



Návrh experimentálního standu pro zkoušení a výzkum lopatkových strojů

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

David Blecha

Vedoucí práce:

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.

Katedra energetických zařízení

Ing. Ondřej Burian

Katedra energetických zařízení





Zadání bakalářské práce

Návrh experimentálního standu pro zkoušení a výzkum lopatkových strojů

Jméno a příjmení: **David Blecha**
Osobní číslo: S16000035
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra energetických zařízení
Akademický rok: **2019/2020**

Zásady pro vypracování:

Cílem bakalářské práce provést konstrukční návrh standu pro experimentální výzkum lopatkových strojů pracujících se vzduchem jako pracovní látkou. Stand bude tedy sloužit k testování lopatkových strojů typu kompresor nebo plynová expanzní turbína. Součástí práce bude i návrh modifikace stávajícího rozvodu stlačeného vzduchu pro účely experimentálního standu a návrh adaptace repasovaného turbodmychadla ze spalovacího motoru jako základního stroje pro ověření všech funkcí experimentálního standu.

- seznámte se s metodikou provádění experimentů
- nastudujte si způsoby měření veličin, které bude nutné během experimentu měřit
- provedte rozbor řešeného problému, udělejte krátkou rešerši problematiky
- provedte návrh postupu experimentu – stanovte časový postup experimentu a veškeré požadované fyzikální parametry, které mají být dodrženy a změřeny
- na základě vypracovaného postupu experimentu provedte návrh experimentálního zařízení včetně návrhu všech měřících řetězců

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy: 45
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] LIŠKA, Antonín a Pavel NOVÁK. *Technika stlačeného vzduchu*. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 80-01-01947-0.
- [2] KADLEC, Karel, Miloš KMÍNEK a Pavel KADLEC. *Měření a řízení chemických, potravinářských a biotechnologických procesů*. Ostrava: Key Publishing, 2017. Monografie. ISBN 978-80-7418-283-9.
- [3] NOVÁK, Martin. *Technická měření*. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.

Vedoucí práce: doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení
Ing. Ondřej Burian
Katedra energetických zařízení

Datum zadání práce: 1. listopadu 2019
Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Petra Dančová, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

13. července 2020

David Blecha

Poděkování

V první řadě bych rád poděkoval doc. Ing. Petře Dančové, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce. Dále bych rád vyjádřil poděkování panu Ing. Ondřeji Burianovi za odborné konzultace, cenné rady, a především trpělivost a čas, které mi v průběhu tvorby této bakalářské práce poskytl.

Abstrakt

Předmětem bakalářské práce je návrh experimentálního standu pro testování a výzkum lopatkových strojů. První část práce se zabývá vlastnostmi atmosférického vzduchu a základními součástmi rozvodu stlačeného vzduchu od zdroje po konečný spotřebič. Druhá část se zaměřuje na specifikaci měřících metod a senzorů používaných při měření parametrů stlačeného vzduchu. Poslední část práce obsahuje samotný návrh experimentálního zařízení, návrh měřících řetězců a popis komponent experimentálního standu spolu s popisem jednotlivých měření. Součástí poslední části je návrh na modifikaci rozvodu stlačeného vzduchu a konstrukce pracovního stolu pro testovací zařízení. Práce je zakončena návrhem na otestování navrženého experimentálního standu pomocí turbodmychadla.

Klíčová slova

Stlačený vzduch, experimentální stand, měření parametrů stlačeného vzduchu, rozvod stlačeného vzduchu

Abstract

The aim of this thesis is to design an experimental stand for testing and research of turbomachines. The first part focuses on theory of atmospheric air and its qualities. This part also covers basic components of compressed air distribution (from inner source to final appliance). The second part focuses on specification of gauging methods and on sensors used during the parameter's measurements of compressed air. The final part of the thesis contains the design of experimental device, design of gauging chains and the description of the experimental stand's components together with description of the particular measurements. This part of thesis is supplemented with the scheme of modification of compressed air distribution and the construction of working table for testing device. The thesis is finished with the possible suggestions, that can be used for testing the designed experimental stand via turbocharger.

Key words

Compressed air, experimental stand, measurements of compressed air's parameters, compressed air distribution

