost kroužků, která má za následek nepřesné snímání odporu měřícího vinutí.

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Na experimentálním přípravku byla provedena řada měření, které nám dávají informace o jeho vlastnostech. Výsledky těchto měření by měly být základem pro další měření a sloužit jako podklad pro další měření. Důležitou informací je popsání chování snímacích kartáčů, na kterém závisí přesnost následného odečítání teploty. Všechna měření byla provedena bez kapaliny v trubici. Pro měření odporu byl použit multimetr metrix MX50 a pro měření teplot altimetr UNI-T UT60E s připojeným termočlánkem typu K.

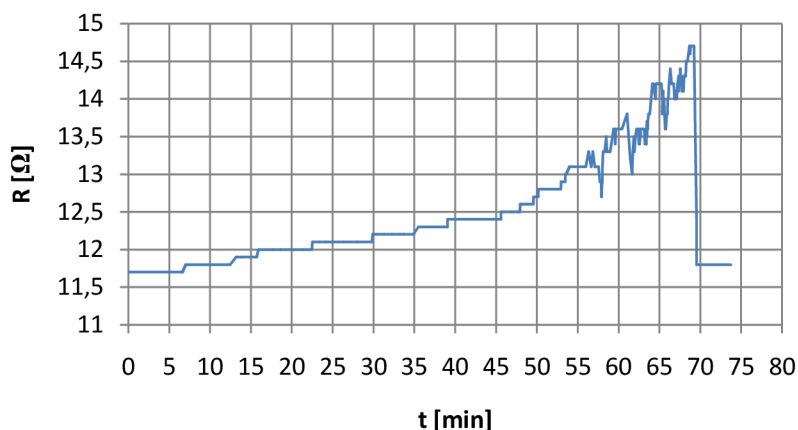
### 4.1 Vliv kartáčů na snímání teploty

Před modifikací byla měřením zjištěna závislost přechodového odporu kartáčů na čase, po kterou jsou v provozu. Jak je vidět z grafu na *Obr. 4.1* chování nebylo vhodné ani při očištění kroužků a změna odporu při stále teplotě byla příliš velká. Měření bylo provedeno při konstantní teplotě a otáčkách 1300 ot/min.



*Obr. 4.1.: Chování původních kartáčů*

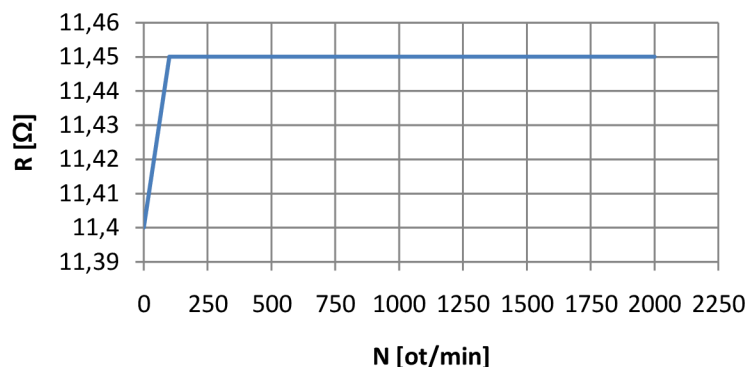
V grafu na *Obr. 4.2* můžeme vidět chování po jejich modifikaci, kdy se kmitání odporu odstranilo a změna odporu je v přijatelných časových intervalech.



*Obr. 4.2 : Chování modifikovaných kartáčů*

Z grafu na Obr. 4.2 vyplývá, že pro dosažení dostatečně přesného měření je zapotřebí snímací kroužky udržovat v čistém stavu např. pomocí jemného smirkového papíru. Doba, po kterou chování kartáčů je ustálené je asi 5 minut, proto by měly kroužky být očištěny vždy v tomto intervalu. Po očištění odpor klesne opět na ustálenou hodnotu.

Změna přechodového odporu kartáčů vlivem rotace, byla zjištěna dalším měřením a z naměřeného grafu na Obr. 4.3 je zřejmé, že rotace má vliv zvýšením odporu a při dalším zvyšování otáček zůstává hodnota odporu stejná.



Obr. 4.3 : Posouzení vlivu rotace na kartáče

#### 4.2 Odečítání teploty na měřícím stanovišti

Na snímání teploty povrchu trubice bylo využito teplotní závislosti odporu měděného vodiče, která je dána vztahem (4.1).

$$R_{\vartheta} = R_0 [1 + \alpha_0 \cdot (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (4.1)$$

kde

$R_{\vartheta}$  je odpor měřícího vinutí při teplotě  $\vartheta$

$R_0$  je odpor měřícího vinutí při teplotě  $\vartheta_0$

$\alpha_0$  je teplotní součinitel pro teplotu  $\vartheta_0$

Před odečítáním teploty je zapotřebí zohlednit výchozí podmínky před měřením. Podle teploty okolí vypočteme teplotní součinitel  $\alpha_0$  podle vztahu (4.2).

