

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství  
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Analýza jevů ovlivňujících měření teplot a dalších veličin na zkušebním  
radiálním kompresoru

Autor: **Bc. Jaroslav Levý**  
Vedoucí práce: **Ing. Richard Matas, Ph.D.**  
Odborný konzultant: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav LEVÝ**  
Osobní číslo: **S16N0044P**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Stavba energetických strojů a zařízení**  
Název tématu: **Analýza jevů ovlivňujících měření teplot a dalších veličin  
na zkušebním radiálním kompresoru**  
Zadávací katedra: **Katedra energetických strojů a zařízení**

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

Na základě zadaných parametrů máte provést:

- rešerši problematiky,
- analýzu naměřených dat a možných vlivů (s aktivní účastí na měření a analýze dat),
- návrh konstrukčního provedení zařízení pro testování teplotních sond,
- testování vlastností sond (bude-li potřebné),
- simulace měřicího procesu (bude-li potřebné),
- komplexní analýzu výsledků,
- zobecnění výsledků a doporučení.

Zadané parametry: Vybrané parametry měření radiálních kompresorových stupňů.

Rozsah grafických prací: **grafy, obrázky, náčrty, schéma experimentálního zařízení**

Rozsah kvalifikační práce: **50 - 70 stran**

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

Seznam odborné literatury:

- Misárek D.: Turbokompresory, SNTL Praha, 1963
- Kadrnožka J.: Tepelné turbíny a kompresory, Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2004
- Firemní literatura Howden ČKD Compressors s. r. o.
- Tropea C., Yarin A., Foss J. F. (Eds.): Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Richard Matas, Ph.D.**

Nové technologie - výzkumné centrum

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jaroslav Mráz**

Howden ČKD Compressors s. r. o.

Ostatní konzultanti: **Ing. Jan Sedláček, Ph.D.**

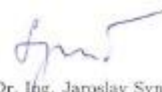
Nové technologie - výzkumné centrum

Datum zadání diplomové práce: **30. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **21. května 2018**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.  
děkan



Dr. Ing. Jaroslav Synáč  
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. října 2017

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Richardu Matasovi, Ph.D., za odborné vedení, poskytnutí cenných rad a připomínek během konzultací a také za zprostředkování měření v Doosan Škoda Power s.r.o. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Sedláčkovi, Ph.D., za vytvoření ideálních podmínek pro tvorbu diplomové práce v rámci NTC ZČU a také za rady a odbornou pomoc v oboru elektrotechniky. A konečně bych rád poděkoval všem svým kolegům z NTC ZČU, kteří mně pomáhali s pracemi na diplomové práci. Zejména pak panu Bohumilu Brabcovi za pomoc při montáži experimentálního zařízení a také panu Ing. Jaroslavu Mrázovi ze společnosti Howden ČKD Compressors s.r.o, za poskytnutí veškeré potřebné technické dokumentace, ochotu a přátelské prostředí během mé dosavadní praxe na zkušebním zařízení Darina IV.

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení Levý	Jméno Jaroslav	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	ESZN „Stavba energetických strojů a zařízení“		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Matas, Ph.D.	Jméno Richard	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - NTC – MIS		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Analýza jevů ovlivňujících měření teplot a dalších veličin na zkušebním radiálním kompresoru		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KKE	<b>ROK ODEVZD.</b>	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	58	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	38	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	20
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;"><b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b></p> <p><b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b></p>	<p>Následující práce se zabývá problematikou tepelného ovlivnění vícenásobných sond celkové teploty používaných při měření na zkušebním zařízení radiálních kompresorů Darina IV. Za tímto účelem bylo navrženo a zkonstruováno experimentální zařízení, bylo provedeno měření, vyhodnocena naměřená data, stanoveny výsledky a z nich plynoucí závěry.</p>
<p style="text-align: center;"><b>KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b></p>	<p>Experimentální zařízení, zkušební zařízení, tepelné ovlivnění, vícenásobná sonda celkové teploty, měření</p>

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname Levý	Name Jaroslav		
<b>FIELD OF STUDY</b>	ESZN „Design of Power Machines and Equipment”			
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Matas, Ph.D.	Name Richard		
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - NTC – MIS			
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Analysis of the phenomena affecting the measurement of temperatures and other values on the test centrifugal compressor			

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Power System Engineering	<b>SUBMITTED IN</b>	2018
----------------	------------------------	-------------------	--------------------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	58	<b>TEXT PART</b>	38	<b>GRAPHICAL PART</b>	20
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The following text is focused on the thermal influence of multi - thermocouple total temperature probes used by measurements at the testing device of centrifugal compressors. For this purpose, experimental device was designed and constructed, measurements were made, measured data were analyzed and there were determined results and conclusions.
<b>KEY WORDS</b>	Experimental device, testing device, thermal influence, multi-thermocouple total temperature probe, measurement

## Obsah

Seznam označení a zkratk .....	9
1 Úvod.....	10
2 Rešerše problematiky .....	12
2.1 Popis zkušebního zařízení Darina IV .....	12
2.2 Měření na zkušebním zařízení Darina IV .....	13
2.2.1 Měření teplot .....	14
2.2.2 Konstrukce teplotních sond .....	14
2.2.3 Měření tlaků .....	15
2.2.4 Měření provozních veličin .....	15
2.2.5 Sběr a vyhodnocení naměřených dat.....	16
3 Analýza naměřených dat a možných vlivů .....	17
4 Návrh konstrukčního provedení experimentálního zařízení .....	21
4.1 Návrh konstrukce a montáž ustalovacího tunelu.....	21
4.2 Návrh konstrukce a montáž vytápěné desky .....	22
4.3 Přechodové části.....	26
4.4 Měření a instrumentace .....	28
4.4.1 Měření teplot .....	28
4.4.2 Měření rychlosti .....	29
4.4.3 Sběr dat a vyhodnocení měření .....	30
5 Testování vlastností sond .....	32
5.1 Metodika měření .....	32
5.2 Rychlostní profily.....	33
5.3 Krátká čtyřnásobná sonda celkové teploty .....	34
5.4 Dlouhá čtyřnásobná sonda celkové teploty .....	37
5.5 Plastová trojnásobná sonda celkové teploty.....	40
5.6 Jednoduché sondy celkové teploty .....	43
5.7 Teplotní pole nad vytápěnou deskou.....	45
6 Vyhodnocení měření .....	47
7 Závěr.....	54
Seznam použitých zdrojů .....	55
Seznam obrázků .....	56
Seznam tabulek .....	57
Seznam příloh.....	58



## Seznam označení a zkratek

<u>Zkratka</u>	<u>popis/název veličiny</u>	<u>jednotka</u>
A .....	šířka kanálu .....	[mm]
B .....	výška kanálu .....	[mm]
L .....	délka vzduchové trati .....	[mm]
a .....	šířka vytápěné desky .....	[mm]
l .....	délka vytápěné desky .....	[mm]
I .....	elektrický proud .....	[A]
U .....	elektrické napětí .....	[V]
P .....	topný výkon .....	[W]
Ma .....	Machovo podobnostní číslo .....	[–]
Pr .....	Prandtlovo podobnostní číslo .....	[–]
Re .....	Reynoldsovo podobnostní číslo .....	[–]
Nu .....	Nusseltovo podobnostní číslo .....	[–]
$\alpha$ .....	součinitel přestupu tepla .....	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
Q .....	tepelný tok .....	[W]
T <sub>0</sub> .....	teplota vzduchu na konci vytápěné desky .....	[°C]

<u>Zkratka</u>	<u>popis/název</u>
VTP .....	Vědeckotechnický Park
NTC .....	Nové Technologie - výzkumné Centrum
CFD .....	Computational Fluid of Dynamics
CAD .....	Computer Aided Design

# 1 Úvod

Tato práce je věnována problematice měření teplot na zkušebním zařízení Darina IV.

Jedná se o zkušební zástavbu jednostupňového radiálního kompresoru sloužící pro účely vývoje kompresorových stupňů vyráběných firmou Howden ČKD Compressors s.r.o.. Rotor kompresoru je poháněn elektromotorem řízeným frekvenčním měničem z důvodu možnosti regulace otáček. Na zařízení jsou měřeny tlaky a teploty protékajícího vzduchu v sedmi měřících rovinách. Při analýze naměřených výsledků vyvstalo podezření týkající se tepelného ovlivnění teplotních sond.

Na zkušebním zařízení Darina IV jsou k měření teplot použity jedno až pětinasobné teplotní sondy. Jejich části umístěné v proudu jsou vyrobeny z nerezové oceli, části umístěné ve stěně kanálu jsou vyrobeny z mosazi. Vlivem ohřívání vzduchu při běhu kompresoru je postupně prohřívána skříň celého zařízení. Vzhledem k tloušťce její stěny je mezi ní a tělem teplotní sondy poměrně velká styčná plocha. Díky tomu zde dochází k přestupu tepla mezi oběma elementy. Předpokládá se, že tento jev je závislý na teplotním gradientu mezi stěnou a tělem sondy, materiálu, ze kterého jsou sondy vyrobeny, a na teplotě a rychlosti proudu pracovního média. V závislosti na těchto parametrech byla provedena CFD simulace, která teplotní ovlivnění sond potvrdila. Cílem této práce bylo tedy postavit experimentální zařízení, které bude simulovat reálné podmínky zapojení sond ve zkušebním zařízení a bude sloužit ke zjištění charakteristiky jejich teplotního ovlivnění v závislosti na zmíněných parametrech. Dalším cílem bylo provedení měření na experimentálním zařízení, analýza naměřených veličin a stanovení konečných výsledků.

Pro účely měření bylo navrženo experimentální zařízení. Jedná se o vzduchovou trať obdélníkového, respektive šestiúhelníkového průřezu. Základní obdélníkový tvar byl z důvodu eliminace koutových vírů v rozích doplněn o výplně trojúhelníkového průřezu. Tunel je 4 [m] dlouhý o průřezu 150 x 100 [mm], vyrobený z jemně broušené překližky. Pro simulaci podmínek ve stroji byla navržena vytápěná ocelová deska osazená dvěma průběžnými otvory o průměru 16 mm, sloužícími pro umístění teplotních sond. Pro měření teploty desky byla dále opatřena dvěma "slepými" otvory o průměru 2 mm pro umístění termočlánků "do železa". Jeden z otvorů pro teplotní sondy byl pro účely měření navíc vybaven silonovou vložkou. Z důvodu nutnosti přechodu z obdélníkového na kruhový průřez, vyplývajícího z nutnosti připojení zařízení na stávající vybavení laboratoře, je tunel dále osazen přechodovou částí. Tento díl byl dle vlastního návrhu v CAD systému vytisknut na 3D tiskárně.

Pro experimentální zařízení bylo navrženo měření požadovaných veličin. V zařízení jsou měřeny teploty desky (stěny kanálu), teploty proudu protékajícího vzduchu, pomocí Prandtlvy sondy s možností traverzování v jedné ose hodnoty statického a celkového tlaku a z toho vyplývající hodnota rychlosti podél rychlostního profilu kanálu.

Měření bylo naplánováno ve dvou etapách pro rozdílný rozsah rychlostí proudícího vzduchu. První etapa byla realizována v laboratořích ZČU NTC, kde lze dosáhnout rychlosti proudění pouze do 12 [m/s], ale doba měření není nijak časově omezena. Díky tomu byla tato etapa výhodná pro přípravu a vyladění metodiky měření a získání základních dat. Pro měření při rychlostech až 80 [m/s] bylo využito experimentální zařízení umístěné v laboratořích Doosan Škoda Power, ke kterému bylo experimentální zařízení připojeno pomocí samostatně navržené přechodové části. Vzhledem k potřebám poskytovatele prostoru bylo toto měření časově omezeno.

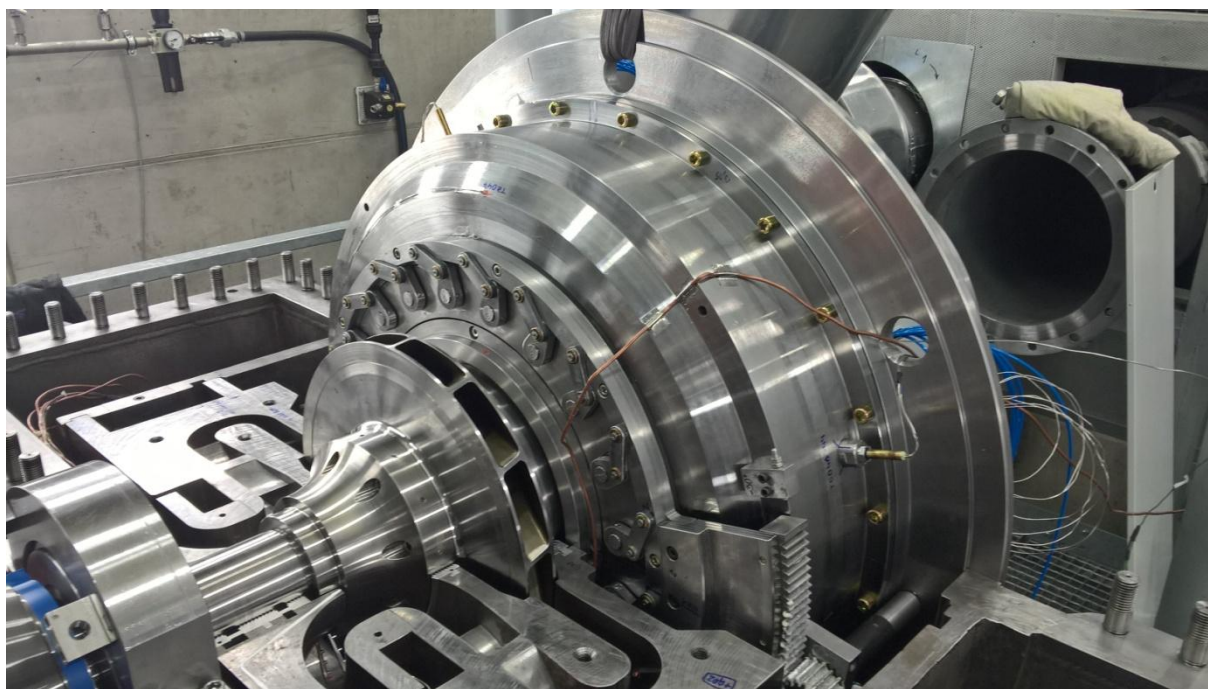
Pro účely experimentu probíhalo měření při různých teplotách stěny kanálu, rychlostech proudění a s různými typy sond. Sondy použité k tomuto účelu byly jedno až čtyřnásobné teplotní sondy standardně použité pro měření teplot ve zkušebním zařízení Darina IV. Pro účely experimentu byla navíc navržena a pomocí 3D tisku vyrobena zkušební plastová teplotní sonda.

## 2 Rešerše problematiky

### 2.1 Popis zkušebního zařízení Darina IV

Jak již bylo řečeno v úvodu, zkušební zařízení Darina IV slouží k testování prototypů jednotlivých stupňů radiálních kompresorů vyráběných firmou Howden ČKD Compressors s.r.o. Jedná se o zástavbu jednostupňového radiálního kompresoru umístěnou ve zkušební laboratoři v budově C1 VTP Plzeň.

Na rozdíl od uspořádání realizovaném v průmyslu, kdy jsou radiální kompresory ve většině případů vícestupňové, je zkušební zařízení z důvodu potřeby zjištění vlastností jednotlivých stupňů uspořádáno pouze jako jednostupňové. V zástavbě kompresoru je tedy umístěno kolo s oběžnými lopatkami, lopatkování výstupního difuzoru a vratný kanál s usměrňovacími lopatkami, v průmyslovém kompresoru sloužícími pro nasměrování proudu pracovního média na lopatkování oběžného kola následujícího stupně. Z počátku byla jednotlivá měření realizována bez rozváděcích lopatek před oběžným kolem kompresoru, ale díky rostoucím požadavkům na konkurenceschopnost byl výrobcem navržen systém variabilního rozváděcího lopatkování. Na Obr. 2 - 1 je možné vidět uspořádání zástavby v dělicí rovině se sacím ústrojím vybaveným variabilním rozváděcím lopatkováním.



Obr. 2-1 – Fotografie dělicí roviny zkušebního zařízení<sup>1</sup>

K pohonu oběžného kola kompresoru slouží asynchronní elektromotor vyrobený firmou ČKD o maximálním výkonu 1,2 [MW]. Jeho napájení probíhá prostřednictvím frekvenčního měniče, který zajišťuje plynulou změnu otáček motoru v závislosti na změně frekvence. Díky této schopnosti je možné detailně proměřit pracovní charakteristiku zkoušeného kompresoru. Elektromotor je dále přes převodovku Wikov a soustavu spojek spojen s rotorem kompresoru (Obr. 2 - 2.). Zajímavostí této převodovky je úhlopříčná dělicí rovina. Tato vlastnost vznikla kvůli prostorovým možnostem zástavby v budově, díky nimž byla převodovka konstruována na míru potřebám zkušebního zařízení. Rotor kompresoru je vybaven nákrůžkem k usazení

<sup>1</sup> Vlastní upravená fotografie

do axiálního ložiska, kompenzační hmotou pro letmo uložené kolo, místem pro usazení do radiálního ložiska, dvěma vyleštěnými místy sloužícími jako odrazová plocha pro snímače vibrací, vyvažovacími otvory a stopkou pro nalisování oběžného kola kompresoru. Každé dosud testované oběžné kolo bylo zakryté s dozadu zahnutými lopatkami.



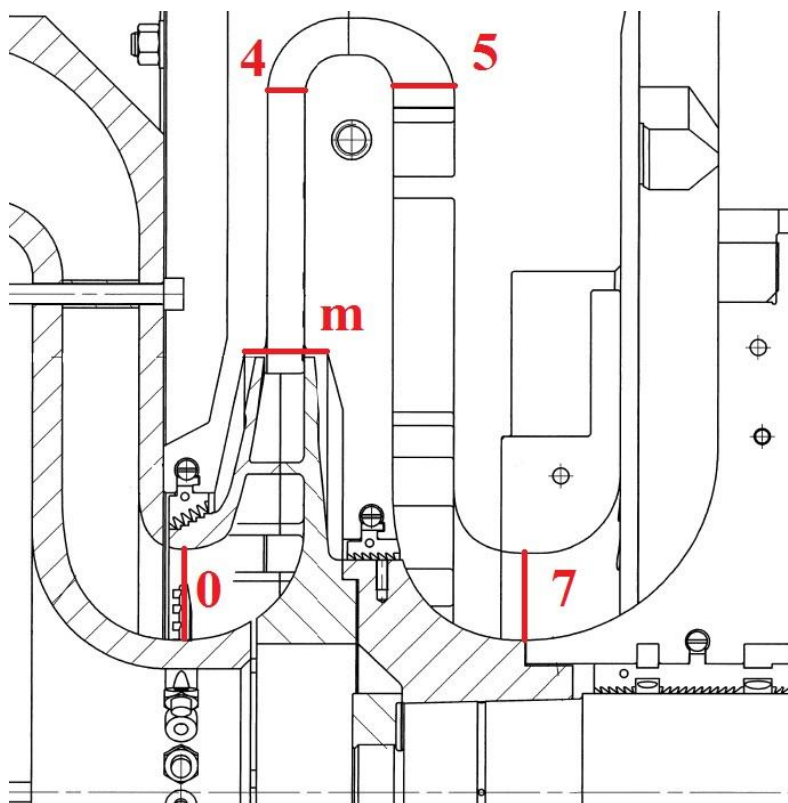
Obr. 2-2 - Rotor kompresoru<sup>2</sup>

Zkušební zařízení je dále vybaveno olejovým hospodářstvím s chladícím okruhem. Olejové hospodářství zajišťuje přívod oleje do ložisek kompresoru a elektromotoru, kterým jsou mazána a zároveň chlazena. Zajištění dostatečného průtoku oleje ložisky je zásadní pro bezpečný provoz celého zařízení a v případě poruchy olejového hospodářství dochází k jeho automatickému odstavení. Základním vybavením olejového hospodářství je olejová nádrž, filtr, cirkulační čerpadlo a topné spirály sloužící k rychlému ohřátí oleje na provozní teplotu v chladných podmínkách. Jak již bylo řečeno, součástí olejového hospodářství je chladící okruh. Tento okruh slouží k ochlazení oleje, který se zahřívá vlivem třecích ztrát v ložiscích. Jeho základním vybavením je cirkulační čerpadlo, filtr, soustava chladičů s ventilátory a tepelný výměník. Chlazení oleje má možnost dvou vzájemně propojených systému regulace teploty. Prvním z nich je osazení olejového okruhu třicestným termoregulačním ventilem, který reguluje průtok oleje do tepelného výměníku. Tímto způsobem není nutné neustále chladit celé průtočné množství oleje. Druhým je soustava chladičů s ventilátory, které lze dle potřeby jednotlivě zapínat.