Obsah

1	ÚVOD	10
2	TEORETICKÝ ZÁKLAD PROBLEMATIKY STLAČENÉHO VZDUCHU	11
2.1	VLASTNOSTI ATMOSFÉRIKÉHO VZDUCHU	11
2.1.1	<i>Tlak</i>	12
2.1.2	<i>Teplota</i>	14
2.1.3	<i>Měrný objem</i>	14
2.1.4	<i>Rovnice ideálního plynu</i>	15
2.2	VÝROBA STLAČENÉHO VZDUCHU	15
2.2.1	<i>Objemové kompresory</i>	15
2.2.2	<i>Rychlostní kompresory</i>	17
2.3	ÚPRAVA STLAČENÉHO VZDUCHU	18
2.4	ROZVOD STLAČENÉHO VZDUCHU	18
2.4.1	<i>Vzdušník</i>	18
2.4.2	<i>Potrubí</i>	19
2.4.3	<i>Armatury</i>	20
2.4.3.1	<i>Uzavírací armatury</i>	20
2.4.3.2	<i>Redukční armatury</i>	21
2.4.3.3	<i>Regulační armatury</i>	21
2.4.3.4	<i>Pojistné ventily</i>	21
3	MĚŘENÍ PARAMETRŮ STLAČENÉHO VZDUCHU	22
3.1	MĚŘENÍ TEPLoty	22
3.1.1	<i>Bimetalové teploměry</i>	23
3.1.2	<i>Odporové teploměry</i>	23
3.1.3	<i>Termoelektrické teploměry – termočláanky</i>	24
3.2	MĚŘENÍ TLAKU.....	24
3.2.1	<i>Deformační tlakoměry</i>	25
3.3	MĚŘENÍ PRŮTOKU	26
3.3.1	<i>Turbínové a lopatkové průtokoměry</i>	27
3.3.2	<i>Ultrazvukové průtokoměry</i>	27
3.3.3	<i>Vírové průtokoměry</i>	28
3.3.4	<i>Měření pomocí škrtících členů</i>	28
3.3.5	<i>Coriolisovy průtokoměry</i>	29
4	NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ	30
4.1	ZADÁVACÍ PARAMETRY	30
4.2	NÁVRH POSTUPU EXPERIMENTU	31

4.3	NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO STANDU.....	32
4.4	DISPOZICE EXPERIMENTÁLNÍHO STANDU V LABORATOŘI.....	36
4.5	ÚPRAVA ROZVODU STLAČENÉHO VZDUCHU V LABORATOŘI.....	36
4.6	NÁVRH POTRUBÍ.....	37
4.7	POPIS MĚŘENÍ.....	38
4.7.1	<i>SITRANS P420 (SITRANS P500)</i>	39
4.7.2	<i>ModuTEMP® 70</i>	41
4.7.3	<i>SITRANS FC430</i>	42
4.8	POPIS ZVOLENÝCH ARMATUR.....	43
4.8.1	<i>Kulové ventily</i>	43
4.8.2	<i>Regulační ventil</i>	45
4.8.3	<i>Tlumič</i>	46
4.9	NÁVRH STOLU PRO EXPERIMENTÁLNÍ STAND.....	46
4.10	ADAPTACE REPASOVANÉHO TURBODMYCHADLA.....	48
5	ZÁVĚR.....	52
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	53
	SEZNAM PŘÍLOH.....	55

Seznam obrázků

Obrázek 1: T-s diagram suchého vzduchu.....	12
Obrázek 2: Pojmy z oblasti měření tlaku.....	13
Obrázek 3: Princip pístového kompresoru.....	16
Obrázek 4: Šroubový kompresor.....	17
Obrázek 5: Lamelový kompresor.....	17
Obrázek 6: Kompresor Max1 značky MAN.....	17
Obrázek 7: Redukční ventil.....	21
Obrázek 8: Škrtkový ventil.....	21
Obrázek 9: Bimetalový teploměr.....	23
Obrázek 10: Radiální lopatkový průtokoměr.....	27
Obrázek 11: Turbinový axiální průtokoměr.....	27
Obrázek 12: Vírový průtokoměr.....	28
Obrázek 13: Princip Coriolisova průtokoměru.....	29
Obrázek 14: PID schéma návrhu rozvodu v budoucí laboratoři a navrženého experimentálního standu.....	32
Obrázek 15: PID schéma rozvodu stlačeného vzduchu.....	33
Obrázek 16: PID schéma experimentálního zařízení.....	35
Obrázek 17: Návrh umístění experimentálního standu.....	36
Obrázek 18: Schéma návrhu úpravy rozvodů stlačeného vzduchu.....	37
Obrázek 19: SITRANS P420.....	39
Obrázek 20: SITRANS P500.....	40
Obrázek 21: ModuTEMP® 70.....	41
Obrázek 22: SITRANS FC430.....	42
Obrázek 23: Kulový ventil s ručním pohonem.....	44
Obrázek 24: Kulový ventil značky OMAL Automation.....	44
Obrázek 25: Elektrický pohon kulového ventilu.....	45
Obrázek 26: Regulační ventil BEE line RV 122.....	46
Obrázek 27: Nárys použitého profilu.....	47
Obrázek 28: Navržený stůl pro experimentální stand.....	47
Obrázek 29: Rozměry pracovního stolu.....	48
Obrázek 30: Turbodmychadlo Garrett GT2052.....	49
Obrázek 31: Turbodmychadlo Garrett GT2252.....	49
Obrázek 32: Turbodmychadlo Garrett GT2871.....	50
Obrázek 33: Rozměry turbodmychadla Garrett GT2052.....	50
Obrázek 34: Rozměry turbodmychadla Garrett GT2252.....	51
Obrázek 35: Rozměry turbodmychadla Garrett GT2871.....	51