$$\alpha_0 = \frac{1}{234,5 + \vartheta_0} \quad (4.2)$$

Pro výpočet teploty ze změny odporu měděného vodiče vyjdeme ze vztahu (4.1) a vyjádřením teploty  $\vartheta$  dostaneme vztah (4.3)

$$\vartheta = \frac{\frac{R_{\vartheta}}{R_0} + \alpha_0 \cdot \vartheta_0 - 1}{\alpha_0} \quad (4.3)$$

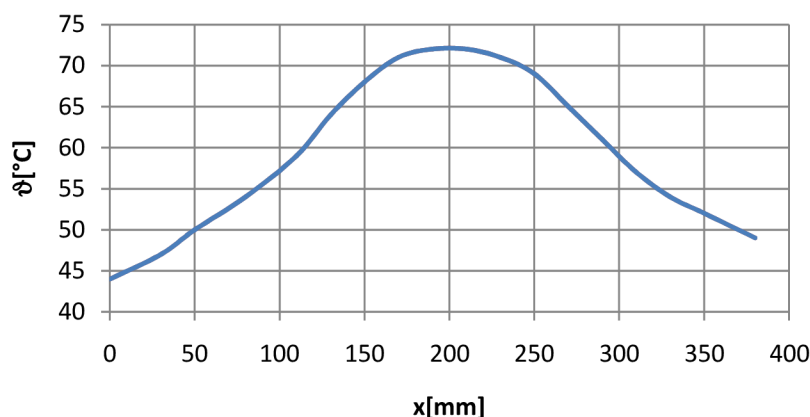
Příklad výpočtu pro naměřené  $R_{\vartheta} = 15,1 \Omega$  při teplotě okolí  $19 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a výchozím odporu  $11,4 \Omega$

$$\alpha_0 = \frac{1}{234,5 + 19} = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1} \quad (4.4)$$

$$\vartheta = \frac{\frac{15,1}{11,4} + 3,94 \cdot 10^{-3} \cdot 19 - 1}{3,94 \cdot 10^{-3}} = 101,3^{\circ}\text{C} \quad (4.5)$$

### 4.3 Rozložení teplot po délce trubice

Teplota byla měřena uvnitř trubice směrem od chladiče k motoru, a jak je patrné z grafu na *Obr. 4.4* nejvyšší teplota je uprostřed trubice a nejméně tepla je odváděno směrem k chladiči. Měření pomocí vinutí, které je navinuto po délce trubice, nám tedy udává střední hodnotu teploty v takto naměřeném úseku trubice.



*Obr. 4.4.: Rozložení teploty po délce trubice*

### 4.4 Ověření závislosti odporu měřícího vinutí na teplotě

Pro ověření této závislosti bylo použito porovnání s teplotou získanou pomocí termočlánku, který byl umístěn plnicím otvorem uvnitř trubice ve vzdálenosti středu topného vinutí. Aby nedošlo ke zkreslení naměřených hodnot, bylo měření provedeno bez rotace. Po každé změně topného výkonu byla ponechána dostatečná časová prodleva na ustálení teploty.

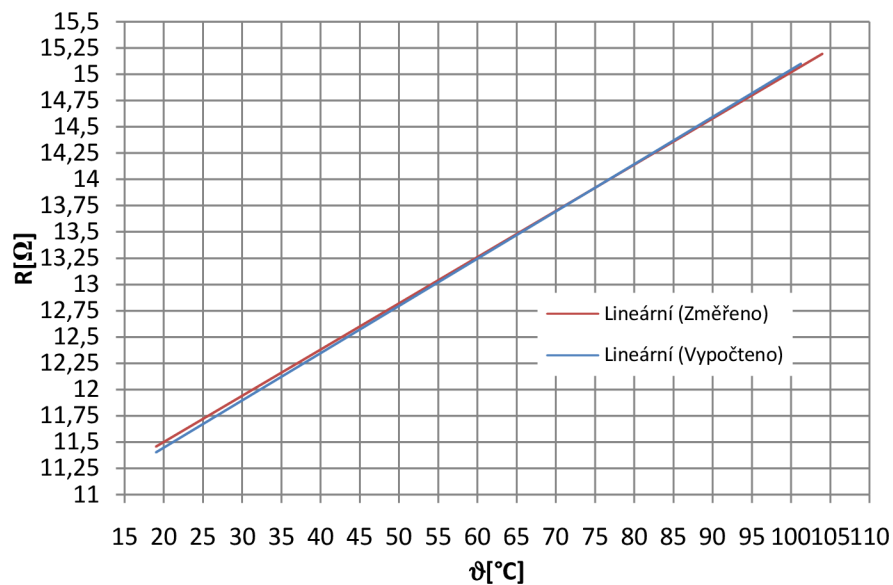
Výsledky měření udává graf na *Obr. 4.5*. Obě křivky jsou téměř totožné, z tohoto vyplývá, že teplota povrchu trubice je o něco vyšší oproti teplotě uvnitř trubice. Pro další měření bude pomocí těchto hodnot posuzován vliv na odvod tepla z vinutí topného a tím posouzeno množství odvedeného ztrátového výkonu.