## 2.2 Měření na zkušebním zařízení Darina IV

Na zkušebním zařízení probíhá měření termodynamických veličin, potřebných k vyhodnocení parametrů zkoušeného kompresorového stupně, a provozních veličin, jejichž hodnoty jsou monitorovány pro bezpečný provoz zařízení. Měření tlaků a teplot probíhá v pěti dílčích rovinách (Obr. 2 - 3). v rovině 0 na sání oběžného kola kompresoru, v rovině *m* na výtlačku oběžného kola kompresoru, v rovině 4 za difuzorem a v rovině 5 a 7 na začátku a konci vratného lopatkování. Jsou měřeny statické i celkové hodnoty tlaků a celkové hodnoty teplot. Pro doplnění jsou v místech jednotlivých měřících rovin ještě měřeny teploty stěn. Dále je v sacím a výtlačném potrubí pomocí soustavy clon měřen průtok pracovního média a doplňkové měření jeho teploty pomocí teplotních sond. Z důvodu bezpečnosti jsou měřeny vibrace rotoru kompresoru, převodovky a rotoru elektromotoru, teploty ložisek a teplota a tlak oleje a kapaliny v chladícím okruhu. [1]

<sup>2</sup> Vlastní upravená fotografie



Obr. 2-3 - Měřicí roviny<sup>3</sup>

### 2.2.1 Měření teplot

Jak již bylo v předešlé kapitole řečeno, měření teplot probíhá na zkušebním zařízení v pěti dílčích rovinách. Hodnoty jsou měřeny pomocí jedno až čtyřnásobných teplotních sond. Měření těchto teplot je důležité pro výpočet účinnosti zkoušeného kompresorového stupně. Vzhledem k dlouhodobému a téměř nepřetržitému provozu stupně ve skutečném průmyslovém kompresoru je výrobcem garantovaná účinnost pro zákazníka velice důležitá s ohledem na provozní náklady zařízení. Z tohoto důvodu je tedy nutné přesně znát měřící charakteristiku teplotních sond v závislosti na okolních podmínkách. Sondy jsou osazeny termočlánky typu K, připojených do svorkovnic a následně vedoucích do měřící ústředny. Dále jsou na zařízení měřeny teploty stěn pomocí termočlánků typu PT100. Tyto termočlánky jsou vždy po čtyřech umístěny po obvodu ve stěnách průtočného kanálu v měřících rovinách 0 a 7. Způsob rozmístění byl zvolen v závislosti na umístění teplotní sond v těchto rovinách. Hodnoty z těchto termočlánků slouží pro představu o prohřátí stroje způsobeného vlivem stlačování pracovního média v kompresorovém stupni a tedy o měřících podmínkách teplotních sond.

### 2.2.2 Konstrukce teplotních sond

Jak již bylo zmíněno, ve zkušebním zařízení Darina IV probíhá měření teplot pomocí jedno až čtyřnásobných teplotních sond celkové teploty. Těla sond umístěná ve stěně kanálu jsou duté mosazné trubičky o průměru 10 [mm] v případě vícenásobných sond nebo 8 [mm] v případě jednoduchých sond, vyplněné izolačním materiálem, ve kterém jsou umístěny drátky termočlánků vedoucí do odběrové části sondy k jednotlivým teplotním odběrům. Plášť

<sup>3</sup> Obrázek převzat a upraven z originálu [6]

odběrové části je vyroben z pochromované nerezové oceli z důvodu větší životnosti sondy. Pod pláštěm se nachází měděná trubička, ve které jsou umístěny drátky termočlánků.

Na Obr. 2 - 3 lze vidět čtyřnásobnou sondu celkové teploty a na Obr. 2 - 4 řez jednoduchou sondou celkové teploty. Teplotní sondy jsou ve zkušebním zařízení upevněny pomocí převlečného prstýnku a matice M16 x 1 (Obr. 2 - 3) dotažené do závitů umístěného ve stěně kanálu.



Obr. 2-4 - Čtyřnásobná sonda celkové teploty<sup>4</sup>



Obr. 2-5 - Řez jednoduchou sondou celkové teploty<sup>5</sup>

### 2.2.3 Měření tlaků

Měření tlaků probíhá ve zkušebním zařízení ve stejných rovinách jako měření teplot. Měření celkových tlaků je realizováno pomocí jedno až čtyřnásobných sond celkového tlaku. Statické tlaky jsou měřeny pomocí odběrových otvorů ve stěnách průtočného kanálu. Ze sond celkového tlaku a odběrů statického tlaku je tlak pracovního média veden pomocí trubiček k tlakovým snímačům. Dále jsou z důvodu měření hmotnostního průtoku pracovního média pomocí tlakových ztrát na clonách v místech před a za clonami umístěny odběry statických tlaků vedoucí do diferenčních tlakových snímačů.

### 2.2.4 Měření provozních veličin

Jak již bylo zmíněno, provozními veličinami jsou myšleny hodnoty teplot, tlaků a vibrací součástí nezbytných pro bezpečný provoz zařízení, hodnoty průtoků provozních kapalin a měření příkonu zařízení.

Přímo v zástavbě stupně kompresoru jsou měřeny teploty ložisek rotoru kompresoru a jeho vibrace. V každém z radiálních ložisek je umístěn jeden termočlánek. V axiálním ložisku jsou umístěny dva, jeden na zatížené a druhý na nezatížené straně ložiska. K měření teplot slouží

<sup>4</sup> Vlastní upravená fotografie

<sup>5</sup> Vlastní upravená fotografie

termočlánky typu PT100. K měření vibrací slouží 4 optoelektrické snímače vibrací umístěné naproti sobě, každý z jedné strany vyleštěné plochy na rotoru kompresoru. Snímače jsou vždy před prvním spuštěním zařízení zkaličkovány na určitou vzdálenost od vyleštěných ploch. Tato vzdálenost vyvozuje na snímačích napětí  $10 \pm 0,1$  [V]. Hodnota vibrací, respektive posunů rotoru kompresoru, je tedy měřena dle změny napětí na snímačích. V případě překročení maximální hodnoty vibrací stanovenou výrobcem zareaguje ochranný bezpečnostní systém a zkušební zařízení vyřadí z provozu.

Dalšími měřenými teplotami jsou teploty ložisek převodovky, ložisek elektromotoru a teploty mazacího oleje a chladicí kapaliny. Hodnotami důležitými pro samotné měření jsou hodnoty teploty oleje vstupujícího a vystupujícího z ložisek rotoru kompresoru. Podle těchto hodnot lze vypočítat jejich mechanické ztráty. Toto je jeden ze dvou způsobů, jak na zkušebním zařízení probíhá měření příkonu potřebného ke stlačení pracovního média. Vychází ze znalosti mechanické účinnosti elektromotoru, převodovky, mechanických ztrát v ložiscích rotoru kompresoru a příkonu elektromotoru. Druhým způsobem měření příkonu je pomocí dynamometru umístěného mezi převodovkou a rotorem kompresoru. Dynamometr měří otáčky rotoru a kroutící moment pomocí zkrutné tyčky. Z těchto dvou veličin lze následně dopočítat hodnotu příkonu potřebného ke stlačení pracovního média. Tato hodnota je vždy větší, než hodnota získaná první metodou, konkrétně o velikost mechanických ztrát v ložiscích rotoru kompresoru.

Posledními měřeními provozními veličinami jsou tlaky mazacího oleje a chladicí kapaliny a jejich průtoky.

### 2.2.5 Sběr a vyhodnocení naměřených dat

V předešlých kapitolách byl stručně popsán soubor měřených veličin. Aby mohly být vyhodnoceny, musí data projít určitým sjednocením. K tomuto účelu slouží měřicí ústředna Autolog 3000 od společnosti Peekel Instruments. Do této ústředny přicházejí data v podobě signálů od tlakových převodníků, svorkovnic termočlánků, dynamometru a dalších.

Pro potřeby měření tlaků slouží tlakové převodníky s rozsahem 50 - 120 [kPa] pro měřicí rovinu 0 nebo s rozsahem 80 - 270 [kPa] pro ostatní měřicí roviny. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.2 slouží pro účely měření průtoku tlaková diference na clonách. K měření této diference slouží diferenční tlakové převodníky firmy Rosemount.

V ústředně jsou data filtrována, zesilována, sjednocena a jsou prostřednictvím ethernetového kabelu odesílána do počítače ve velící místnosti, kde jsou následně vyhodnocována. K vyhodnocení naměřených dat slouží vyhodnocovací program Diagen vytvořený v prostředí LabView.[4]



### 3 Analýza naměřených dat a možných vlivů

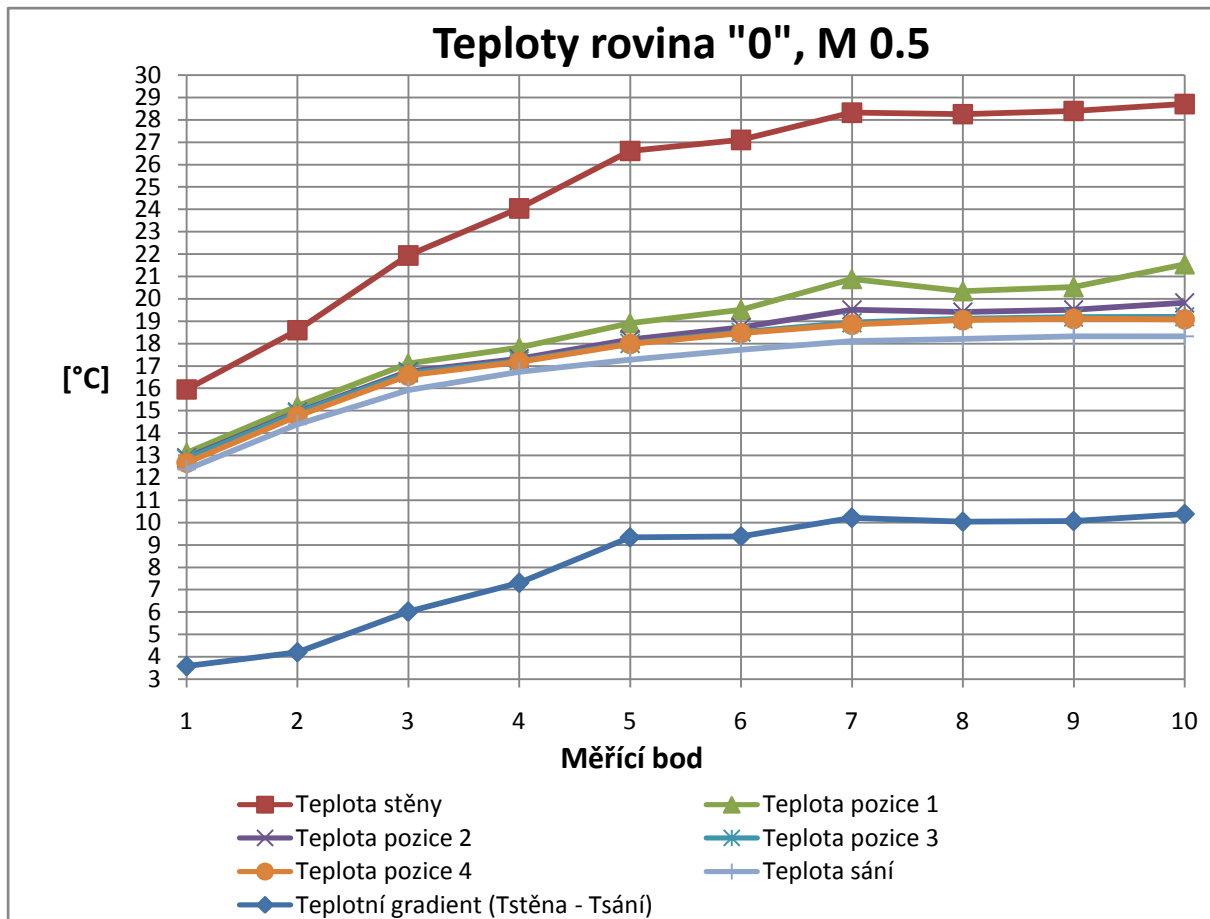
Během měření na zkušební zařízení a jeho následném vyhodnocení bylo zjištěno tepelné ovlivnění teplotních sond při určitých provozních podmínkách. Vzhledem ke skutečnosti, že výpočet termodynamické účinnosti zkoušeného kompresorového stupně je založen na znalosti teplot před a za stupněm je potřeba tyto teploty měřit co možná nejpřesněji. Bohužel nejvíce je měření teplot ovlivňováno právě v rovině  $0$ , tedy před oběžným kolem kompresoru.

Na tepelném ovlivnění teplotních sond se podílejí tři jevy, vedení, konvekce a sálání tepla. Pro tuto práci je důležité vedení tepla z materiálu stěny kanálu, ve kterém je sonda umístěna, do materiálu těla sondy. Účinky tohoto jevu na měřené hodnoty jsou ovlivněny schopností sondy se chladit pomocí proudícího vzduchu v kanálu, tedy především prostřednictvím předání přijatého tepla ze stěny do proudu obtékajícího vzduchu. Vedení tepla do sondy a jeho následné vysálání do proudu je závislé na styčné ploše v osazení sondy, na velikosti sondy, materiálu, z něhož je vyrobená, na teplotním gradientu mezi stěnou kanálu a protékajícím vzduchem a na rychlosti jeho proudění. Tepelné ovlivnění teplotních sond způsobené prostřednictvím vedení tepla je pro měření nežádoucí jev a je třeba jeho účinky minimalizovat pomocí příslušných korekcí.

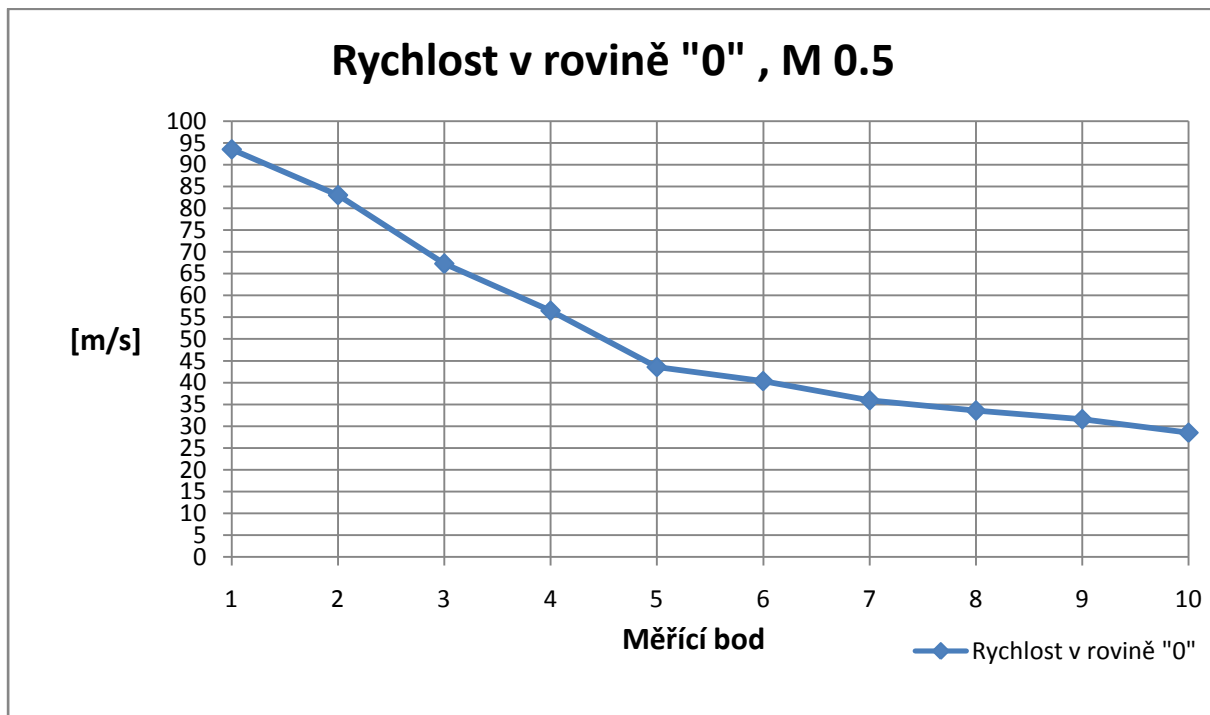
Další vliv na měřené hodnoty teplot má vznik teplotního profilu v průřezu kanálu. Teplotní profil vzniká v důsledku konvekce a sálání tepla z ohřátých stěn kanálu do proudícího vzduchu. Tento jev je přirozený běhu stroje a je naopak žádoucí ho co nejlépe proměřit, protože ovlivňuje průměrnou teplotu média na vstupu do oběžného kola kompresoru.

Účelem provedeného experimentu bylo zjistit, jak velký podíl na odchylce teploty měřené před oběžným kolem kompresoru (rovina  $0$ , příp. i 7) od měřené teploty proudícího média má vedení tepla, tedy jinými slovy odhadnout zvýšení naměřené teploty vlivem vedení tepla za různých podmínek a případně se pokusit navrhnout alespoň přibližný korekční vztah.

V Grafu 3 - 1 jsou zobrazeny naměřené hodnoty teplot v jednotlivých odběrech čtyřnásobné sondy umístěné v měřící rovině  $0$  v průběhu jednoho měření při obvodové rychlosti oběžného kola kompresoru  $0,5$  Mach na zkušebním zařízení Darina IV. [2]



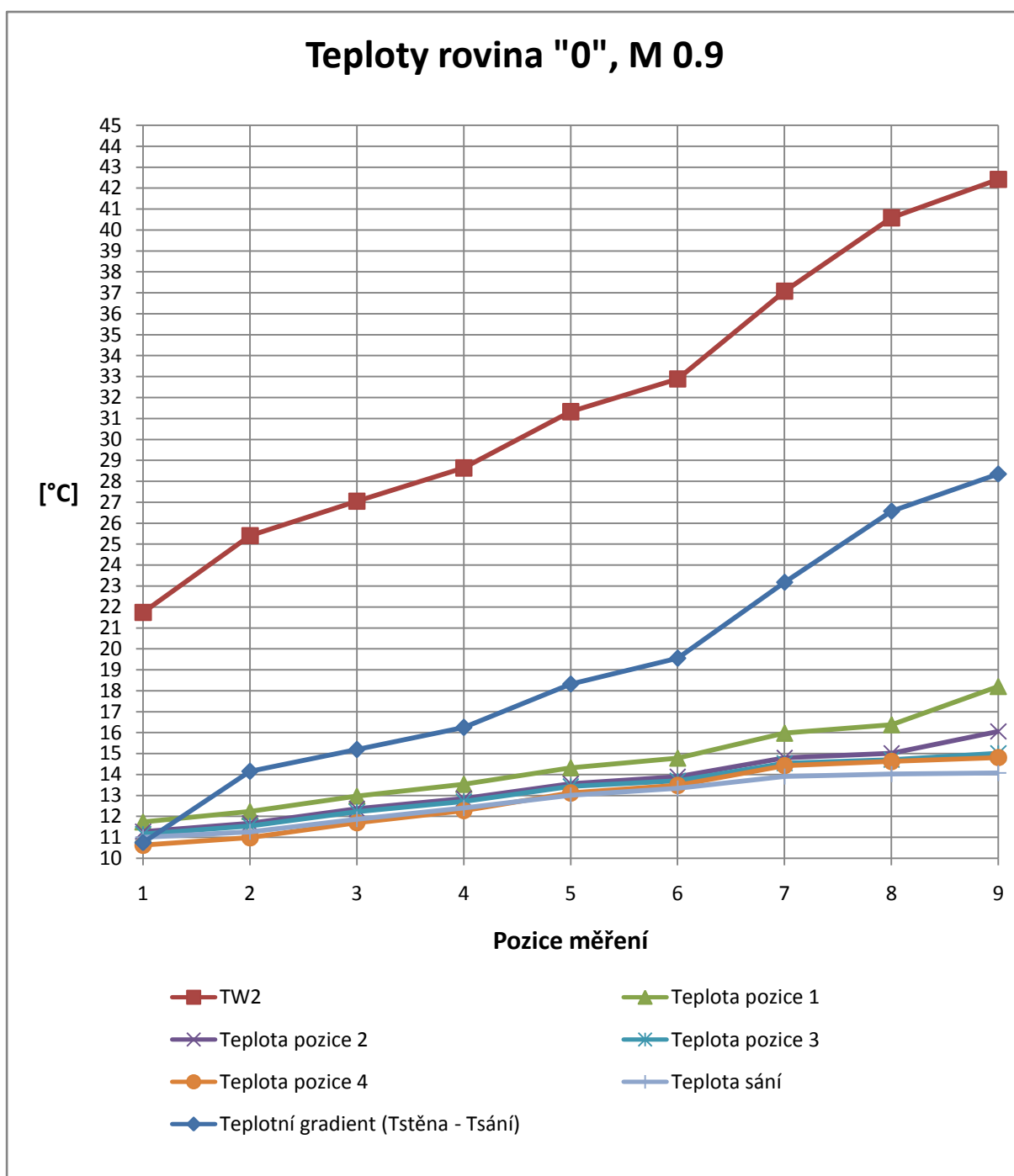
Graf 3-1 - Průběh teplot (M 0.5) - čtyřnásobná sonda