### 4.5 Ověření vlivu izolace a rotace

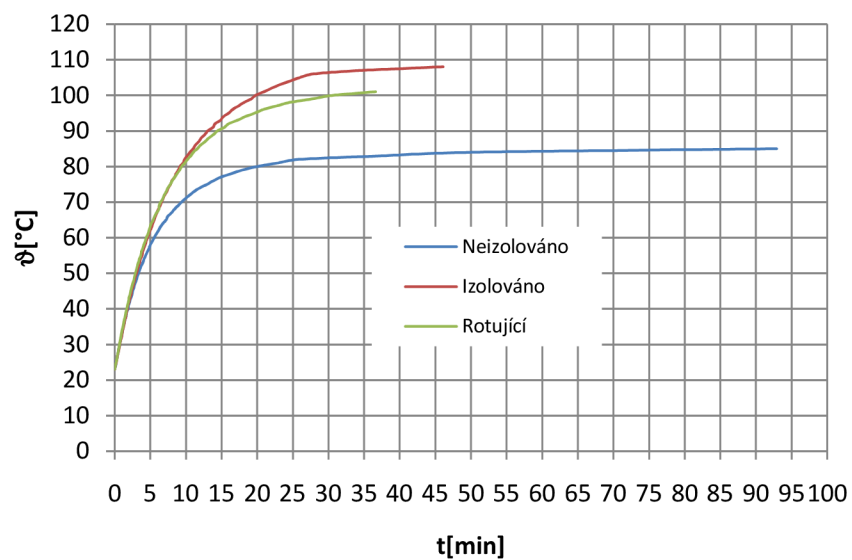
Abychom získali představu o tom, jaký vliv má použití izolace na oteplení trubice, byly provedeny dvě z následujících měření. Výsledky měření zobrazeny v grafu na *Obr. 4.6* a *Obr. 4.8*. Po použití izolace se teplota trubice zvýšila až o 25%. V tomto grafu je také



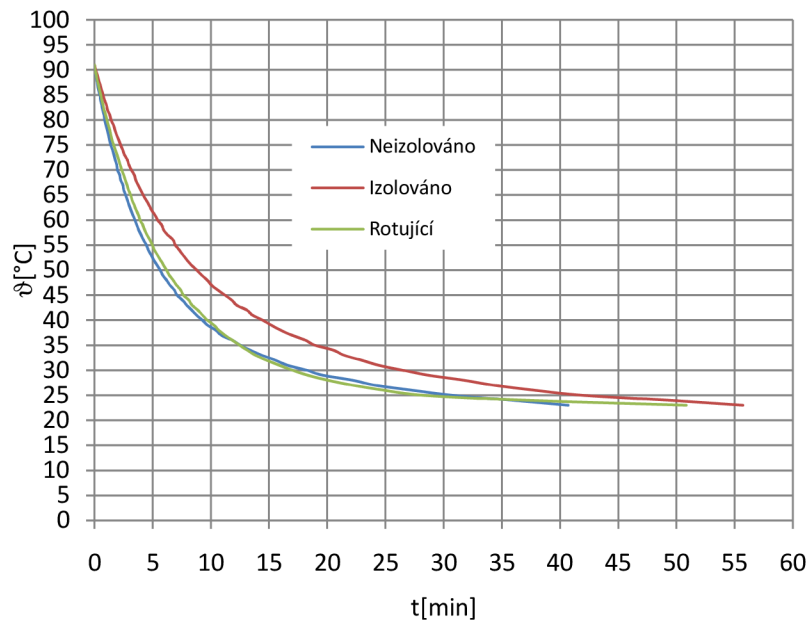
zobrazen vliv vedení tepla na chladič prostřednictvím stěn samotné trubice, pokud ventilace chladiče je samotnou rotací. V tomto případě, se ustálená teplota snížila o 7%. Ochlazování přípravku je v grafu na Obr. 4.7. Při ochlazování je patrný vliv izolace, kdy dochází k pomalejšímu ochlazování a vliv ochlazování chladiče rotací je téměř zanedbatelný.