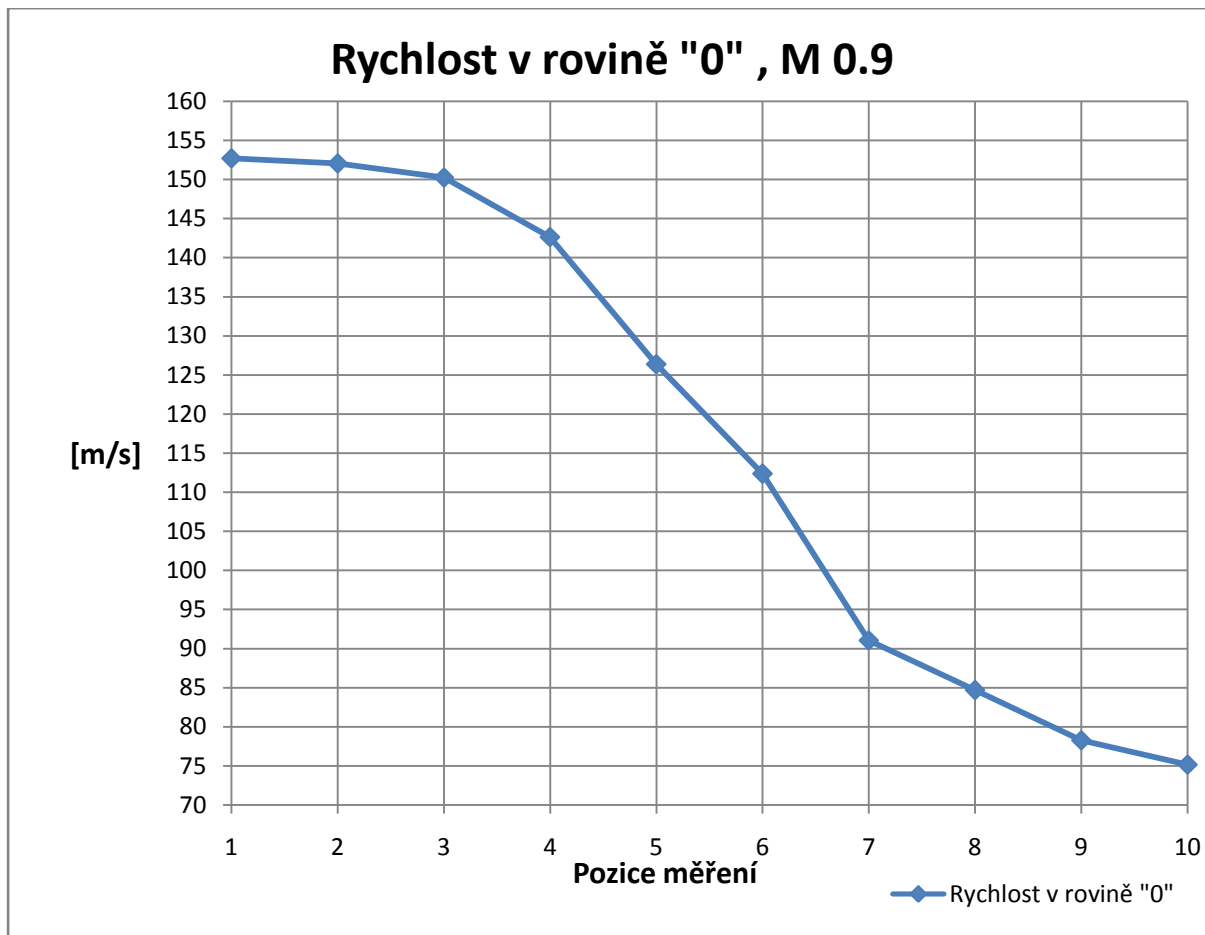
Graf 3-2 - Průběh rychlosti (M 0.5)

Z grafu 3 - 1 je patrné, že měřené hodnoty teplot v jednotlivých odběrech čtyřnásobné sondy celkové teploty se liší, obzvláště pak odběr 1. Se zvyšujícím se teplotním gradientem mezi stěnou a proudícím vzduchem a klesající rychlostí proudu vzduchu (Graf 3 -2) se odchylka tohoto odběru od ostatních neustále zvyšuje. Pro potřeby měření a následného výpočtu účinnosti testovaného kompresorového stupně se naměřené hodnoty teplot pro každou sondu průměrují ze všech jejích odběrů. Je tedy důležité, znát nepřesnosti vzniklé tepelným ovlivněním teplotních sond, protože jakákoli odchylka od skutečné teploty se přímo projeví ve výpočtu účinnosti.

V grafech jsou pro doplnění zobrazeny průběhy teplot a rychlosti v rovině 0 měřených stejnou sondou celkové teploty a ve stejné zástavbě kompresorového stupně jako v případě grafu 3 - 1 pro měření při rychlosti oběžného kola kompresoru  $Ma = 0,9$ .



Graf 3-3 - Průběh teplot (M 0.9) - čtyřnásobná sonda



Graf 3-4 - Průběh rychlosti (M 0.5)

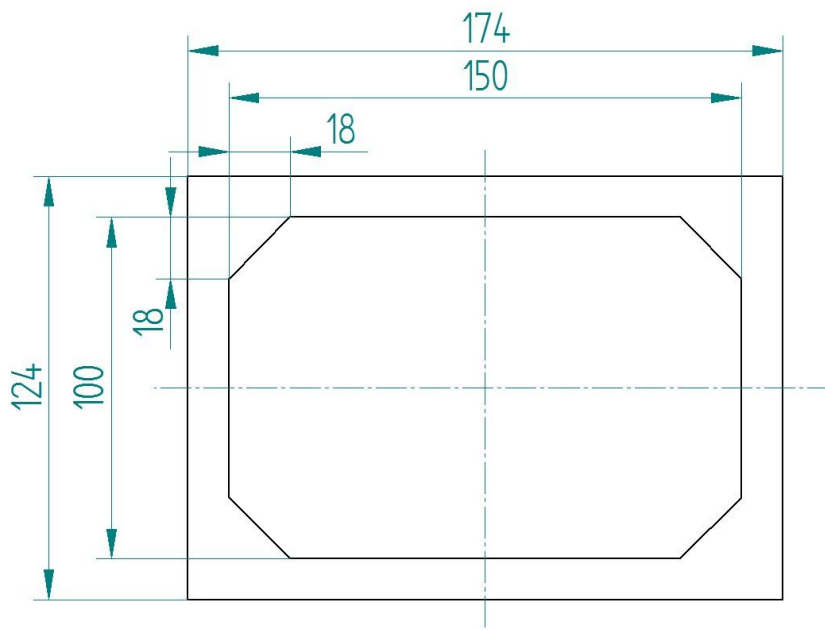
Z porovnání grafů uvedených v této kapitole vyplývá, že výrazná změna odchylky teplotního odběru 1 se projevuje v oblastech pro rychlosti proudění vzduchu v kanálu menších, než 80 [m/s]. Jakoukoli odchylku odběru 1 od ostatních odběrů při rychlostech nad 80 [m/s] lze prohlásit pouze za příčinu teplotního pole v kanálu, která se považuje za přirozený jev a nevyžaduje nutnost korekce. Z tohoto důvodu byla zvolena jako maximální rychlost proudění vzduchu pro experimentální měření hodnota 80 [m/s]. V grafech je pro doplnění také uvedena hodnota teplotního gradientu mezi stěnou a teplotou vzduchu na sání. V grafu 3 - 1 je tato hodnota v předpokládané oblasti tepelného ovlivnění sondy vedením tepla rovna cca. 10 [°C] a v grafu 3 -3 cca. 30 [°C]. Tyto hodnoty jsou v měřeních na zkušebním zařízení Darina IV nejběžnější, přičemž hodnota 30 [°C] je zároveň i hodnotou maximální, jaké bylo kdy dosaženo. Z těchto důvodů byly hodnoty teplotního gradientu mezi teplotou stěny a teplotou vzduchu 10 [°C] a 30 [°C] zvoleny jako referenční pro experimentální měření. Zvolení těchto hodnot rychlosti proudícího vzduchu a teplotního gradientu se po vyhodnocení experimentálního měření ukázalo jako správné.

## 4 Návrh konstrukčního provedení experimentálního zařízení

K otestování tepelného ovlivnění teplotních sond bylo nutné navrhnout experimentální zařízení schopné simulovat reálné měřicí podmínky, při kterých probíhá měření na zkušebním zařízení Darina IV. Za tímto účelem byla navržena jednoduchá vzduchová trať sloužící k ustálení proudění, vybavená v místě měření vytápěnou destičkou, ve které byly umístěny samotné teplotní sondy. Celé toto zařízení bylo připojeno v první fázi experimentů na sání ventilátoru umístěného v laboratoři NTC ZČU a v druhé fázi na výtlak aerodynamického tunelu umístěného v experimentální hale Doosan Škoda Power s.r.o.

### 4.1 Návrh konstrukce a montáž ustalovacího tunelu

Pro účely ustálení proudění bylo nutné navrhnout dostatečně dlouhý kanál s rozměry průřezu vhodnými pro měření teplotních sond a s otvorem pro umístění vytápěné destičky. S ohledem na rozměry teplotních sond, kdy nejdelší testovaná sonda je od stěny kanálu dlouhá 70 [mm], byla výška průřezu kanálu B zvolena na 100 [mm]. Šířka průřezu kanálu A byla zvolena s ohledem na rozměry vytápěné destičky (90 x 200 [mm]), tedy na hodnotu 150 [mm]. Pro eliminaci koutových vírů byl navržený obdélníkový průřez doplněn o koutové výplně vyrobené z broušeného borovicového dřeva s průřezem pravoúhlého trojúhelníku a rozměrech 18 x 18 [mm]. Průřez tunelu se tedy změnil z obdélníkového na osmiúhelníkový. Na Obr. 4 - 1 lze vidět výkres průřezu tunelu. Délka tunelu L byla stanovena na 4000 [mm], přičemž vzdálenost měřícího prostoru od vstupu do tunelu byla stanovena na 3200 [mm].



Obr. 4-1 - Průřez tunelu<sup>6</sup>

Jako materiál byla s ohledem na zpracovatelnost, vlastnosti a cenu zvolena broušená borovicová překližka o tloušťce  $t = 12$  [mm]. Materiál byl nařezán na kusy o zvolených rozměrech, které byly slepeny a sešroubovány ocelovými samořeznými vruty. Před konečnou montáží byly vnitřní stěny tunelu ještě ručně na jemno zbroušeny, aby se dosáhlo co

<sup>6</sup> Vlastní obrázek

nejlepších vlastností s ohledem na proudění vzduchu uvnitř tunelu. Na Obr. 4 - 2 lze vidět konstrukční provedení tunelu při montáži.



Obr. 4-2 - Montáž tunelu<sup>7</sup>

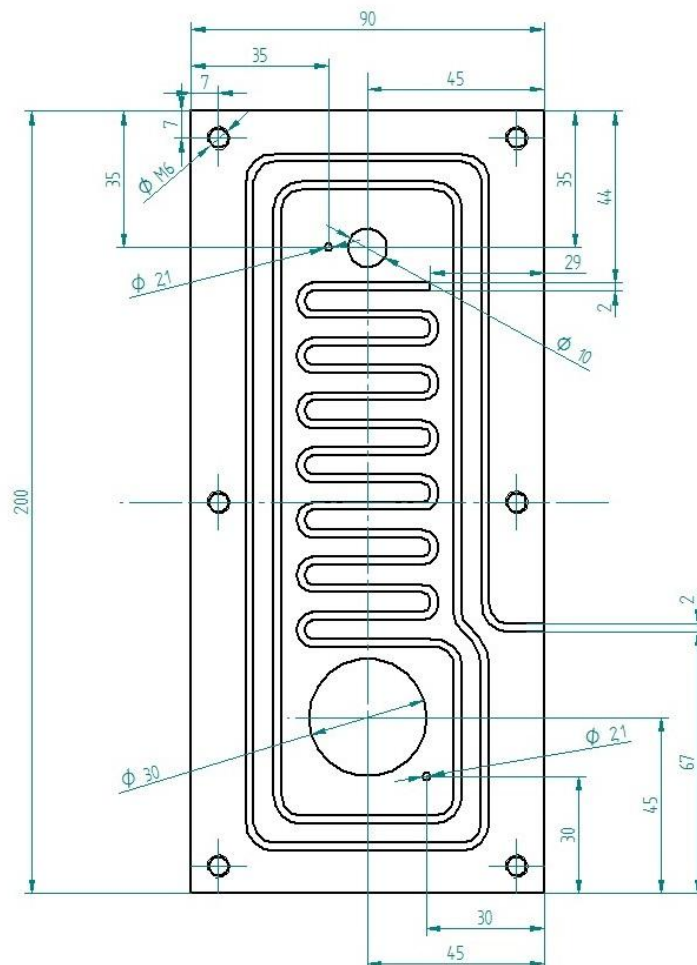
## 4.2 Návrh konstrukce a montáž vytápěné desky

Z důvodu simulace provozních podmínek teplotních sond ve zkušebním zařízení Darina IV bylo potřeba navrhnout vytápěnou ocelovou desku, do které byly následně umístěny teplotní sondy. Požadavek od zadavatele práce byl proměřit sondy při rozdílu teplot stěny a protékajícího vzduchu, dále jen gradient, 10 [°C] a 30 [°C]. Další podmínkou bylo měření při rychlostech 10, 20, 40, 60, 80 [m/s]. Vzhledem k těmto požadavkům, bylo potřeba vypočítat, jaký tepelný příkon bude potřeba na vytopení destičky na požadované hodnoty. Pro tento účel byl proveden iterační výpočet v programu MS Excel. Tento výpočet dopočítává v závislosti na zadaných parametrech vzduchu, rychlosti proudění, rozměrech kanálu a rozměrech vytápěné plochy tepelný tok mezi destičkou a proudícím vzduchem. Nejprve jsou dopočítána z kritériálních rovnic podobnostní čísla  $Re$  a  $Pr$ . Poté je z jejich znalosti dopočítáno Nusseltovo podobnostní číslo. Dále je dopočítán součinitel přestupu tepla  $\alpha$  a střední logaritmická teplota  $T_m$ . Z těchto hodnot je dopočítán tepelný tok  $Q$  a teplota vzduchu na konci destičky  $T_0$ . Je nutné zmínit, že před začátkem výpočtu tepelného toku je teplota  $T_0$  přibližně zvolena a poté zpětně dopočítána. Rozdíl mezi přibližně zvolenou a dopočtenou teplotou  $T_0$  slouží jako referenční hodnota pro výpočet. Výpočet probíhá, dokud tento rozdíl není roven nule. Podrobněji je tento výpočet popsán v uvedené literatuře a jeho praktické uplatnění je obsahem souboru "Vypocet\_Q.xlsx" v elektronické příloze k této práci. Ke kontrole výpočtu byla provedena jednoduchá CFD simulace. Rozdíl mezi tepelným tokem vypočteným v simulaci a tepelným tokem vypočteným pomocí analytického výpočtu byl roven 0,4 [W]. Pro účely vytápění desky, byla navržena drážka pro montáž topného drátu. Celková délka topného drátu byla zvolena s ohledem na jeho celkový elektrický odpor a rovnoměrné rozložení v ploše desky pro co možná nejlepší vytápěcí schopnost. Odpor drátu

<sup>7</sup> Vlastní upravená fotografie

po montáži byl změřen multimetrem UNI-T UT71B a jeho hodnota byla 4 [Ohm]. Jako napájecí zdroj byl použit průmyslový zdroj stejnosměrného napětí MeanWell SP-240-24 s maximálním výstupním napětím  $U = 24$  [V], elektrickým proudem  $I = 10$  [A], respektive maximálním elektrickým výkonem  $P = 240$  [W]. Za použití Ohmova zákona, vzorce pro výpočet elektrického výkonu a údajů o elektrickém napětí a odporu vyplývá, že drát byl napájen stejnosměrným elektrickým proudem o velikosti 6 [A], respektive poskytoval elektrický výkon 144 [W]. Tato hodnota byla plně dostačující k potřebám měření. Pro měření při maximální rychlosti proudu a gradientu 30 [°C] byl požadavek na topný výkon vypočten na hodnotu 120 [W]. [5]

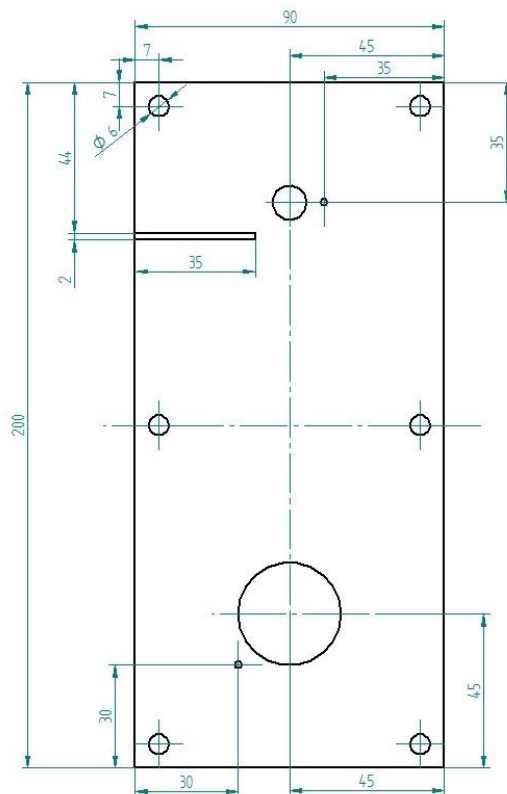
Konstrukce desky byla s ohledem na montáž a možnost rozebíratelnosti navržena formou dvou sešroubovaných desek o šířce  $a = 90$  [mm] a délce  $l = [200$  mm]. Jedna o tloušťce  $t_1 = 15$  mm a druhá o tloušťce  $t_2 = 5$  [mm]. Nejdříve byly obě dvě desky provizorně svařeny, byly do nich vyvrtány potřebné otvory a vyříznuty závity. Poté byly desky zkušebně sešroubovány a provizorní svary odstraněny. Obě části desky jsou k sobě spojeny pomocí šroubů M6. Pro osazení teplotních sond byly desky opatřeny otvory o průměru 10,1 [mm] a 30 [mm]. Do většího otvoru byl pro účely měření vsazen mezikus vyrobený ze silonu opatřený závitem M 16 x 1 a dále otvorem 10,1 [mm]. V případě menšího otvoru byla na desku navařena matice M 16 x 1. Sondy jsou v desce z důvodu co možná největší podobnosti uchyceny stejným způsobem jako ve zkušebním zařízení. Tento způsob byl popsán v kapitole 2.3.1. Deska je dále vybavena dvěma otvory o průměru 2,1 [mm] sloužícími pro umístění termočlánků snímajících její teplotu. Pro účely vytápění byla navržena a vyfrézována drážka, do které byl poté umístěn topný odporový drát. Na Obr. 4 - 3 a Obr. 4 - 4 jsou zobrazeny výkresy obou částí desky a na Obr. 4 - 5 je fotografie desky při montáži topného drátu. Ve výkresu nebyla pro přehlednost kótována drážka pro topný drát.



Obr. 4-3 - Výkres desky 15 mm<sup>8</sup>

<sup>8</sup> Vlastní obrázek





Obr. 4-4 - Výkres desky 5 mm<sup>9</sup>



Obr. 4-5 - Montáž topného drátu<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Vlastní obrázek

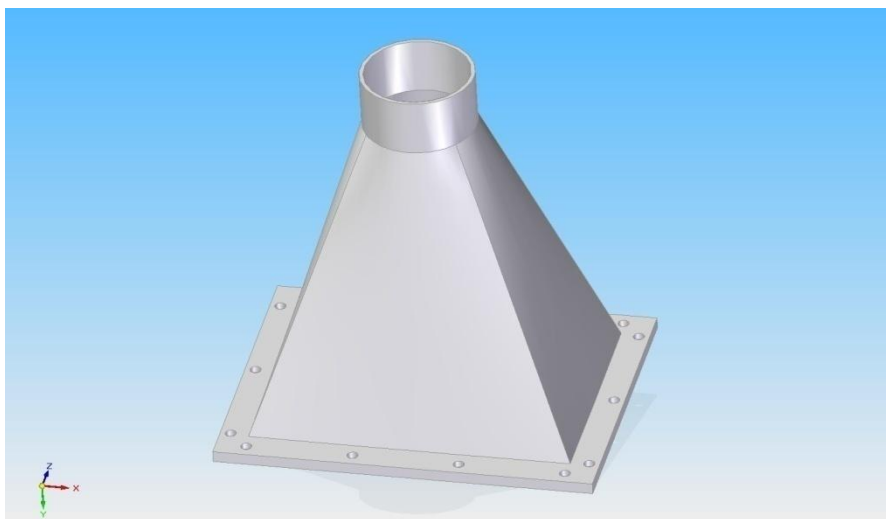
<sup>10</sup> Vlastní upravená fotografie

Pro upevnění do tunelu byly k desce přivařeny dva plechy s upevňovacími otvory a deska byla na místo upevněna pomocí ocelových samořezných vrtů. Z vnitřní strany kanálu byly přechody mezi deskou a materiálem tunelu přelepeny hliníkovou fólií z důvodu co možná nejlepšího obtékání.