Obr. 4.5.: Závislost odporu měřícího vinutí na teplotě



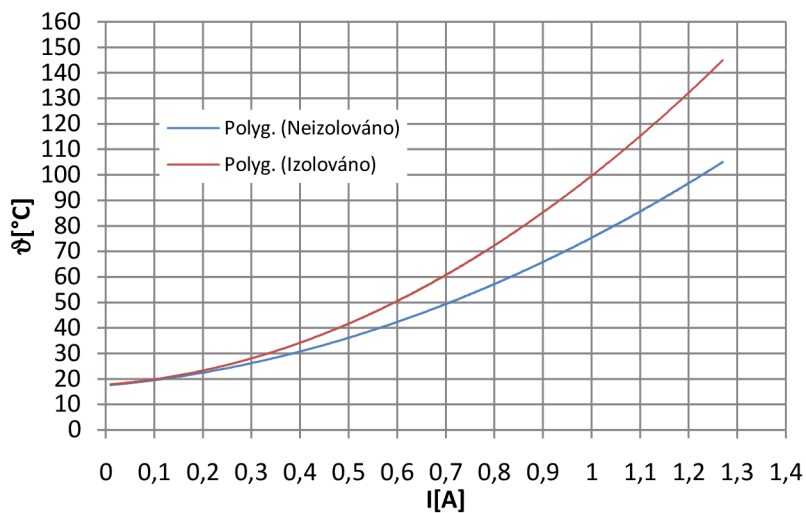
Obr. 4.6.: Ohřev přípravku



Obr. 4.7.: Chladnutí přípravku

#### 4.6 Závislost proudu na teplotě

Pro snadné nastavení potřebné teploty, bylo provedeno měření závislosti teploty na proudu procházejícího topným vinutím. Podle grafu na Obr. 4.8 můžeme snadno pro požadovanou teplotu nastavit příslušný výkon a poté pouze drobně upravit podle aktuálních okolních podmínek.



Obr. 4.8.: Závislost proudu topného vinutí na teplotě

## **5 ZÁVĚR**

Výsledkem bakalářské práce je experimentální stanoviště, na kterém je možné ověřovat vlastnosti rotační tepelné trubice. Byl vytvořen digitální prototyp stanoviště a provedena potřebná měření popisující chování stanoviště a na jejich základě vhodnými řešeními byly odstraněny problémy, které představují vyvedení vinutí přes kroužky a kartáče. Byl stanoven postup, jakým způsobem mají být ošetřovány kroužky pro nezkreslená měření. Stanoviště je možné modifikovat a tím ověřit vhodné konstrukce tepelné trubice.

## 6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] OŠLEJŠEK, O.: *Chlazení rotorů elektrických strojů prostřednictvím tepelné trubice v hřídeli, VUES Brno, 1982*
- [2] *Veřejně přístupné katalogové listy a firemní údaje Thermacore International:*  
[www.thermacore.com](http://www.thermacore.com)
- [3] ONDRUŠKA , E., MALOUŠEK, A.: *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých, SNTL, Praha, 1985*
- [4] *Veřejně přístupné katalogové listy a firemní údaje Isabellenhütte Heusler:*  
[www.isabellenhuetten.de](http://www.isabellenhuetten.de)