### 4.3 Přechodové části

Pro účely připojení experimentálního zařízení bylo nutné navrhnout a vyrobit přechodové části.

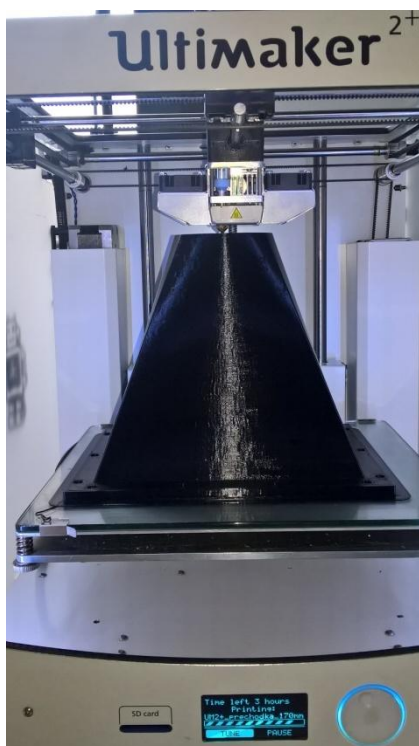
Pro případ připojení zařízení na sání ventilátoru v laboratořích NTC ZČU bylo potřeba vyrobit přechodovou část z obdélníkového průřezu o rozměrech 150 x 100 [mm] na kruhový průřez o průměru 58 [mm]. Vzhledem k umístění součásti až 600 [mm] za měřicím prostorem, zde nebylo potřeba se speciálně zabírat problematikou vlivu přechodové součásti na rozrušení proudu vzduchu. K tomuto účelu byl v CAD programu vytvořen 3D model součásti (Obr. 4 - 6). Výsledná součást byla poté vytištěna pomocí 3D tiskárny Ultimaker 2+ (Obr. 4 - 7) a k tunelu upevněna pomocí 14 šroubů M6. K upevnění této přechodové části byla vytvořena na konci tunelu příruba z hliníkových profilů.



Obr. 4-6 - CAD model, přechodová část (plastová)<sup>11</sup>

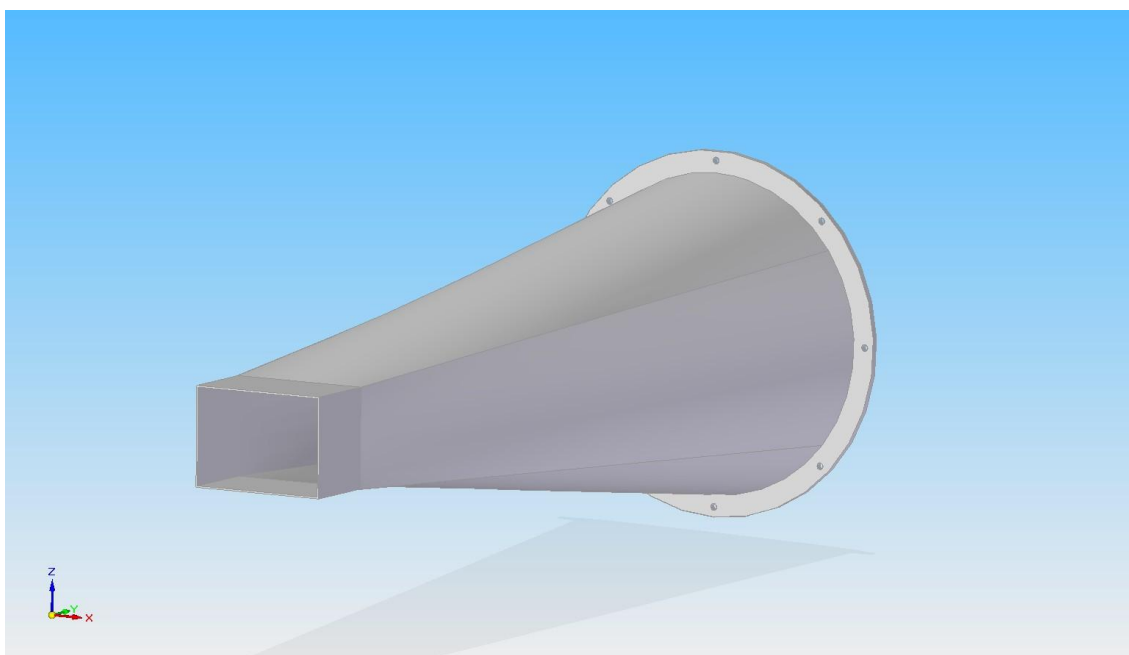
---

<sup>11</sup> Vlastní obrázek



Obr. 4-7 - Tisk přechodové části (plastová)<sup>12</sup>

V případě připojení experimentálního zařízení na výtlak ventilátoru umístěného v experimentální hale Doosan Škoda Power s.r.o bylo nutné navrhnout přechodovou část, která zajistí dostatečně plynulý přechod proudu vzduchu mezi oběma průřezy (Obr. 4 - 8).



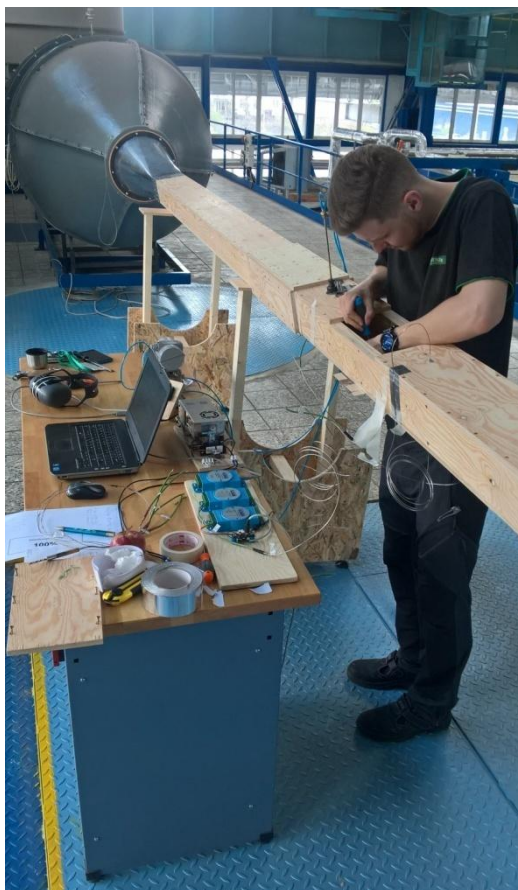
Obr. 4-8 - CAD model, přechodová část<sup>13</sup>

Součást musela být dostatečně dlouhá, aby zúžení stěny kanálu nebylo příliš velké a nedocházelo tak k odtrhávání proudu vzduchu. Dále musel být upraven tvar sací strany tunelu. Byly upraveny hrany kanálu a vytvořeno zkosení. Ke kontrole byla vytvořena

<sup>12</sup> Vlastní upravená fotografie

<sup>13</sup> Vlastní obrázek

jednoduchá CFD simulace, která prokázala, že proud vzduchu v měřicím prostoru vzdáleném 3200 mm od přechodové části je i při maximální rychlosti, pro kterou bylo měření plánováno, dostatečně ustálený. Tato přechodová část byla dle vytvořené výkresové dokumentace vyrobena z plechu externím dodavatelem. K tunelu byla upevněna pomocí osmi šroubů M8 a k experimentálnímu zařízení pomocí převlečné části s těsněním a samořeznými ocelovými vruty. Na Obr. 4 - 9 lze vidět přechodovou část s tunelem, při montáži experimentálního zařízení. Výkresová dokumentace je součástí příloh.



Obr. 4-9 - Montáž experimentálního zařízení<sup>14</sup>

## 4.4 Měření a instrumentace

Pro experimentální zařízení bylo navrženo měření důležitých veličin. Byla měřena rychlost proudění, referenční teplota proudu vzduchu, teplota vytápěné desky, teplota proudu vzduchu pomocí testovaných teplotních sond a teplota a tlak okolního vzduchu. Měřená data musela být dále sjednocena a vyhodnocena.

### 4.4.1 Měření teplot

K měření teplot proudícího vzduchu sloužily stejně jako v případě zkušebního zařízení Darina IV vícenásobné sondy celkové teploty opatřené termočlánky typu K. Stejný typ termočlánků sloužil i k měření referenční teploty vzduchu a k měření teploty vytápěné desky. V případě měření referenční teploty vzduchu sloužila k odběru jednoduchá teplotní sonda celkové teploty umístěná v protilehlé stěně kanálu vůči vytápěné desce, pro případ měření teploty desky byly použity obyčejné termočlánky "do železa". Tyto termočlánky byly v desce osazeny dva. Jeden byl umístěn v těsné blízkosti osazení zkoušené teplotní sondy a sloužil

<sup>14</sup> Vlastní upravená fotografie

jako referenční k dopočtení teplotního gradientu. Druhý termočlánek byl umístěn na opačné straně desky a sloužil jako ovládací pro regulátor vytápění ND 454, který spojoval a rozpojoval relé topného obvodu v závislosti na rozdílu měřené teploty desky a zadané teploty vytápění. Cílem činnosti regulátoru bylo udržení teploty desky na hodnotě zadané.

#### 4.4.2 Měření rychlosti

Znalost rychlosti proudícího vzduchu byla pro měření nezbytná. Pro tento účel byla 200 [mm] před měřicí prostor umístěna Prandtlova sonda (Obr. 4 - 10). Ze sondy byl odebírána statický a celkový tlak. Z difference těchto tlaků a ze znalosti hustoty vzduchu mohla být poté dopočítána rychlost.



Obr. 4-10 - Prandtlova sonda<sup>15</sup>

K měření tlakové difference z Prandtlovy sondy byl použit diferenční tlakový snímač od společnosti SMAR s označením LD301 s rozsahem nastaveným pro účely měření 0 - 30 [kPa], připojený k vyhodnocovacím modulům pomocí proudové smyčky s rozsahem 4 - 20 [mA]. Tento tlakový snímač byl před měřením zkalibrován pomocí kalibrátoru DPI 610/615 od firmy GE. V případě měření v laboratořích NTC ZČU byl z důvodu měření při rychlosti proudícího vzduchu pouze 10 [m/s] a tedy i malé tlakové diference použit tlakový převodník Model 9116 od společnosti Netscanner (Obr. 4 - 11). Správnost jeho měření byla ověřena přesným tlakovým převodníkem PX653 - 0.5D5V od společnosti Omega.



Obr. 4-11 - Tlakový převodník Netscanner<sup>16</sup>

Pro výpočet hustoty vzduchu bylo potřeba znát jeho statickou teplotu a statický tlak. Pro zjištění hodnoty statické teploty byla použita hodnota celkové teploty odebírána pro určení teplotního gradientu. Navzdor skutečnosti, že se jedná o teplotu celkovou, byla tato hodnota použita přímo bez jakéhokoliv přepočtu. Vzhledem k umístění teplotní sondy v jiné vzdálenosti od stěny kanálu nelze s jistotou říci, jaký vliv má na tuto hodnotu dynamická složka teploty. Za tímto účelem byl vytvořen kontrolní výpočet v programu MS Excel. Za použití vzorce pro korekci teplotních sond pomocí restitučních faktorů bylo zjištěno, že při maximální rychlosti proudícího vzduchu 80 [m/s], pro kterou bylo měření plánováno,

<sup>15</sup> Vlastní upravená fotografie

<sup>16</sup> Vlastní upravená fotografie

je odchylka měřené rychlosti pouze 0,4 [m/s] mezi použitou hodnotou plně statické nebo plně celkové teploty. Tato odchylka byla stanovena jako naprosto dostačující pro účely měření. Pro doplnění, v případě měření při rychlosti proudu vzduchu 40 [m/s] byla tato odchylka pouze v řádech setin [m/s].

Ke zjištění hodnoty statického tlaku v místě měření rychlosti, byl využit odběr statického tlaku z Prandtlovy sondy. Vzhledem k nedostatku tlakových převodníků z požadovaným rozsahem, byl využit diferenční tlakový převodník SMAR, pomocí kterého byla změřena tlaková diference mezi atmosférou a statickým tlakem proudícího vzduchu. Tato diference poté byla připočtena k hodnotě statického atmosférického tlaku a tím byla zjištěna hodnota statického tlaku v místě měření rychlosti. Je nutné zmínit, že takto bylo postupováno jen pro případy měření při rychlostech proudícího vzduchu 60 a 80 [m/s]. Pro nižší rychlosti měla tato tlaková odchylka na její výpočet zanedbatelný vliv.

K měření atmosférického tlaku a doplňkové teploty vzduchu byla použita meteostanice T7511 od výrobce Comet.

#### 4.4.3 Sběr dat a vyhodnocení měření

Sběr měřených dat byl na experimentálním zařízení realizován pomocí jednotek ADAM od firmy Advantech. Byly použity tři tyto jednotky (Obr. 4 - 12) Jako řídicí, komunikační a napájecí jednotka sloužil ADAM 4561, který byl přes kabel USB/ RS485 připojen k notebooku s vyhodnocovacím softwarem. Tato jednotka byla napájena prostřednictvím 24 [V] zdroje. Pro sběr dat od termočlánků byl použit ADAM 4018. Termočlánky k němu byly připojeny pomocí napět'ových vstupů s rozsahem  $\pm 15$  [mV]. Přesnost měření této jednotky je dle výrobce stanovena pro napět'ový vstup na  $\pm 0,1$  % . K účelu vyhodnocení tlakové diference byl použit ADAM 4019+. Tlakový převodník byl k jednotce připojen přes napět'ovou smyčku s rozsahem 4 - 20 [mA] a měřicím odporem 120 [Ohm]. Data byla měřena a odesílána do vyhodnocovacího notebooku se vzorkovací frekvencí 1 [Hz].



Obr. 4-12 - jednotky ADAM<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Vlastní upravená fotografie

Pro vyhodnocení naměřených dat byl vytvořen program v prostředí LabView. Program dopočítával rychlost proudění vzduchu v tunelu z měřené tlakové diference z Prandtlovy sondy a ze zadaných hodnot statického tlaku a teploty proudícího vzduchu. Dále v něm bylo možné sledovat průběhy jednotlivých měřených teplot a rychlostí v čase prostřednictvím vykreslování do grafu. Pro usnadnění měření byl dále do grafu vykreslován i průběh hodnoty teplotního gradientu.

## 5 Testování vlastností sond

### 5.1 Metodika měření

Měření tepelného ovlivnění sond celkové teploty na experimentálním zařízení bylo provedeno v závislosti na podmínkách měření na zkušebním zařízení Darina IV. Cílem bylo co nejlépe simulovat skutečné měřicí podmínky v celém jejich spektru. Po konzultaci s vedoucím práce, byla stanovena série měření pro rychlosti proudícího vzduchu 10, 20, 40, 60, 80 [m/s] a teplotním gradientu 10 a 30 [°C]. Vzhledem k četnosti použití při měřeních na zkušebním zařízení byly proměřeny vlastnosti dvou kovových vícenásobných sond celkové teploty se čtyřmi odběry a prototypu vícenásobné plastové sondy celkové teploty se třemi odběry vyrobené pomocí metody 3D tisku na NTC ZČU. Jako doplňující bylo provedeno měření jednoduché sondy celkové teploty s deflektorem a jednoduché sondy celkové teploty bez deflektoru, ale pouze při rychlosti proudícího vzduchu 10 [m/s]. Dále je nutné zmínit, že měření bylo provedeno pro dva typy upevnění teplotních sond. V prvním případě byly sondy upevněny přímo v materiálu vytápěné desky, tedy stejným způsobem jako je tomu při měření na zkušebním zařízení Darina IV. V druhém případě byla z důvodu testování vlivu na tepelné ovlivnění sond použita silonová vložka o průměru 30 [mm] vložená mezi materiál vytápěné desky a teplotní sondu.

Po upevnění sondy na místo byly její termočlánky zapojeny do měřicí instrumentace a mohlo se přejít k samotnému měření. Nejdříve bylo nutné namontovat vnější izolaci vytápěné desky. Poté byla zapojena měřicí instrumentace do elektrické sítě a byla ověřena její správná funkce. Následně byl spuštěn ventilátor pro generování proudu vzduchu, který byl prostřednictvím frekvenčního měniče nastaven na otáčky odpovídající požadované rychlosti proudu vzduchu. V měřicím programu byl vytvořen soubor pro ukládání dat a bylo spuštěno měření, prozatím v režimu s vypnutým ukládáním. Dále byla na regulátoru zvolena teplota vytápění desky a byl sledován vývoj teplotního gradientu. Po ustálení hodnot teplot proudícího vzduchu a teplotního gradientu byl měřicí program přepnut na režim ukládání dat. Jednotlivá měření probíhala cca 180 [s], tedy při vzorkovací frekvenci 1 [Hz] bylo pořízeno 180 hodnot pro každou měřenou veličinu. Je nutné zmínit, že měření probíhala vždy za podmínky, kdy byla měřená teplotní sonda umístěna v prvním upevňovacím otvoru ve směru proudu vzduchu. Takto se předešlo ovlivnění sondy vlivem teplotního pole vzniklého nad vytápěnou deskou. Tato skutečnost byla potvrzena kontrolním měřením, které je zmíněné v kapitole 5.7. Dle této metodiky měření byla stanovena předpokládaná doba na jedno měření včetně časových režii na montáž sond, otočení vytápěné desky a ustalování teplot cca 30 min, celkově tedy cca 30 hodin. Reálně tato hodnota vystoupila na cca 35 hodin.

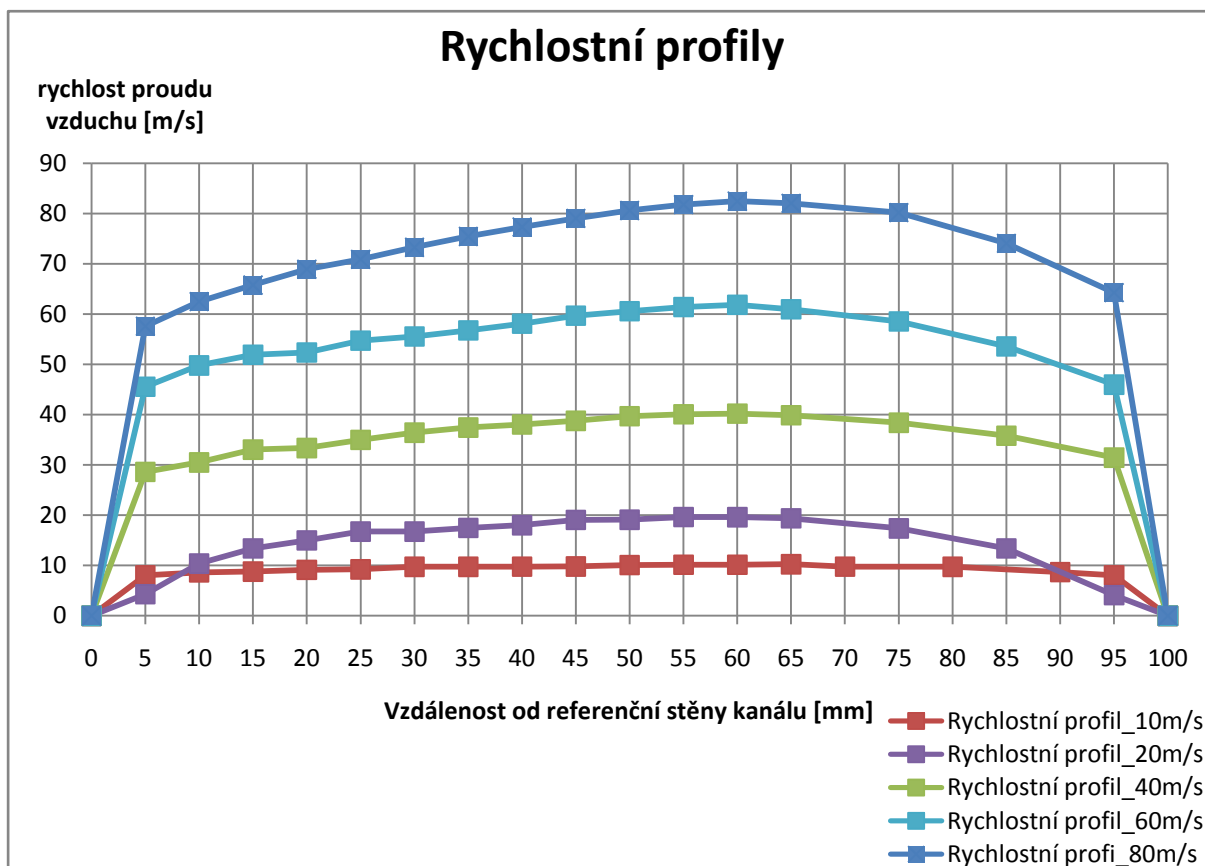
Jako doplňující a kontrolní bylo pro každou ze zvolených rychlostí proudu vzduchu provedeno měření rychlostního profilu v kanálu pomocí traverzování Prandtlovy sondy po vertikální ose. Počátek měření byl zvolen ve vzdálenosti 5 [mm] od stěny kanálu, ve které byly umístěny zkoumané sondy celkové teploty. Krok posuvu byl zvolen 5 [mm] až do hodnoty 70 [mm] od zmíněné stěny kanálu. Tato hodnota byla zvolena s ohledem na délku nejdelší zkoumané sondy, jež byla 68 [mm]. Od hodnoty 70 [mm] byl v zájmu zrychlení měření zvětšen krok posuvu Prandtlovy sondy na 10 [mm].

Celkově bylo provedeno 60 měření vícenásobných sond celkové teploty, 8 doplňujících měření jednoduchých sond celkové teploty a 5 měření rychlostních profilů. Jak již bylo řečeno, měření bylo rozděleno z důvodu strojního vybavení do dvou etap. Měření při rychlosti proudícího vzduchu 10 [m/s] byla provedena v laboratořích NTC ZČU a zbylá měření byla provedena v experimentální hale Doosan Škoda Power s.r.o.



## 5.2 Rychlostní profily

Jak již bylo zmíněno, byly pro účely měření proměřeny rychlostní profily při všech zvolených rychlostech proudu vzduchu. Z grafu 1 je patrné, že rychlostní profil pro rychlost 10 [m/s] byl měřen při zapojení experimentálního zařízení na sání ventilátoru a zdá se být téměř nezdeformovaný. Naproti tomu rychlostní profily pro rychlosti 20 - 80 [m/s] byly měřeny při zapojení experimentálního zařízení na výtlačku z ventilátoru a je možné, že díky této skutečnosti jsou lehce zdeformované. Pro účely měření je tato odchylka od ideální křivky rychlostního profilu naprosto dostačující. Cílem bylo zjistit velikost rychlosti proudícího vzduchu v odběrových místech teplotních sond a také zda není rychlostní profil nějakým způsobem výrazně deformovaný s ohledem na informaci o ustálení proudění v místě měření.



Graf 5-1 - Rychlostní profily

### 5.3 Krátká čtyřnásobná sonda celkové teploty

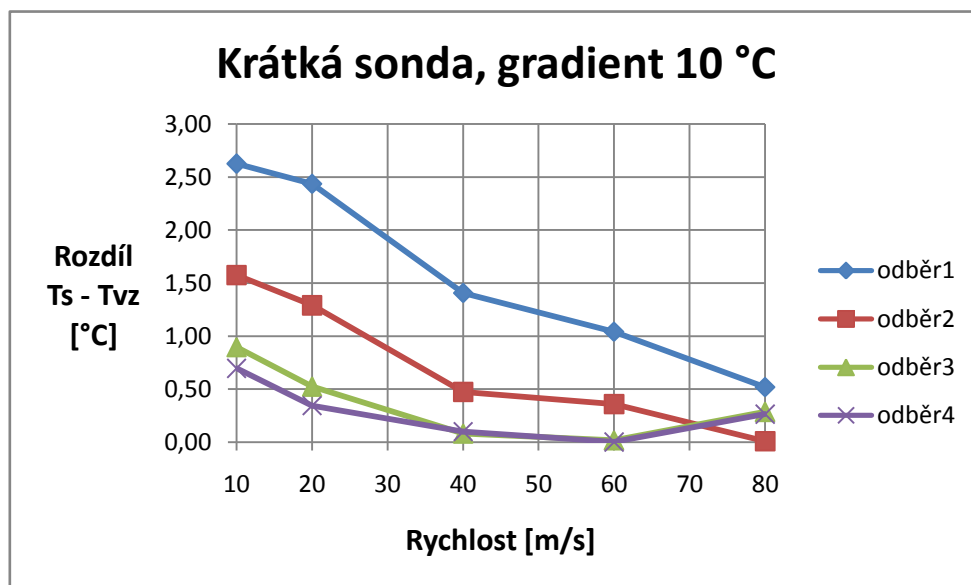
Jak již bylo zmíněno, při měření byly použity dvě kovové čtyřnásobné sondy celkové teploty. Tyto sondy reprezentují celou sadu sond různých délek používaných při měřeních na zkušebním zařízení Darina IV. Pro účely měření byly označeny jako "krátká" a "dlouhá". Tyto názvy nemají nic společného s výrobním označením.

Krátká čtyřnásobná sonda celkové teploty (Obr. 5 - 1) má celkovou délku 122 [mm]. Délka dřívku, za který je sonda uchycena ve stěně je 80 [mm] a jeho průměr je 10 [mm]. Zbylá část, tedy 42 [mm], která je umístěna v proudu vzduchu je osazena odběry celkové teploty. Tato část má u paty obdélníkový průřez o stranách 4 a 6 [mm], ke špičce se zužuje až na čtvercový průřez o straně 4 [mm]. Průřez je orientován užší stranou kolmo k proudu vzduchu. Jednotlivé odběry jsou v odběrové části sondy rozmístěny ve vzdálenostech 6, 16, 26 a 38 [mm] od stěny kanálu, přičemž odběr nejbližší u stěny kanálu je odběr 1 a nejdále odběr 4.



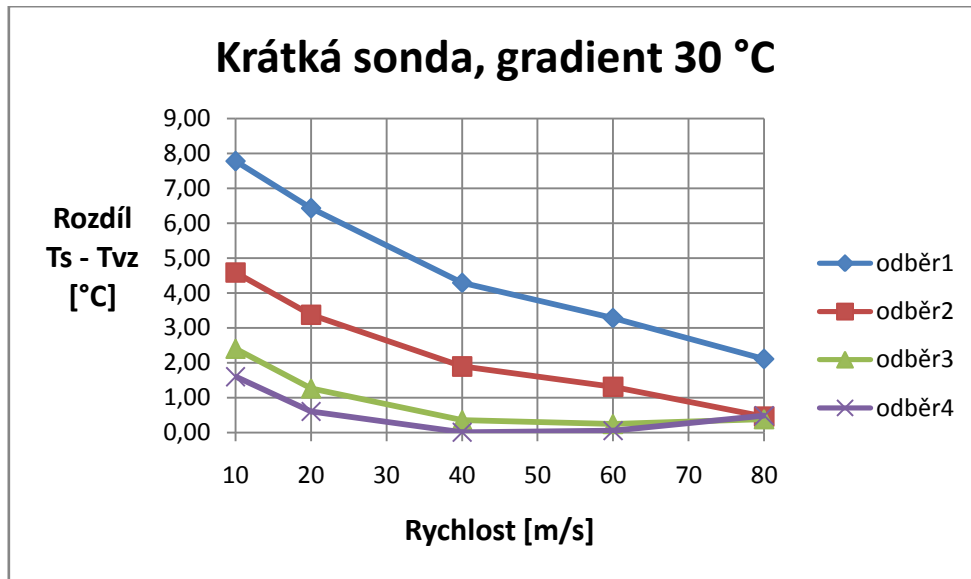
Obr. 5-1 - Krátká čtyřnásobná sonda celkové teploty<sup>18</sup>

Po provedení měření se tento typ sondy ukázal jako nejvíce náchylný k teplotnímu ovlivnění. V následujících grafech jsou zobrazeny průběhy teplotního rozdílu mezi teplotami měřenými v jednotlivých odběrech krátké čtyřnásobné sondy a referenční teplotou měřenou jednoduchou sondou celkové teploty.

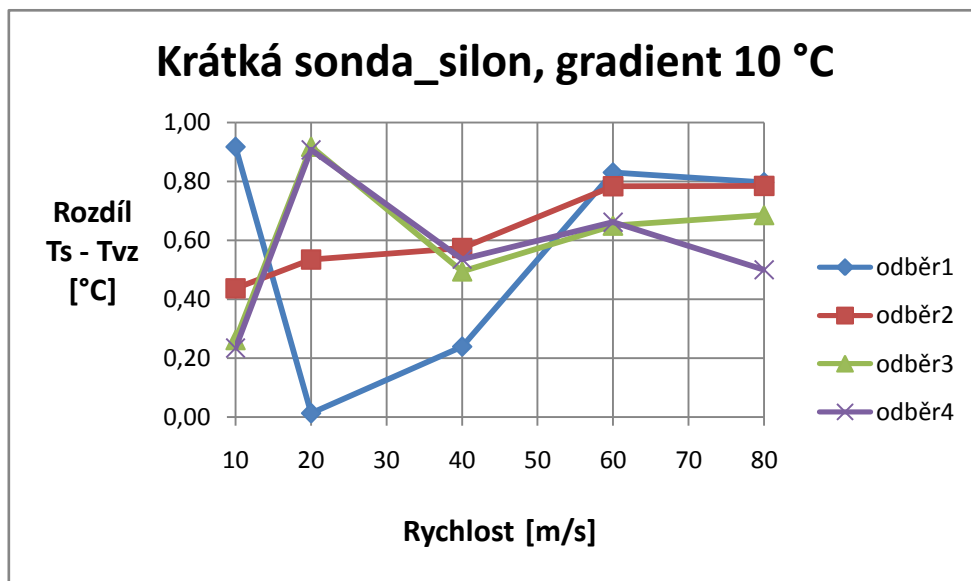


Graf 5-2 - Krátká sonda gradient 10 °C

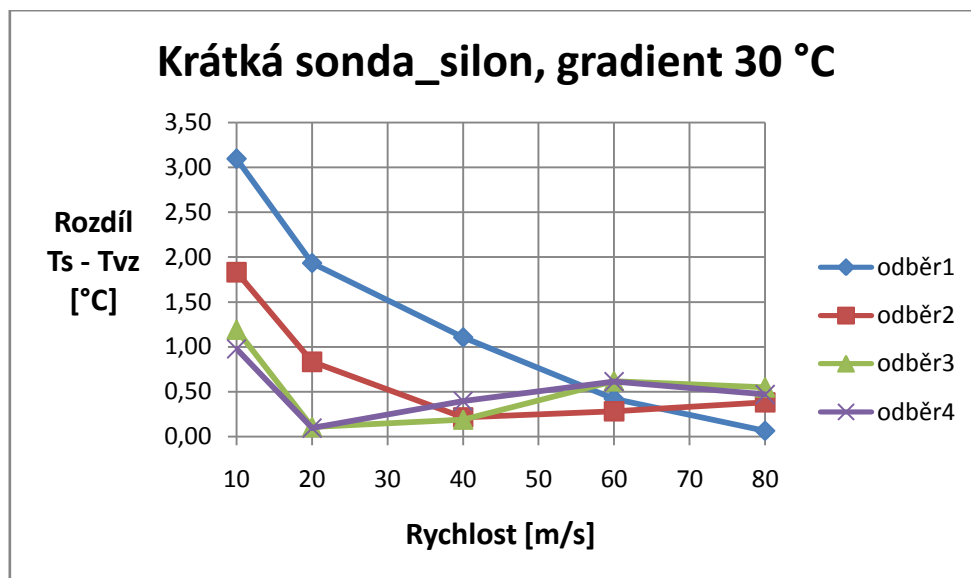
<sup>18</sup> Vlastní upravená fotografie



Graf 5-3 - Krátká sonda gradient 30 °C



Graf 5-4 - Krátká sonda\_silon gradient 10 °C



Graf 5-5 - Krátká sonda\_silon gradient 30 °C

Z grafů je patrné teplotní ovlivnění sondy celkové teploty pro obě měření provedená s osazením testované sondy přímo v materiálu vytápěné desky a pro měření provedené s osazením v silonové vložce při teplotním gradientu 30 [°C]. V případě měření v silonové vložce a teplotním gradientu 10 [°C] lze prohlásit, že je ovlivněný pouze první odběr a to jen pro případ měření při rychlosti proudění vzduchu v kanálu 10 m/s. S ohledem na přesnost měření v experimentálním zařízení a potřeby měření na zkušebním zařízení Darina IV bylo stanoveno, že odchylka v rozptylu do 1 [°C] podél sondy je zanedbatelná a měření může být v tomto případě prohlášeno za neovlivněné. Naproti tomu průběh teplotního rozdílu pro měření s osazením sondy v materiálu desky a gradientu 30 [°C] zobrazený v grafu 5 - 3 je značně znepokojivý. Za tepelně neovlivněné lze pro tento případ označit pouze odběry 3 a 4 a to až od rychlosti proudění vzduchu v kanálu 30 [m/s] a větší. Odběr 1 je pro tento případ nepoužitelný v celém rozsahu rychlostí a odběr dva lze prohlásit za neovlivnění pouze v případě 80 [m/s]. V případě rychlosti proudění vzduchu v kanálu do 30 [m/s] lze konstatovat, že je za daných podmínek tento typ sondy k měření nevhodný anebo je potřeba ho určitým způsobem korigovat. Tyto podmínky měření nejsou zcela běžné, bohužel při některých měřeních na zkušebním zařízení Darina IV reálně nastávají.

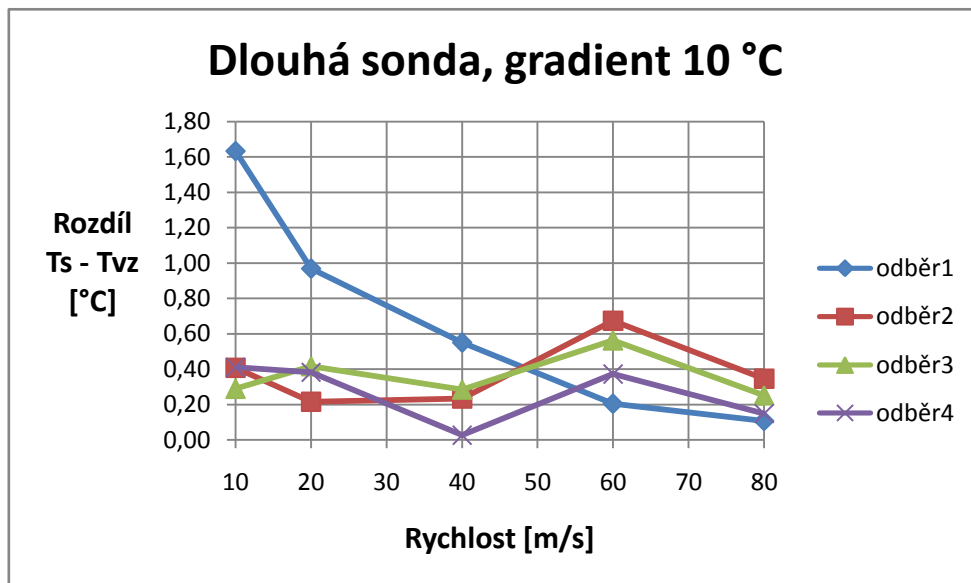
## 5.4 Dlouhá čtyřnásobná sonda celkové teploty

Jako další testovaná sonda byla zvolena nejdelší čtyřnásobná sonda (Obr. 5 - 2) používaná při měřeních na zkušební zařízení Darina IV. Pro účely měření byla pojmenována jako "dlouhá". Její celková délka je 130 [mm]. Průměr dřívku je 10 [mm] jeho délka je 60 [mm] a délka části s odběry je 70 [mm]. Odběry jsou umístěny ve vzdálenostech 8, 25, 44, 66 [mm] od stěny kanálu. Zbylá konstrukce sondy a značení odběrů je totožné jako v případě krátké sondy celkové teploty.



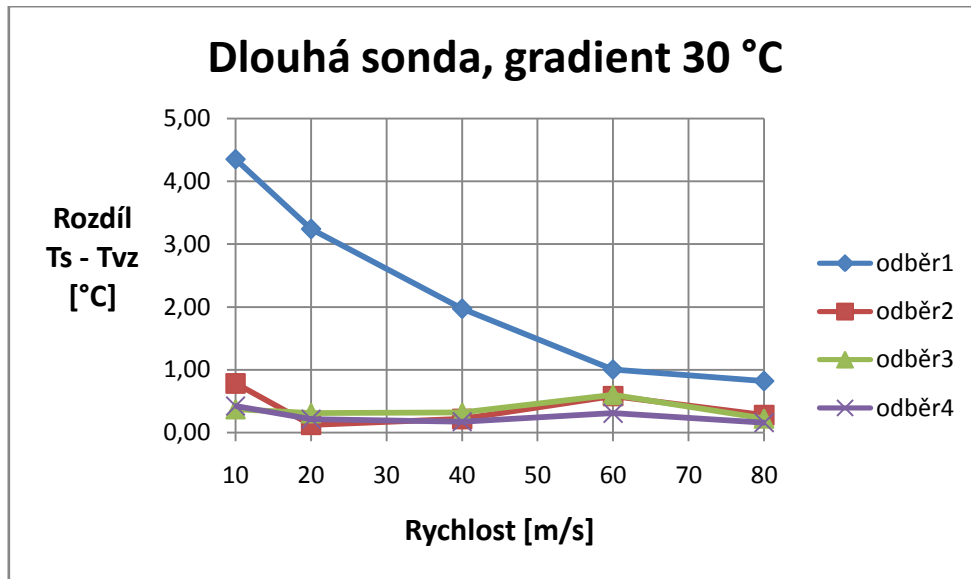
Obr. 5-2 - Dlouhá čtyřnásobná sonda celkové teploty<sup>19</sup>

Po provedení měření se dlouhá sonda celkové teploty ukázala jako málo náchylná k teplotnímu ovlivnění s nutností korekce pouze prvního odběru nejbliže stěny kanálu. V následujících grafech jsou zobrazeny průběhy teplotního rozdílu mezi teplotami měřenými v jednotlivých odběrech dlouhé čtyřnásobné sondy a referenční teplotou měřenou jednoduchou sondou celkové teploty.