## **7 PŘÍLOHY**

### **SEZNAM PŘÍLOH**

P1 – ROZMĚRY LOŽISKOVÝCH JEDNOTEK

P2 – VÝKRES CHLADIČE

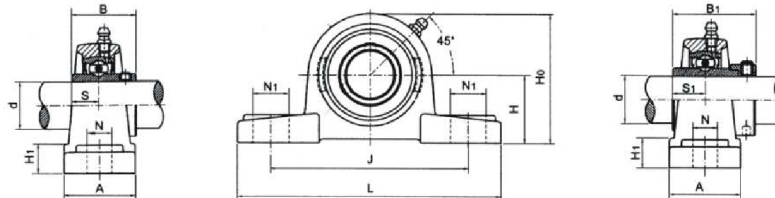
P3 – VÝKRES PLASTOVÝCH REDUKCÍ

P4 – VÝKRES DRŽÁKU KARTÁČE

P5 – VÝKRES DRŽÁKU ELEKTROMOTORU

P1 – ROZMĚRY LOŽISKOVÝCH JEDNOTEK

Ložiskové jednotky se stojatými litinovými tělesy typu UCP2 a NAP2

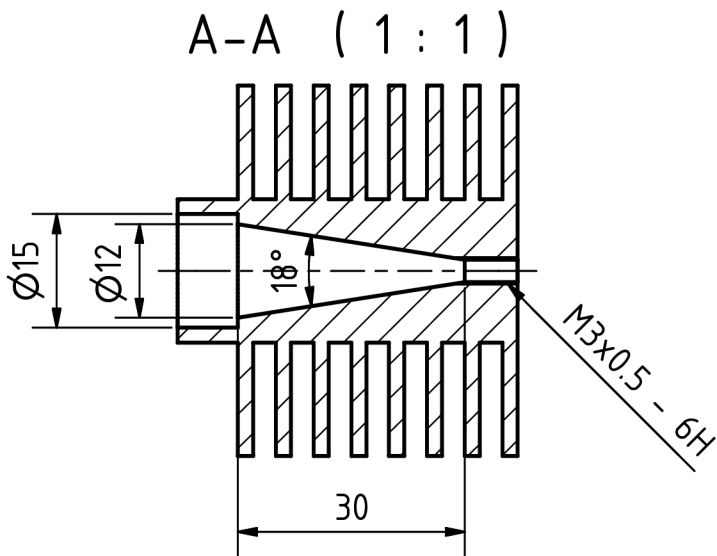
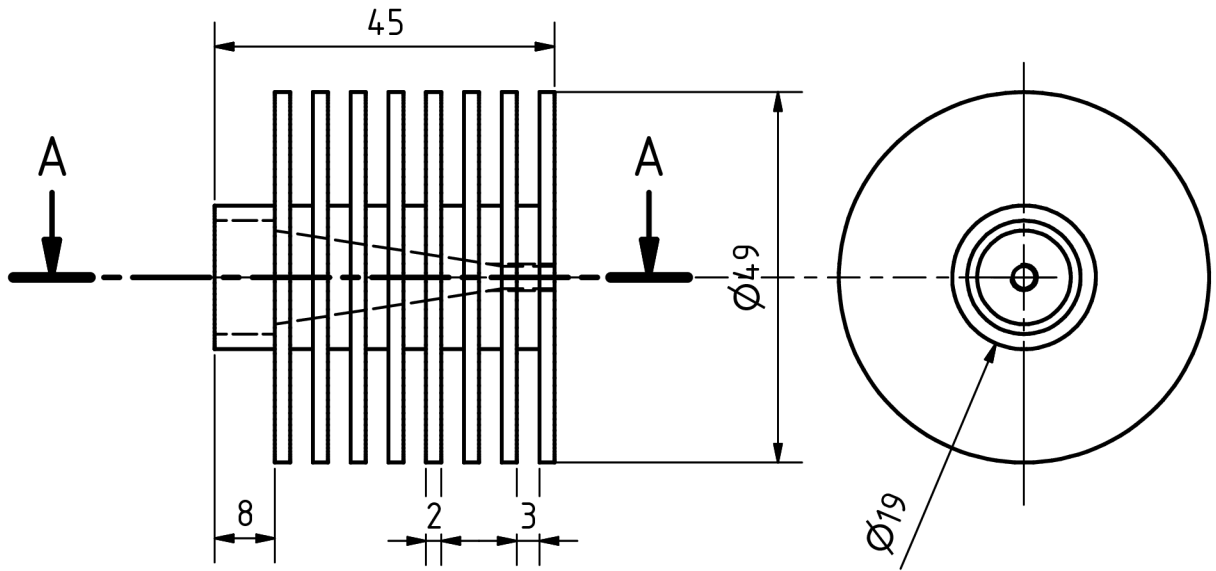