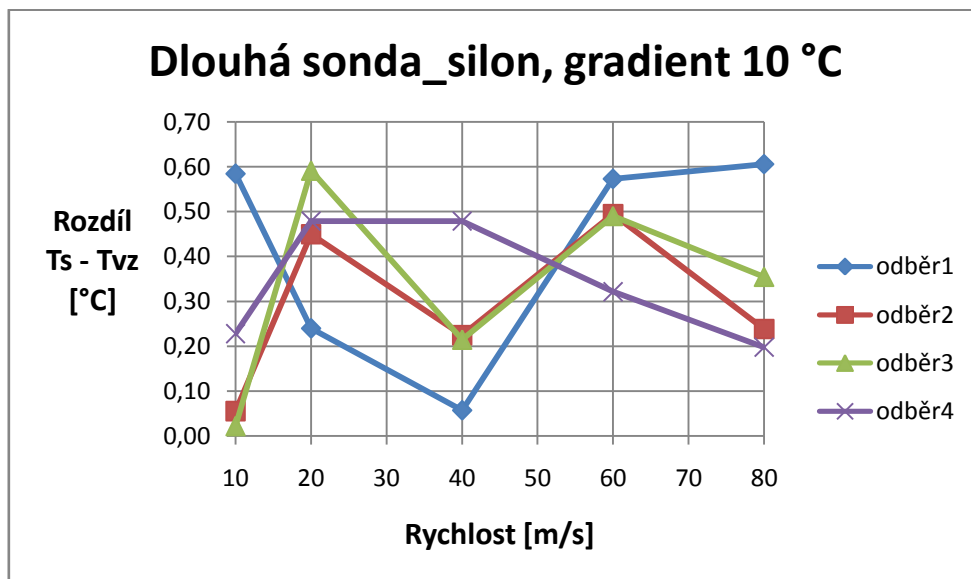


Graf 5-6 - Dlouhá sonda gradient 10 °C

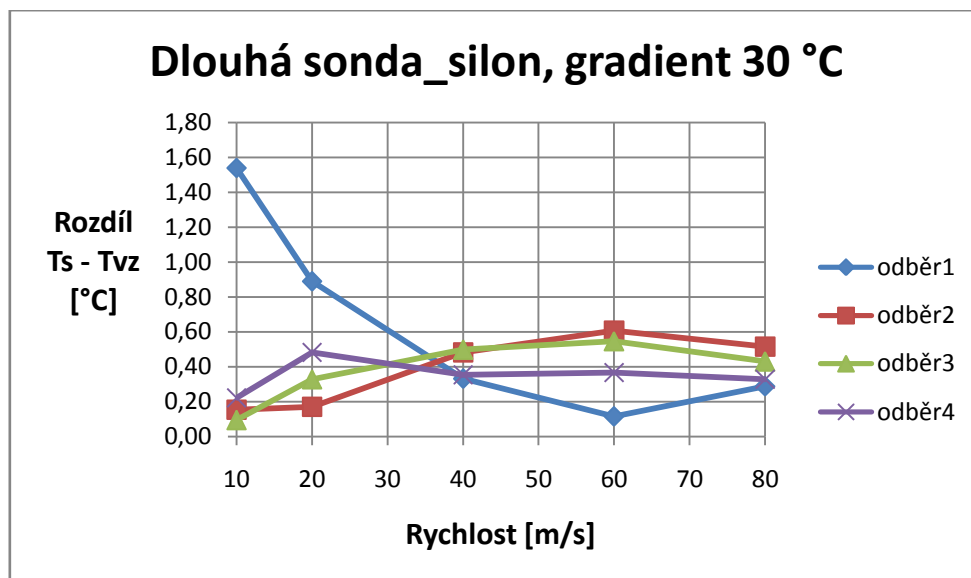
<sup>19</sup> Vlastní upravená fotografie



Graf 5-7 - Dlouhá sonda gradient 30 °C



Graf 5-8 - Dlouhá sonda\_silon gradient 10 °C

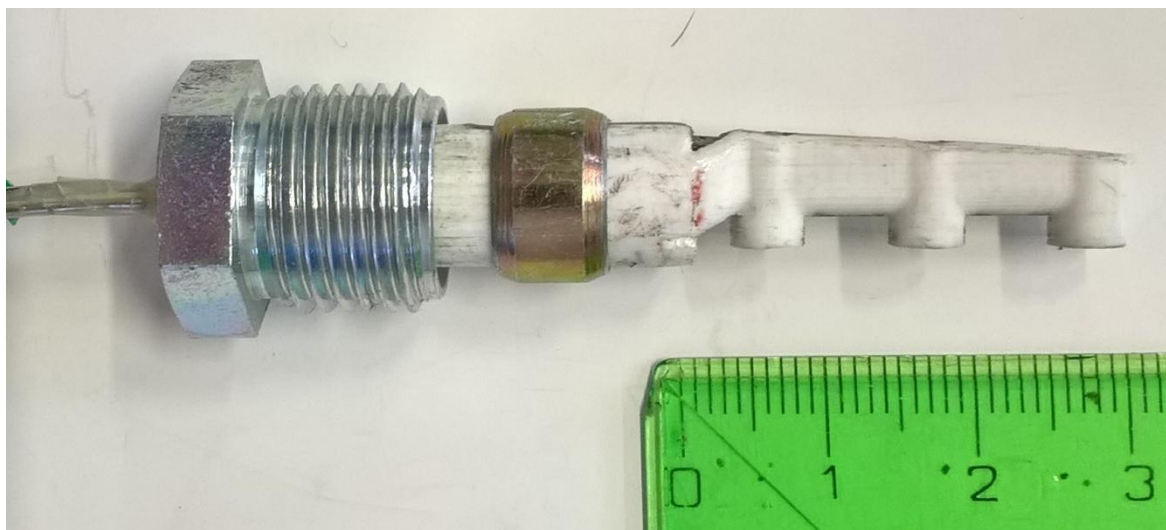


Graf 5-9 - Dlouhá sonda silon gradient 30 °C

Z grafů 5 - 6,7 a 8 vyplývá, že pro tyto případy měření je nutná korekce prvního odběru. V případě měření při teplotním gradientu 10 [°C] lze říci, že nutná korekce je do rychlosti proudícího vzduchu v kanále 40 [m/s] a za předpokladu standardního osazení sondy přímo do materiálu desky. V případě použití silonového mezikusu lze prohlásit sondu při těchto podmínkách za tepelně neovlivněnou. V případě měření při gradientu 30 [°C] a standardním osazením sondy je odběr 1 ovlivněn pro celý rozsah rychlostí. Tento problém lze v případě měření na zkušebním zařízení Darina IV řešit buď korekcí odběru anebo jeho vyčleněním z měření. V případě použití silonové vložky lze říci, že je první odběr ovlivněn pouze do rychlosti 30 [m/s].

## 5.5 Plastová trojnásobná sonda celkové teploty

Pro účely měření vlivu tepelného ovlivnění sond celkové teploty byla na NTC ZČU navržena a pomocí metody 3D tisku vyrobena plastová trojnásobná sonda celkové teploty (Obr. 5 - 3). Tato sonda byla vyrobena jako zkušební prototyp za účelem nalézt vhodnou náhradu za krátkou čtyřnásobnou sondu celkové teploty. Její konstrukce je v některých částech odlišná, oproti standardním kovovým sondám. Celková délka této sondy je 64 [mm]. Délka dřívku je 35 [mm] a délka části s odběry je 29 [mm]. Odběry jsou umístěny ve vzdálenostech 6, 16 a 26 [mm] od stěny kanálu. Odlišností je konstrukce paty odběrové části. V tomto místě je sonda vybavena přechodovou částí, která má za úkol minimalizovat vedení tepla z dřívku sondy do odběrové části (Obr. 5 - 4). V této části je využito co nejméně materiálu a její konstrukce umožňuje chlazení termočládku a materiálu odběrové části. Toto opatření s sebou ale také nese nutnost zvýšené opatrnosti při manipulaci a montáži sondy.



Obr. 5-3 - Plastová trojnásobná sonda celkové teploty<sup>20</sup>

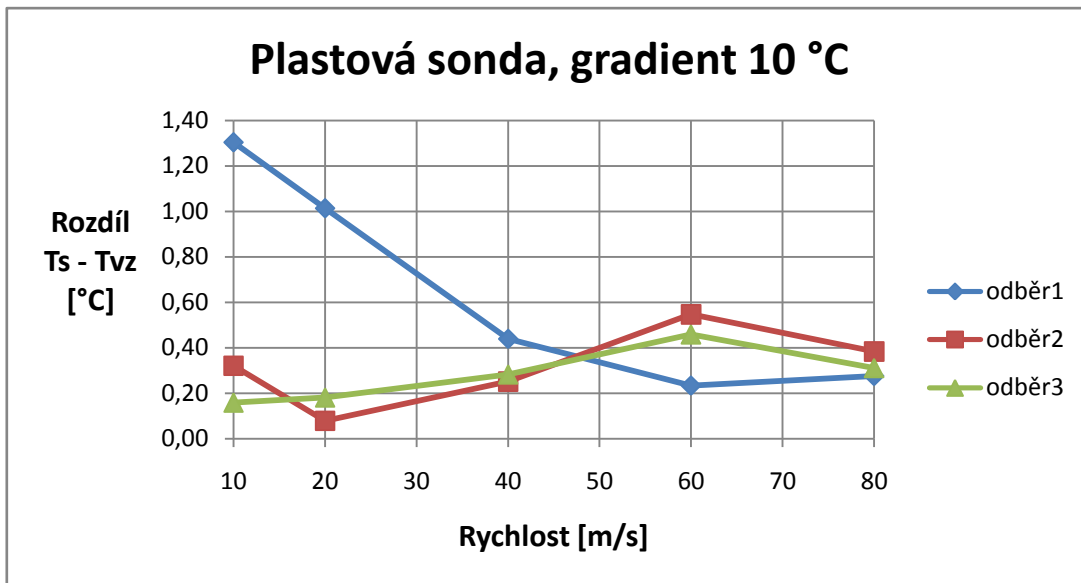


Obr. 5-4 - Přechodová část

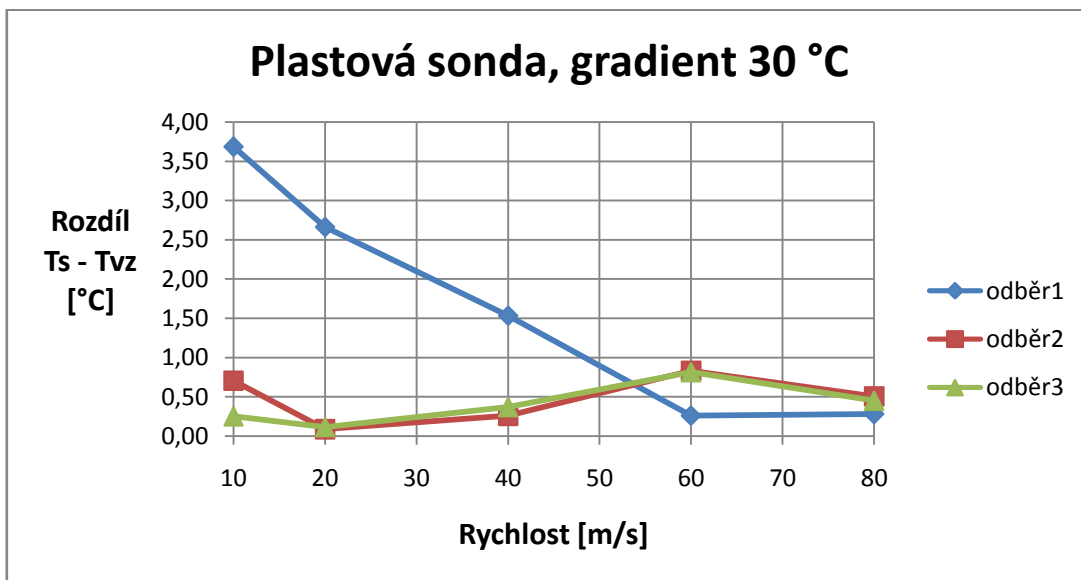
Měření tepelného ovlivnění trojnásobné sondy ukázalo, že tato sonda dosahuje jednoznačně lepších výsledků než krátká čtyřnásobná sonda, ale stále je třeba počítat v případě prvního odběru s dodatečnou korekcí. V následujících grafech jsou zobrazeny průběhy teplotního rozdílu mezi teplotami měřenými v jednotlivých odběrech plastové trojnásobné sondy a referenční teplotou měřenou jednoduchou sondou celkové teploty.

<sup>20</sup> Vlastní upravená fotografie

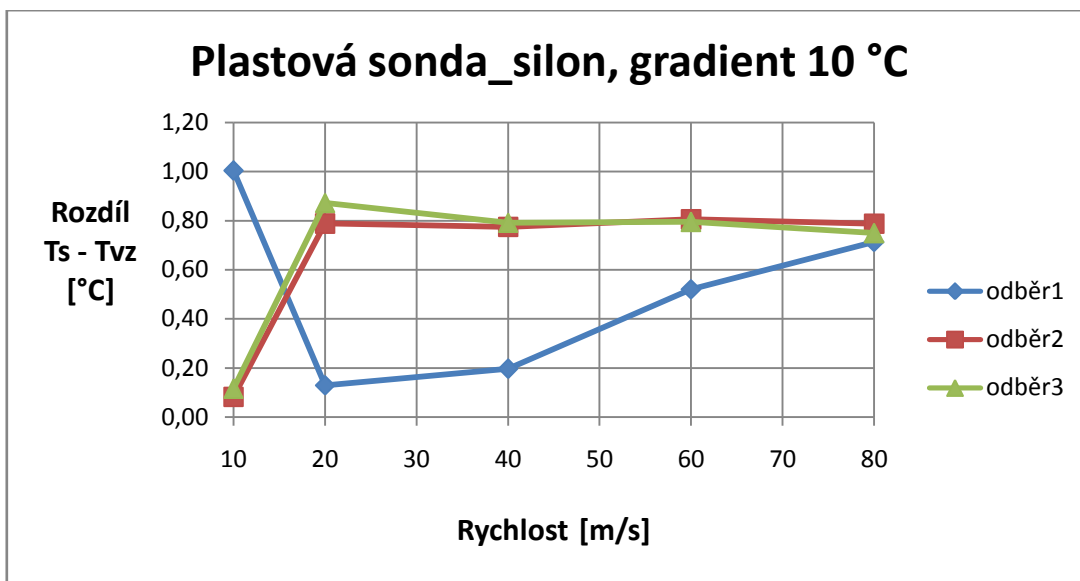




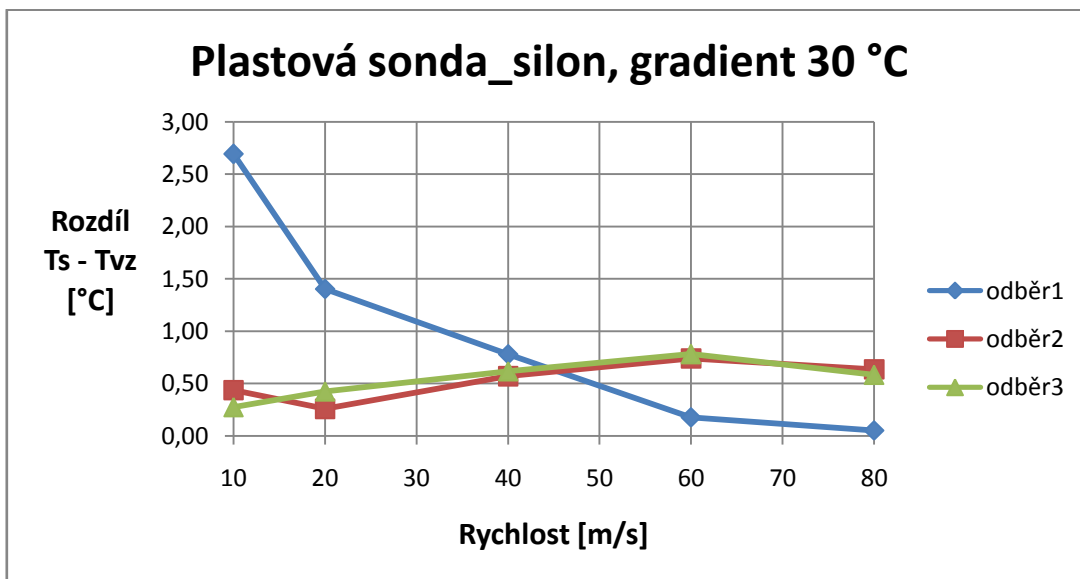
Graf 5-10 - Plastová sonda gradient 10 °C



Graf 5-11 - Plastová sonda gradient 30 °C



Graf 5-12 - Plastová sonda\_silon gradient 10 °C



Graf 5-13 - Plastová sonda\_silon gradient 30 °C

Z uvedených grafů lze vypožorovat, že plastová trojnásobná sonda je v porovnání s krátkou čtyřnásobnou sondou použitelná pro měření při všech provozních podmínkách. Je nutné ale zmínit, že je zde stále velké tepelné ovlivnění odběru 1 a je nutné ho korigovat nebo odstranit z měření. Oproti krátké sondě je ale nespornou výhodou, že odběry 2 a 3 nejsou ovlivněné za všech měřených provozních podmínek. Sondu lze tedy využít pro měření na zkušebním zařízení Darina IV při dodržení určitých pravidel plynoucích z tohoto experimentálního měření.

## 5.6 Jednoduché sondy celkové teploty

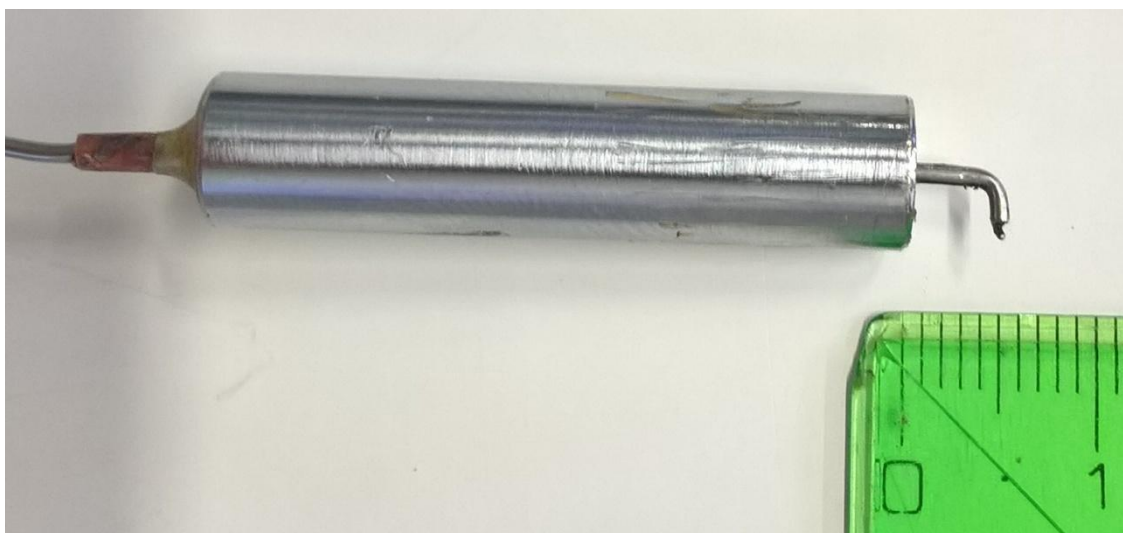
Jako doplňkové bylo provedeno měření jednoduchých sond celkové teploty. Toto měření probíhalo pouze v laboratoři NTC ZČU při rychlosti proudění vzduchu v kanálu 10 [m/s]. Byly proměřeny dvě sondy celkové teploty.

První byla proměřena sonda celkové teploty opatřená deflektorem (Obr. 5 - 5). U této sondy byl zkoumán vliv jejího vysunutí v kanálu na její tepelné ovlivnění. Celková délka této sondy je 111 [mm], délka dřívku je 87 [mm] a délka části umístěné v kanálu je 24 [mm]. Sonda byla proměřena ve vzdálenostech odběru od stěny 25, 44 a 66 [mm]. Tyto tři vzdálenosti byly zvoleny úmyslně a shodují se s vzdálenosti odběrů 2 a 3 dlouhé čtyřnásobné sondy celkové teploty.



Obr. 5-5 - Jednoduchá sonda celkové teploty s deflektorem<sup>21</sup>

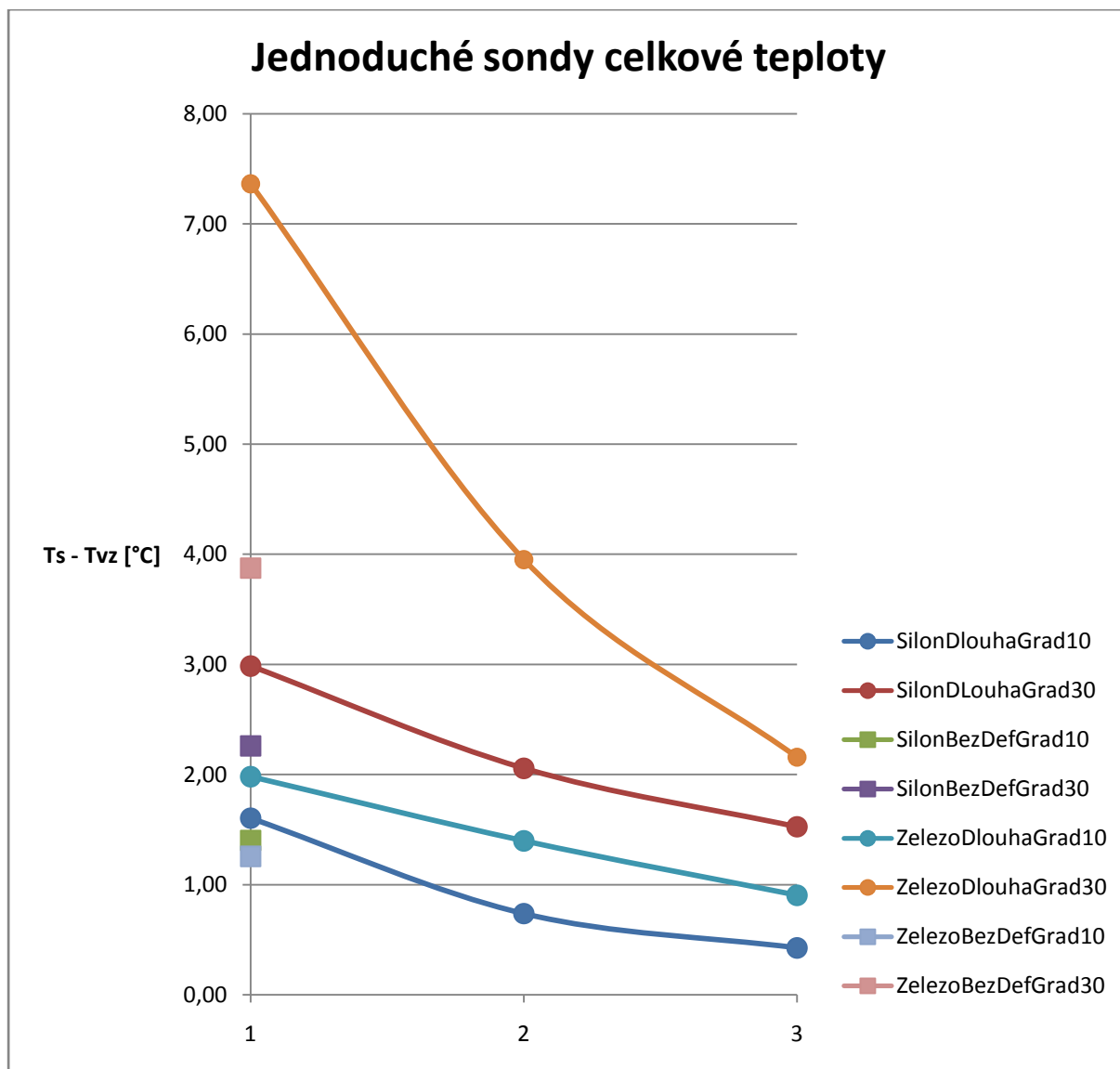
Druhou jednoduchou sondou byla bezdeflektorová sonda celkové teploty (Obr. 5 - 6). Délka jejího dřívku je 35 [mm] a vzdálenost odběru od stěny je 5 [mm]. Z důvodu své malé velikosti, bylo měření této sondy provedeno pouze pro jednu polohu odpovídající způsobu osazení ve zkušebním zařízení Darina IV. V následujícím grafu je zobrazen průběh teplotního rozdílu mezi teplotou měřenou pomocí sondy celkové teploty s deflektorem umístěné ve vytápěné desce a referenční teplotou měřenou stejným typem sondy umístěné v protilehlé stěně kanálu v závislosti na vysunutí sondy v kanále. Jako doplňující jsou zde zobrazeny i teploty měřené bezdeflektorovou sondou celkové teploty. Pro zjednodušení grafu není na vodorovné ose zobrazena velikost vysunutí sondy, ale jen číslo pozice. Přičemž pozice 1 odpovídá nejmenšímu vysunutí a pozice 3 největšímu.