UCP2... se stavěcími šrouby

NAP2... s výstředníkovým kroužkem

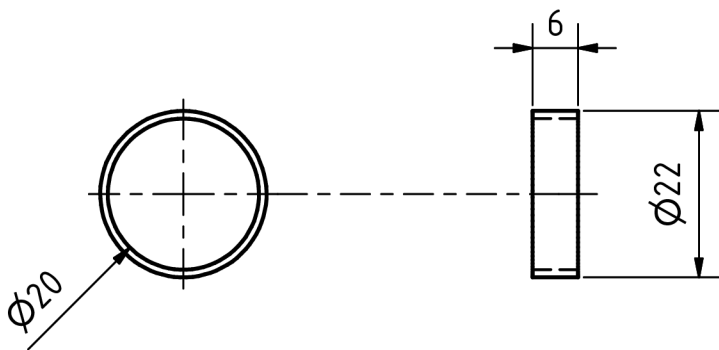
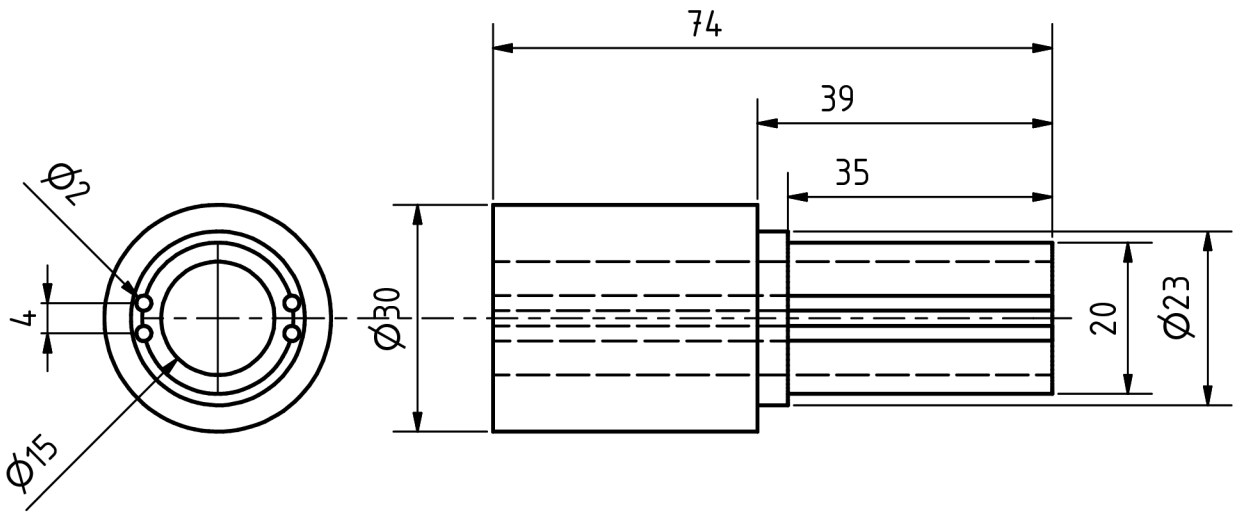
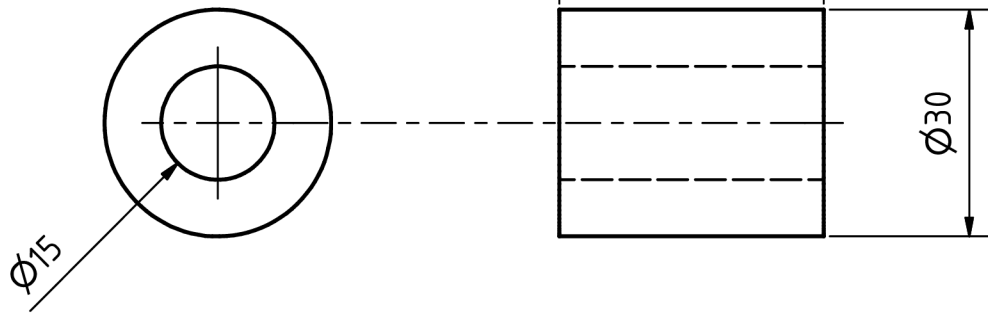
Označení	Průměr hřídele d		Hlavní rozměry (mm)													Šroub	Ložisko	Těleso	Hmotnost (kg)	
	palce	mm	H	L	J	A	N	N1	H1	HO	S	S1	B	B1	ds				UCP	NAP
201	1/2	12																201		
201-8	9/16	15	30.2	125	96	36	12	16	13	57	12.7	17.0	31	43.5	1/4-28 UNF	M10	201-8	P203	0.65	0.70
202	5/8	17															202			
202-10	11/16	20	33.3	127	96	38	13	19	14	63.8	12.7	17.0	31	43.5	1/4-28 UNF	M10	202-10	P204	0.70	0.74
203	3/4	25	36.5	140	105	38	13	19	15	69.5	14.3	17.4	34.1	44.3	1/4-28 UNF	M10	203	P205	0.75	0.82
203-11	7/8	30	42.9	160	121	44	16.5	21	16	82	15.9	18.2	38.1	48.3	5/16-24 UNF	M14	203-11	P206	1.30	1.40
204-12	1-3/16	35	47.6	167	126	48	16.5	21	17	92	17.5	18.8	42.9	51.1	5/16-24 UNF	M14	204-12	P207	1.60	1.75
204	1-1/4	40	49.2	180	136	53	16.5	21	18	98	19	21.4	49.2	56.3	5/16-24 UNF	M14	204	P208	1.90	2.05
205-14	1-5/16	45	54	190	146	54	16.5	21	20	107	19	21.4	49.2	56.3	5/16-24 UNF	M14	205-14	P209	2.30	2.50
205-15	1-3/8	50	57.2	204	159	58	19	22	21	113	19	24.6	51.6	62.7	5/16-24 UNF	M16	205-15	P210	2.60	2.85
205	1	55	63.5	219	172	60	19	22	22	125	22.2	27.7	55.6	71.4	3/8-24 UNF	M16	205	P211	3.30	3.70
205-16	1-1/8	60	69.9	238	186	66	19	25	24	137	25.4	30.9	65.1	77.8	3/8-24 UNF	M16	205-16	P212	4.60	5.20
206-18	1-1/4	65	76.2	262	203	70	23	29	26	148	25.4	34.1	65.1	85.7	3/8-24 UNF	M20	206-18	P213	5.90	6.5
206	1-3/8	70	79.4	266	210	72	23	29	27	155	30.2	34.1	74.6	85.7	3/8-24 UNF	M20	206	P214	6.60	7.12
206-19	1-1/4	75	82.6	275	217	74	25	29	28	163	33.3	37.3	77.8	92.1	3/8-24 UNF	M20	206-19	P215	7.30	7.90
206-20	1-7/16	80	88.9	292	232	78	25	29	30	175	33.3	.....	82.6	.....	.....	M20	206-20	P216	9.00	.....
207-20	1-5/16	85	95.2	310	247	83	25	30	32	186	34.1	.....	85.7	.....	.....	M20	207-20	P217	10.8	.....
207-21	1-3/8	90	101.6	327	262	88	27	32	33	200	39.7	.....	96	.....	.....	M20	207-21	P218	13	.....
207-22	1-7/16																207-22			
207	1-1/2																207			
207-23	1-9/16																207-23			
208-24	1-5/8																208-24			
208-25	1-11/16																208-25			
208	1-3/4																208			
209-26	1-7/8																209-26			
209-27	1-15/16																209-27			
209-28	1-3/4																209-28			
209	2																209			
210-30	1-7/8																210-30			
210-31	1-15/16																210-31			
210	2																210			
210-32	2-1/8																210-32			
211-32	2-3/16																211-32			
211-34	2-1/4																211-34			
211	2-5/16																211			
211-35	2-3/8																211-35			
212-36	2-7/16																212-36			
212-37	2-1/2																212-37			
212	2-11/16																212			
212-38	2-3/4																212-38			
212-39	3																212-39			
213-40	3-1/4																213-40			
213	3-1/2																213			
213-43	.....																213-43			
214-44	.....																214-44			
214	.....																214			
215-44	.....																215-44			
215-47	.....																215-47			
215	.....																215			
215-48	.....																215-48			
216	.....																216			
216-52	.....																216-52			
217-52	.....																217-52			
217	.....																217			
218-56	.....																218-56			
218	.....																218			

P2 - VÝKRES CHLADIČE



				Datum	Název	Chladič		
				Nakreslen	25.5.2009			Martin Liška
				Zkontrolován				
				Norma				
				09-02			1	
							A4	
Stav	Změny	Datum	Název					

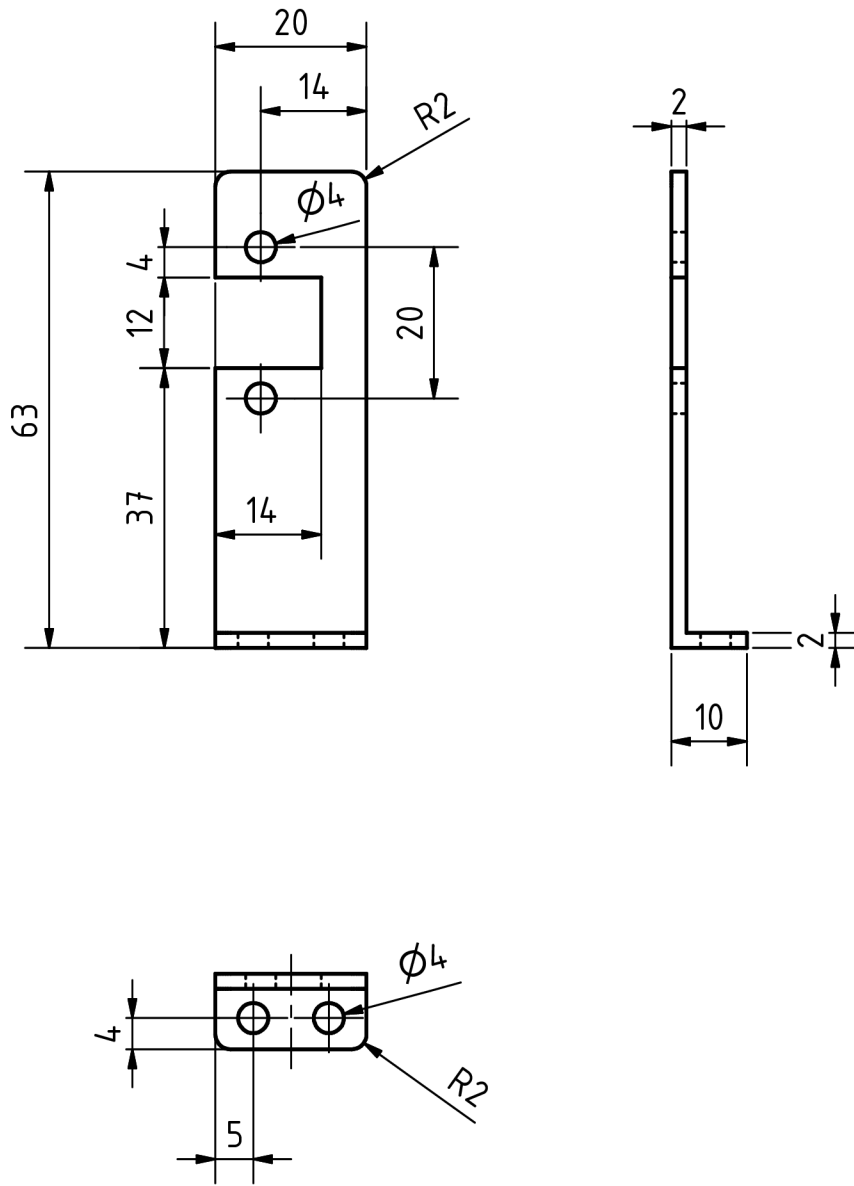
P3 - VÝKRES PLASTOVÝCH REDUKCÍ



				Datum	Název	Redukce		
				Nakreslen	25.5.2009			Martin Liška
				Zkontrolován				
				Norma				
							09-03	
							1	
							A4	
Stav	Změny	Datum	Název					