Obr. 5-6 - Bezdeflektorová sonda celkové teploty<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Vlastní upravená fotografie

<sup>22</sup> Vlastní upravená fotografie

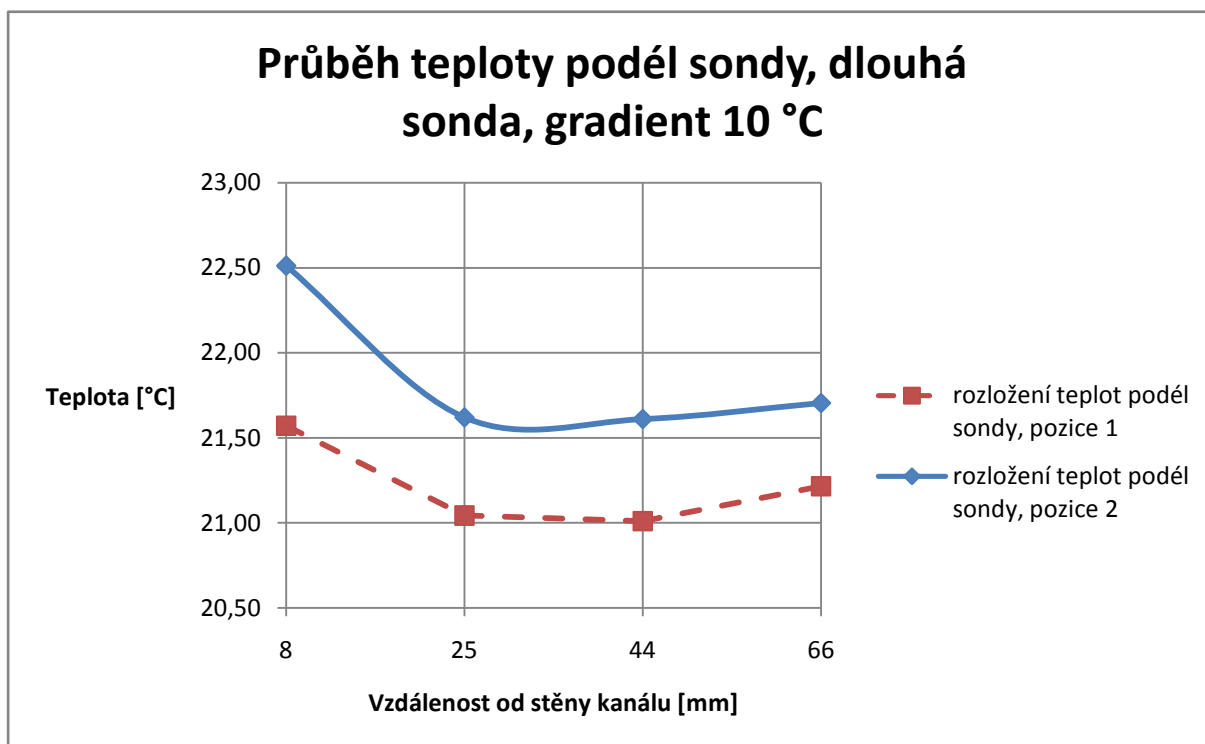


Graf 5-14 - Jednoduché sondy celkové teploty

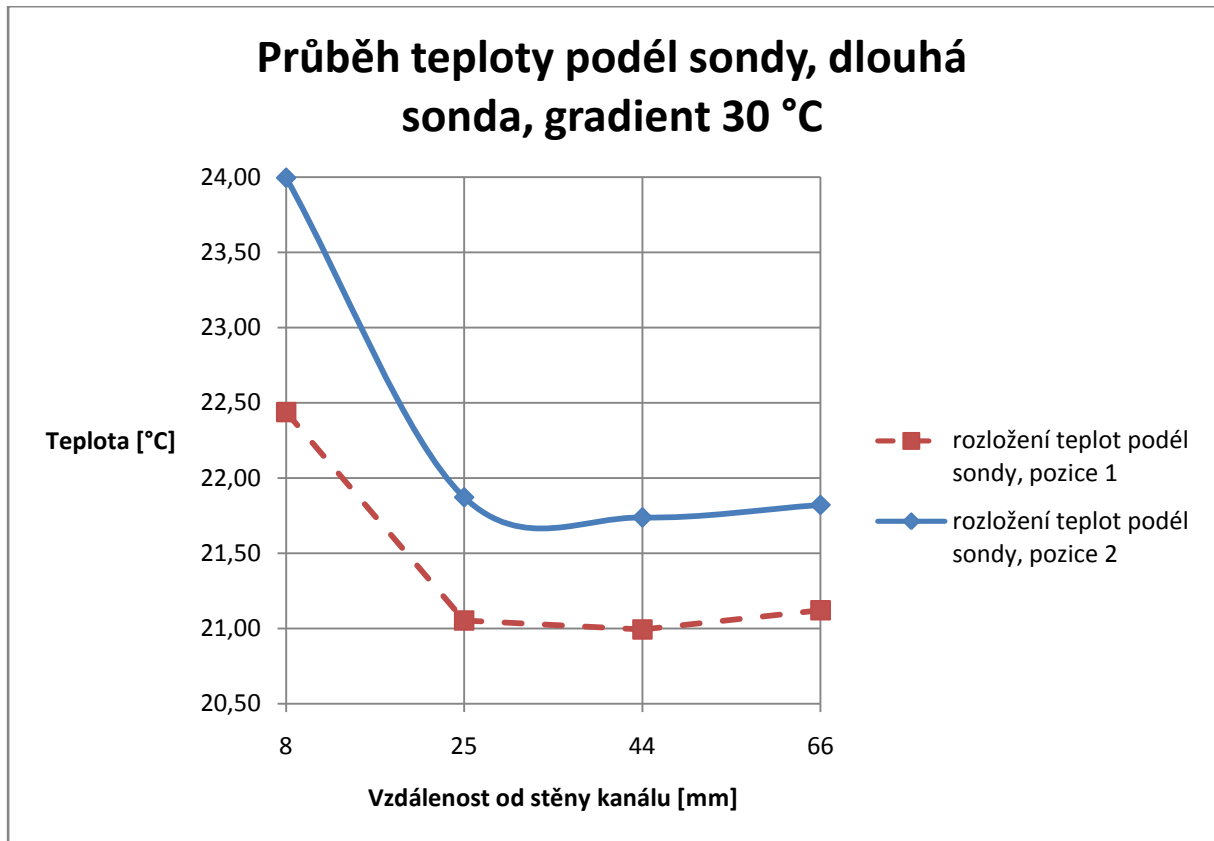
Z grafu 5 - 14 je patrná velká náchylnost jednoduchých sond k tepelnému ovlivnění, zvláště pak deflektorové sondy celkové teploty. Tato sonda je jednoznačně tepelně ovlivněna ve všech pozicích vysunutí v kanálu. Z tohoto grafu je dále zřejmý jednoznačně příznivý vliv silonového mezikusu na tepelné ovlivnění sondy. V případě měření při teplotním gradientu 30 [°C] je rozdíl mezi osazením sondy přímo v materiálu vytápěné desky a osazením za použití silonového mezikusu téměř 4,5 [°C]. Z těchto znalostí vyplývá, že jednoduchá deflektorová sonda celkové teploty je nevhodná k měření na zkušebním zařízení Darina IV v rovinách, kde dochází k rozdílu teplot stěny, ve které je sonda umístěna, a protékajícího vzduchu. V případě bezdeflektorové sondy celkové teploty se jedná o menší tepelné ovlivnění, které vyplývá z její konstrukce a tedy lepší schopnosti chlazení, ale které je stále nezanedbatelné. Z grafu 5 - 14 je patrné, že v případě této sondy nemá silonový mezikus téměř žádný vliv na tepelné ovlivnění sondy při teplotním gradientu 10 [°C].

## 5.7 Teplotní pole nad vytápěnou deskou

Před začátkem série měření bylo potřeba zjistit, zda se vlivem vytápění tvoří nad deskou teplotní pole, které by měření mohlo ovlivnit. Jak již bylo popsáno v kapitole 4.2., byla vytápěná deska vybavena dvěma otvory pro umístění sond, prvním, ve kterém se zkoušená teplotní sonda upevnila přímo do materiálu desky, a druhým, vybaveným silonovým mezikusem. Na počátku byl předpoklad, že se deska upevní do vzduchového tunelu, zkoušená sonda se proměří v prvním otvoru a následně bude přemístěna do druhého, aniž by se otočila deska. Za tohoto předpokladu byla ale sonda proměřena nejdříve na začátku desky ve směru proudění a poté na jejím konci, kde mohlo dojít k jejímu teplotnímu ovlivnění vlivem teplotního pole vznikajícího nad deskou. Z důvodu přesnosti měření bylo třeba tuto skutečnost ověřit. Bylo provedeno měření všech zkoušených vícenásobných sond při rychlosti proudění 10 [m/s] a teplotním gradientu 10 a 30 [°C]. Každá z jednotlivých sond byla osazena do otvoru se silonovým mezikusem a proměřena na začátku desky. Pro účely měření bylo toto uspořádání nazváno jako pozice 1. Poté byla deska otočena a sonda proměřena ve stejném upevňovacím otvoru, ale na konci desky, pozice 2. Po vyhodnocení měření se ukázalo, že nad vytápěnou deskou vzniká teplotní pole, které měření ovlivňuje. Z tohoto důvodu bylo od této metodiky upuštěno a následující měření probíhala dle metodiky popsané v kapitole 5.1. Je důležité zmínit, že tato měření probíhala v laboratoři NTC ZČU, kde byla téměř konstantní teplota kolísající mezi jednotlivými měřeními v rozsahu 0,2 [°C], a experimentální zařízení bylo připojené na sání ventilátoru. V grafech 5 - 15 a 5 - 16 je zobrazeno, jaký vliv mělo teplotní pole na měření teplot. Byl předpoklad, že tento jev se se zvyšující rychlostí bude projevovat méně, ale z důvodu snahy o co největší přesnost měření nebylo možné tento jev zanedbávat.



Graf 5-15 - Průběh teplot, dlouhá sonda, gradient 10 °C



Graf 5-16 - Průběh teplot, dlouhá sonda, gradient 30 °C

## 6 Vyhodnocení měření

Po naměření potřebných dat následovalo jejich vyhodnocení. Jak již bylo řečeno, ke sběru dat sloužil měřicí program vytvořený v prostředí LabView. Tento program pro každé měření vytvořil textový soubor, který následně plnil naměřenými daty. Z textového souboru byla data exportována do programu MS Excel, kde byla následně vyhodnocena. Některé z grafů s vyhodnocenými daty vytvořené v tomto programu byly použity už v kapitole 5.

Při experimentálním měření byly stanoveny vlivy vedení tepla do sondy na měřené hodnoty teplot. Ke splnění požadavků zadavatele práce bylo třeba zjistit, jaký podíl má tento jev na měření teplot ve zkušebním zařízení Darina IV. Z tohoto důvodu byly z naměřených dat vytvořeny grafy průběhu teplotního ovlivnění jednotlivých odběrů sond vlivem vedení tepla. Grafy jsou uvedeny v kapitole 5. Z grafů byly následně stanoveny pro každou zkoušenou vícenásobnou sondu celkové teploty korekční tabulky (Tabulka 6 - 1, 6 - 2, 6 - 3).

Tabulka 6-1- Korekční tabulka, krátká čtyřnásobná sonda celkové teploty

Krátká čtyřnásobná sonda_korekční tabulka					
Rychlost proudění [m/s]	10	20	40	60	80
<b>Grad10 [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	2,1	1,9	0,9	0,5	
korekce_odběr2 [°C]	1,1	0,8			
korekce_odběr3 [°C]					
korekce_odběr4 [°C]					
<b>Grad30 [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	7,3	5,9	3,8	2,8	1,6
korekce_odběr2 [°C]	4,1	2,9	1,4	0,8	
korekce_odběr3 [°C]	1,9	0,8			
korekce_odběr4 [°C]	1,1				
<b>Grad10silon [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]					
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					
korekce_odběr4 [°C]					
<b>Grad30silon [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	2,6	1,4	0,6		
korekce_odběr2 [°C]	1,3	0,3			
korekce_odběr3 [°C]	0,7				
korekce_odběr4 [°C]	0,5				

Tabulka 6-2 - Korekční tabulka, dlouhá čtyřnásobná sonda celkové teploty

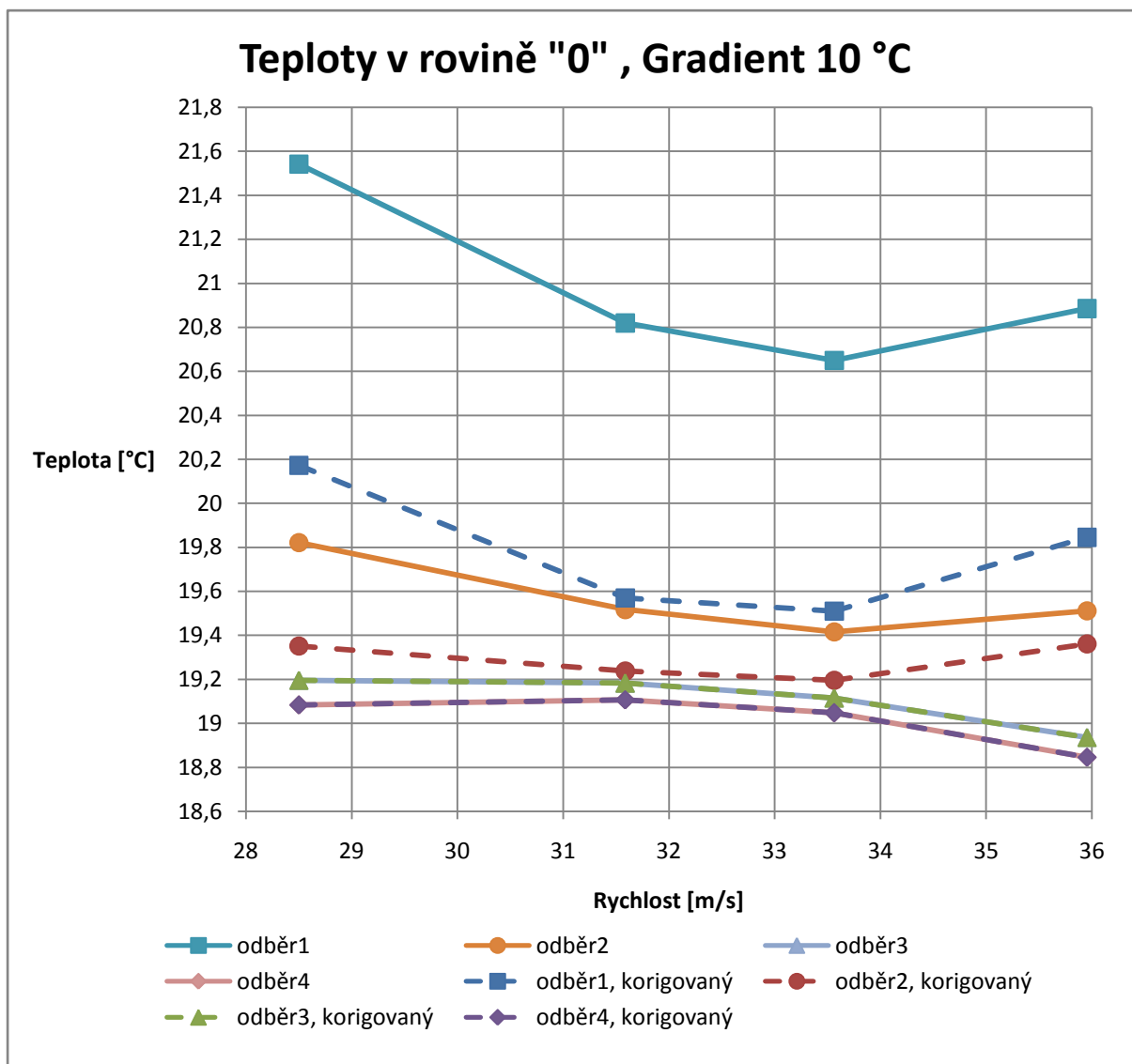
Dlouhá čtyřnásobná sonda_korekční tabulka					
Rychlost proudění [m/s]	10	20	40	60	80
<b>Grad10 [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	1,1	0,5			
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					
korekce_odběr4 [°C]					
<b>Grad30 [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	3,9	2,7	1,5	0,5	0,3
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					
korekce_odběr4 [°C]					
<b>Grad10silon [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]					
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					
korekce_odběr4 [°C]					
<b>Grad30silon [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	1,0				
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					
korekce_odběr4 [°C]					



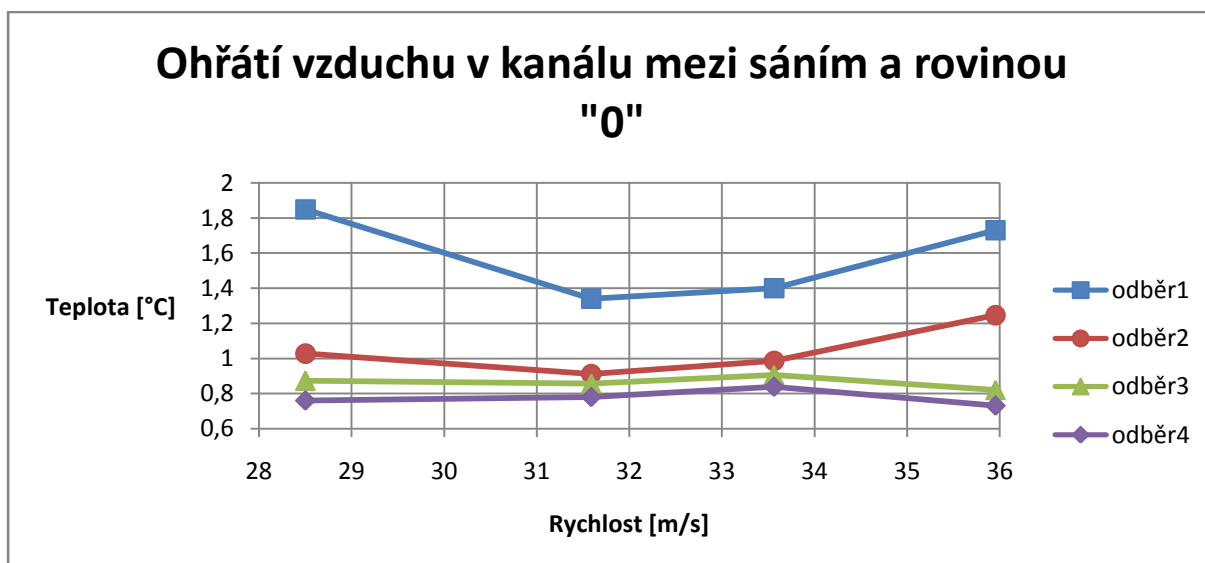
Tabulka 6-3- Korekční tabulka, plastová trojnásobná sonda celkové teploty

Plastová trojnásobná sonda_korekční tabulka					
Rychlost proudění [m/s]	10	20	40	60	80
<b>Grad10 [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	0,8	0,5			
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					
<b>Grad30 [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	3,2	2,2	1,0		
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					
<b>Grad10silon [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]					
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					
<b>Grad30silon [Tstěny - Tvzduchu]</b>					
korekce_odběr1 [°C]	2,2	0,9	0,3		
korekce_odběr2 [°C]					
korekce_odběr3 [°C]					