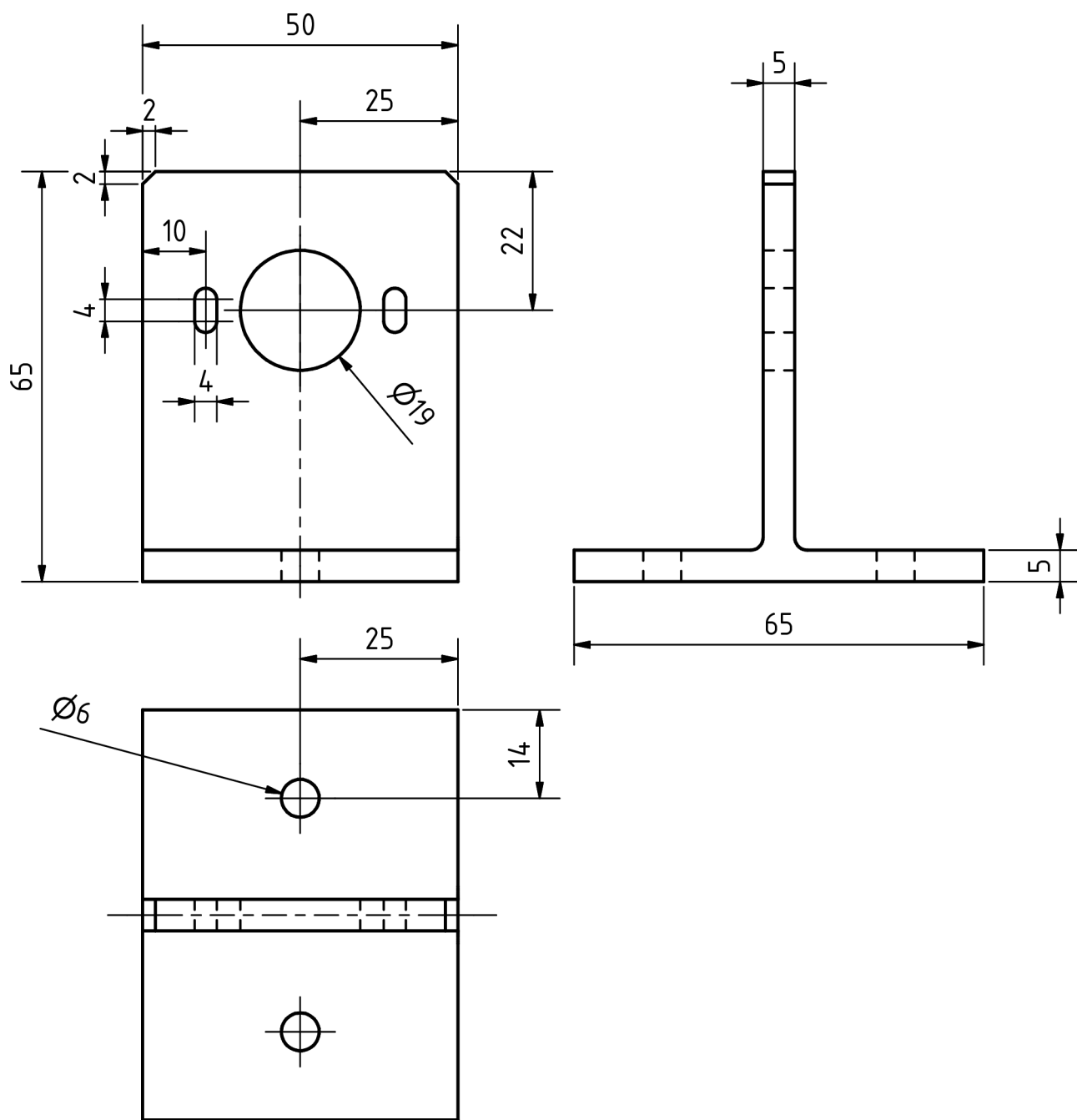


# P4 - VÝKRES DRŽÁKU KARTÁČE



				Datum	Jméno	Držák kartáče	
			Nakreslen	27.5.2009	Martin Liška		
			Zkontrolován				
			Norma				
				09-04			1
							A4
Stav	Změny	Datum	Jméno				

# P5 - VÝKRES DRŽÁKU ELEKTROMOTORU



				Datum	Jméno	Držák elektromotoru		
			Nakreslen	27.5.2009	Martin Liška			
			Zkontrolován					
			Norma					
							09-05	1
								A4
Stav	Změny	Datum	Jméno					