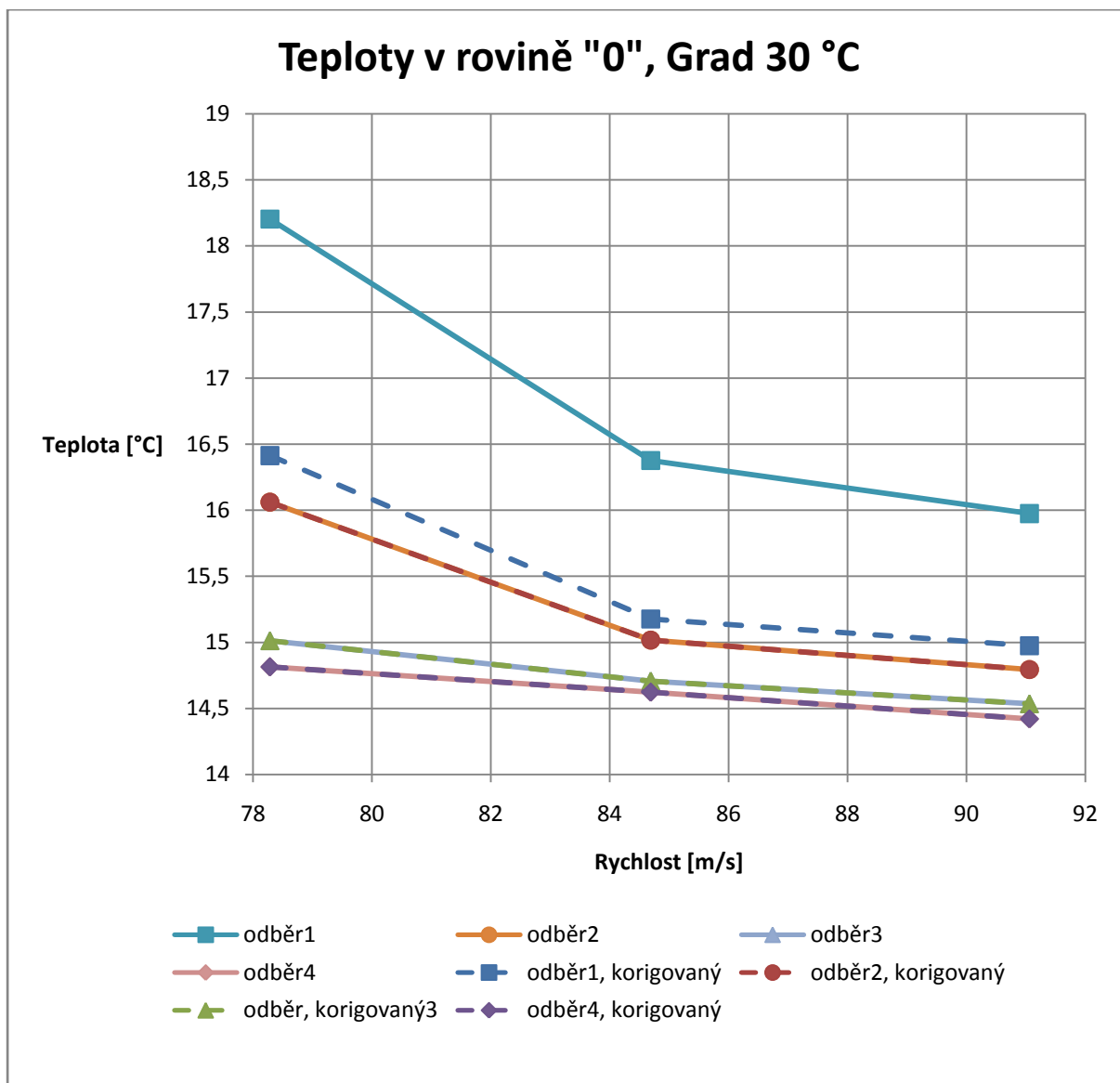
Hodnoty uvedené v korekčních tabulkách jsou závislé na přesnosti měření a počtu provedených měření. Jsou tedy použitelné pouze pro měření v určitém rozsahu teplotních a rychlostních podmínek, při udržení přesnosti výsledné korekce do 0,5 [°C]. Pro případy jiných podmínek měření, např. jiného gradientu nebo rychlosti je nutné z grafů a tabulek hodnoty korekcí interpolovat či extrapolovat. Tento způsob vnáší do výsledné korekce určitou chybovost. Pro zpřesnění a zvětšení rozsahu použitelnosti korekcí by bylo nutné provést další měření pro více gradientů a více rychlostí. Stanovení tepelných korekcí pro celé spektrum měřících podmínek však nebylo předmětem práce a má spíše doplňující charakter. Avšak pro některá měření provedená na zkušebním zařízení Darina IV lze tyto hodnoty teplotních korekcí použít při dodržení přesnosti výsledné korekce do 0,5 [°C]. V grafech 6 - 1,2,3,4 jsou uvedeny příklady aplikace teplotních korekcí pro vybraná měření a z korigovaných teplot dopočteného oteplení proudícího vzduchu v sacím kusu zkušebního zařízení Darina IV vlivem sálání tepla ze stěn kanálu.



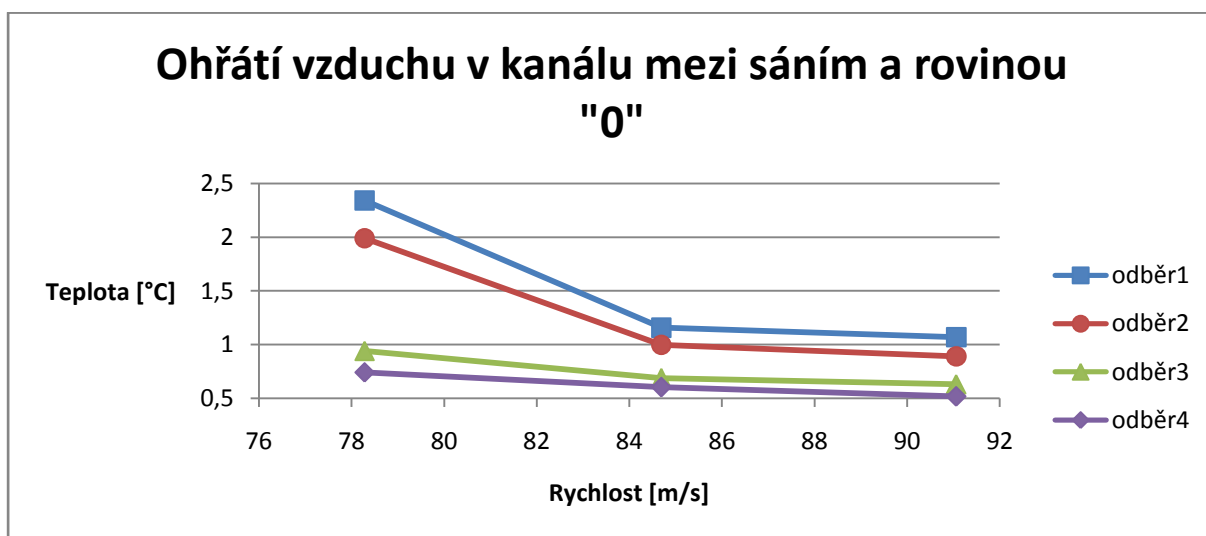
Graf 6-1 - Naměřené a korigované teploty pro vybraná měření s krátkou čtyřnásobnou sondou celkové teploty, gradient 10 °C



Graf 6-2 - Ohřátí proudícího vzduchu v sacím kusu zkušebního zařízení Darina IV, gradient 10 °C



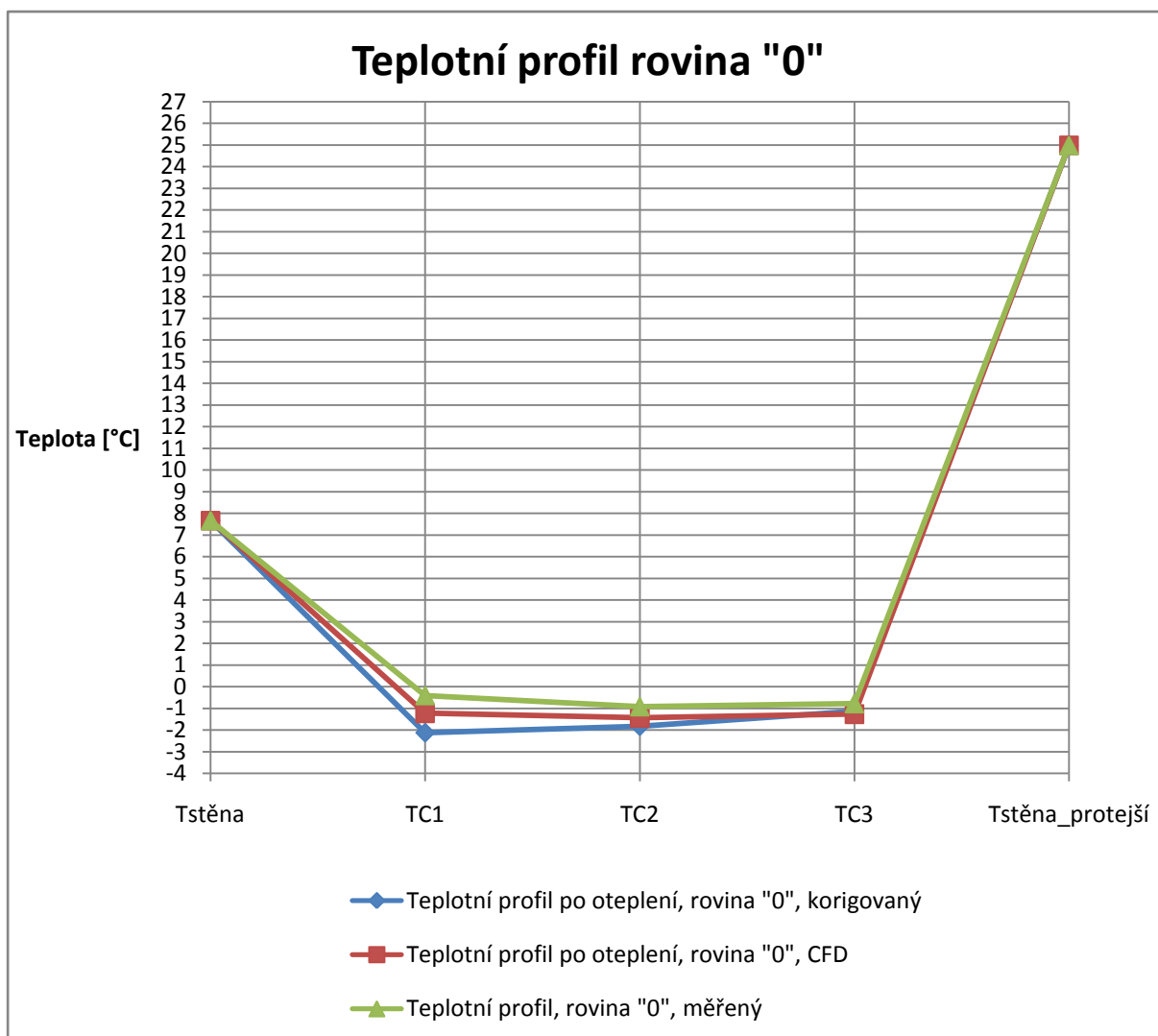
Graf 6-3- Naměřené a korigované teploty pro vybraná měření s krátkou čtyřnásobnou sondou celkové teploty, gradient 30 °C



Graf 6-4 - Ohřátí proudícího vzduchu v sacím kusu zkušebního zařízení Darina IV, gradient 30 °C

Z grafů 6 - 1 a 6 - 3 je patrný vliv užití teplotních korekcí na měřené teploty. Tato změna má vliv na zpřesnění výpočtu termodynamické účinnosti zkoušeného oběžného kola kompresoru. Dále lze pomocí eliminace vlivu vedení tepla do sondy a údajů naměřených hodnot teploty proudícího vzduchu v sacím potrubí zjistit, k jakému oteplení dochází v sacím kusu zkušebního zařízení. Velikost oteplení pro vybrané případy měření je zobrazena v grafech 6 - 2 a 6 - 4.

Na NTC ZČU byla provedena CFD simulace oteplení v sacím kusu jednoho ze zkoušených kompresorových stupňů a následné vyhodnocení teplotního profilu v místě měření.[3] Jako doplňující bylo tedy provedeno porovnání vyhodnoceného teplotního profilu pomocí CFD a dopočteného profilu ze znalosti teplot na sání a korigovaných měřených teplot. Teplotní profil je zobrazen v grafu 6 - 5.



Graf 6-5 - Teplotní profil v rovině "0"

Z grafu 6 - 5 je patrné, že se jednotlivé teplotní profily vyhodnocené rozdílnými metodami liší. Podmínky měření tohoto kompresorového stupně byly velice nestandardní. Konkrétně měřící bod, pro který je zde zobrazen teplotní profil, byl měřen při velikosti rychlosti proudění 5 [m/s] a teplotním gradientu 8 [°C]. Z hlediska teplotních korekcí, bylo nutné jejich hodnoty extrapolovat z korekční tabulky pro krátkou čtyřnásobnou sondu celkové teploty. V tomto případě sloužila k měření trojnásobná sonda celkové teploty, ale tato korekční tabulka zde mohla být použita z důvodu shodných poloh odběrů 1 - 3. Jak již bylo řečeno,

extrapolace hodnot teplotních korekcí přináší určitou nepřesnost do výsledných korigovaných hodnot. Tedy i teplotní profil stanovený z korigovaných teplot bude určitým způsobem nepřesný.

V tomto určitém případě, byly ale okrajové podmínky CFD úlohy plynoucí z podmínek měření také značně nepříznivé. Po konzultaci bylo prohlášeno, že skutečný teplotní profil se bude blížit spíše profilu dopočteného z korigovaných teplot.

## 7 Závěr

Cílem práce bylo stanovit vliv vedení tepla ze stěny kanálu na hodnoty měřených teplot v jednotlivých odběrech vybraných násobných sond celkové teploty, používaných při měření na zkušební zařízení Darina IV.

Za tímto účelem bylo navrženo a následně vyrobeno experimentální zařízení. Zařízení se skládalo ze zkušební vzduchové trati, vytápěné desky, přechodových a podpůrných částí, elektroinstalace a instrumentace měření. Následně byla navržena metodika měření a prakticky vyzkoušena. K zpřesnění měření teplotních sond bylo provedeno několik doplňujících zkušebních měření. Bylo provedeno zkušební měření za účelem eliminovat účinky vlivu teplotního profilu na měřenou sondu, proměření rychlostních profilů a několik měření k ověření správné funkce systému vytápění a sběru dat. Experimentální zařízení bylo navrženo a vyrobeno pouze pomocí vlastních konstrukčních návrhů a znalostí pramenících z praxe, studia, citované literatury a odborných konzultací s vedoucím a konzultantem práce.

Po uvedení experimentálního zařízení do spolehlivého provozu byla provedena série měření. Měřeny byly dvě vybrané čtyřnásobné sondy celkové teploty standardně používané při měřeních na zkušební zařízení Darina IV, jedna plastová trojnásobná sonda celkové teploty, jednoduchá sonda celkové teploty s deflektorem a jednoduchá sonda celkové teploty bez deflektoru. Vícenásobné sondy byly proměřeny pro rychlosti proudícího vzduchu 10, 20, 40, 60, 80 [m/s], velikosti teplotních gradientů 10 [°C] a 30 [°C] a při osazení přímo v materiálu vytápěné desky a osazení v silonovém mezikusku. Jednoduché sondy byly měřeny pro stejné podmínky, ale jen pro rychlosti proudícího vzduchu 10 [m/s]. Jejich měření je v práci uvedeno pouze jako doplňkové.

Následně byla měření vyhodnocena a zpracována. Byly stanoveny účinky vedení tepla na sondy celkové teploty a prokázán pozitivní vliv použití silonového mezikusku a plastové sondy na tyto účinky. Jako doplňující byly stanoveny korekční tabulky, které mají za úkol s určitou přesností eliminovat vliv vedení tepla na měření a byla provedena jejich aplikace na vybraná data naměřená na zkušební zařízení. Jako poslední byl na vybraném případě zkušebního měření kompresorového stupně porovnán teplotní profil v rovině před oběžným kolem kompresoru, stanovený pomocí korigovaných teplot s teplotním profilem stanoveným pomocí CFD výpočtu.

Cíl práce byl splněn. Vliv vedení tepla a možnosti jeho eliminace nebo korekce byly stanoveny. Hodnoty korekcí by bylo vhodné dále zpřesnit provedením měření pro více teplotních gradientů a dle potřeby i pro další rychlosti proudění. K těmto účelům může být v budoucnu dále využito experimentální zařízení. Je nutné podotknout, že ke stanovení komplexních korekčních tabulek by byla potřeba dalších měření v časovém rozsahu cca 200 hodin.

Výsledky práce budou testovány a analyzovány na dalších naměřených datech z měření charakteristik kompresorových stupňů a mohou být rovněž velmi užitečné pro simulace pomocí CFD systémů či metodou tepelných sítí, jimiž by bylo možné korekce rovněž doplnit.

## Seznam použitých zdrojů

1. **Richard Matas, Jindřich Kňourek, Tomáš Syka, Ondřej Luňáček, Jaroslav Mráz.** *Experimentální a numerické modelování nové řady stupňů radiálních kompresorů, sborník konference Turbostroje 2015, Praha, 2015, ISBN: 978-80-905040-5-9, str. 82 - 89 (8 stran).*
2. **Richard Matas, Jan Sedláček, Václav Čibera.** *Preliminary study to the temperatures of the thermocouple probes affected by the environment of heated walls. EPJ Web of Conferences, 114 (2016). DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201611402071>.*
3. **Lukáš Hurda, Richard Matas.** *Uncertainty analysis of thermal quantities measurement in a centrifugal compressor. AIP Conference Proceedings 1889, 020012 (2017); doi: 10.1063/1.5004346. ID 43921603; WOS: 000417391000012.*
4. **Richard Matas, Tomáš Syka, Lukáš Hurda, Jaroslav Mráz, Miroslava Jirsová.** *Přehled dalších poznatků získaných pomocí experimentálního a numerického modelování nové řady stupňů radiálních kompresorů., sborník konference Turbostroje 2017, Praha, 2017, ISBN: 978-80-905040-8-0, str. 193 - 201 (9 stran).*
5. **Springer.** *VDI Heat Atlas Second edition.*
6. **ČKD, Howden.** Technická dokumentace DARINA IV.

## Seznam obrázků

Obr. 2-1 – Fotografie dělicí roviny zkušebního zařízení .....	12
Obr. 2-2 - Rotor kompresoru.....	13
Obr. 2-3 - Měřicí roviny.....	14
Obr. 2-4 - Čtyřnásobná sonda celkové teploty .....	15
Obr. 2-5 - Řez jednoduchou sondou celkové teploty .....	15
Obr. 4-1 - Průřez tunelu.....	21
Obr. 4-2 - Montáž tunelu.....	22
Obr. 4-3 - Výkres desky 15 mm.....	24
Obr. 4-4 -Výkres desky 5 mm.....	25
Obr. 4-5 - Montáž topného drátu.....	25
Obr. 4-6 - CAD model, přechodová část (plastová).....	26
Obr. 4-7 - Tisk přechodové části (plastová).....	27
Obr. 4-8 - CAD model, přechodová část.....	27
Obr. 4-9 - Montáž experimentálního zařízení .....	28
Obr. 4-10 - Prandtlova sonda .....	29
Obr. 4-11 - Tlakový převodník Netscanner .....	29
Obr. 4-12 - jednotky ADAM.....	30
Obr. 5-1 - Krátká čtyřnásobná sonda celkové teploty .....	34
Obr. 5-2 - Dlouhá čtyřnásobná sonda celkové teploty .....	37
Obr. 5-3 - Plastová trojnásobná sonda celkové teploty .....	40
Obr. 5-4 - Přechodová část.....	40
Obr. 5-5 - Jednoduchá sonda celkové teploty s deflektorem .....	43
Obr. 5-6 - Bezdeflektorová sonda celkové teploty.....	43



## **Seznam tabulek**

Tabulka 6-1- Korekční tabulka, Krátká čtyřnásobná sonda celkové teploty .....	47
Tabulka 6-2 - Korekční tabulka, Dlouhá čtyřnásobná sonda celkové teploty .....	48
Tabulka 6-3- Korekční tabulka, Plastová trojnásobná sonda celkové teploty .....	49

## Seznam příloh

1.	Příloha 1: Konstrukční výkresy	
	Vytápěná deska, $t = 5$ mm.....	1 strana A4
	Vytápěná deska, $t = 15$ mm.....	1 strana A4
	Přechodová část, plastová .....	1 strana A4
	Přechodová část, plechová .....	1 strana A4
2.	Příloha 3: Obrázky	
	Rychlostní profil v experimentálním zařízení .....	1 strana A4
	Příklad výpočtu tepelného toku.....	1 strana A4