Seznam tabulek

Tabulka 1: Složení suchého vzduchu.....	11
Tabulka 2: Základní jednotky tlaku.....	13
Tabulka 3: Výběr základních světlostí.....	19
Tabulka 4: Jmenovité tlaky PN.....	20
Tabulka 5: Základní typy termoelektrických článků a přibližné hodnoty jejich využití.....	24
Tabulka 6: Přednosti a nedostatky vybraných typů snímačů tlaku.....	26
Tabulka 7: Tabulka provozních parametrů.....	30
Tabulka 8: Návrhové parametry ohříváče.....	34
Tabulka 9: Návrhové parametry potrubí.....	38
Tabulka 10: Seznam jednotlivých měření.....	38
Tabulka 11: Technické specifikace SITRANS P420.....	39
Tabulka 12: Technické specifikace SITRANS P500.....	40
Tabulka 13: Technické specifikace ModuTEMP® 70.....	41
Tabulka 14: Technické specifikace SITRANS FC430.....	42
Tabulka 15: Seznam jednotlivých armatur experimentálního zařízení.....	43
Tabulka 16: Technické specifikace kulových ventilů.....	44
Tabulka 17: Technické specifikace elektrického pohonu kulového ventilu.....	44
Tabulka 18: Technické specifikace regulačního ventilu BEE line RV 122.....	45

1 Úvod

Stlačený vzduch se využívá k mnohočetným aplikacím v průmyslu nebo v domácnostech. Vrtačky, brusky, utahovačky, bourací kladiva, nýtovačky a spoustu dalších strojů a zařízení je možné spatřit v různých odvětvích od automobilového průmyslu po ordinaci zubního lékaře. Pomocí stlačeného vzduchu jsou natlakovány pneumatiky automobilů, nebo vyfoukávány mokré vlasy po návštěvě bazénu.

Se stlačeným vzduchem nebo jiným médiem pracují také lopatkové stroje. Základní částí lopatkových strojů je rotor opatřený lopatkami, pomocí kterého dochází k přeměnám energie. Pokud pracovní stroj umožňuje přeměnu mechanické energie v energii tlakovou nebo kinetickou, jedná se o hnané lopatkové stroje, ke kterým patří například čerpadla nebo kompresory. Jestli je přeměna opačného charakteru, tedy přeměna kinetické nebo tlakové energie v energii mechanickou, jedná se o hnací lopatkové stroje (turbína). Turbína, která je roztáčena prouděním vzduchu vznikající díky tlakovému rozdílu v troposféře, je v dnešní době využívána k dosti zvučnému tématu a tím je výroba elektrické energie pomocí obnovitelných zdrojů.

Cílem této práce je navrhnout experimentální zařízení, pomocí kterého bude možné otestovat lopatkové stroje typu turbokompresor nebo plynová expanzní turbína. Nejdostupnějším pracovním médiem je stlačený vzduch. Aby bylo možné správně navrhnout toto zařízení, je nezbytné si nastudovat vlastnosti stlačeného vzduchu, jeho výrobu a měření příslušných parametrů. Důležité je mít také přehled o komponentech rozvodů stlačeného vzduchu. K měřeným parametrům nutných k definování energetických bilancí lopatkového stroje patří tlak, teplota a průtok stlačeného vzduchu a otáčky spolu s kroutícím momentem na hřídeli lopatkového stroje. Návrh experimentálního standu je spojen s volbou vhodných měřidel a komponentů experimentálního zařízení, s návrhem na umístění standu do budoucí laboratoře Katedry energetických zařízení společně s úpravami jejich rozvodů stlačeného vzduchu. Součástí práce bude i návrh konstrukce stolu pro experimentální stand.

Na experimentálním standu pro testování lopatkových strojů, by mělo být možné otestovat různá zařízení různých parametrů. Testovat dle požadavků zadavatele experimentu. Jako první bude otestováno vybrané turbodmychadlo, na kterém bude vyzkoušena funkčnost experimentálního zařízení.

2 Teoretický základ problematiky stlačeného vzduchu

Význam vzduchu je od nepaměti spojován se životem mnoha živočichů včetně člověka. Díky složce kyslíku můžeme dýchat nebo rozdělávat oheň. Obklopuje nás. Stlačením vzduchu se vyrábí stlačený vzduch, který lze považovat za nositele energie.

Avšak myšlenka stlačeného vzduchu není novinkou posledních desetiletí. S lehkým použitím hyperboly lze tvrdit, že stlačený vzduch už používali pravěcí lovci, když pomocí svých plic rozfoukávali oharky v plápolající oheň. Před rokem 3000 před naším letopočtem, kdy pro zpracovávání kovů či oxidů kovů bylo třeba vyšších teplot, zlatníci z Egypta a Sumeru objevili dmuchavku, s kterou dokázali dosáhnout teploty až 1500 stupňů Celsia. Další vývoj před naším letopočtem s sebou přinesl kovářské měchy ať už ruční, šlapací nebo dokonce poháněné vodním kolem. Postupem času se konstrukce zdokonalovaly. Až roku 1776 zkonstruoval Rus jménem I. I. Polzunov kompresor, jež je považován za prototyp moderních kompresorů. [1]

2.1 Vlastnosti atmosférického vzduchu

Atmosférický vzduch, jenž se k výrobě stlačeného vzduchu využívá, je směsí permanentních plynů, vody (možné ve všech skupenstvích) a mechanických nečistot. Této směsi permanentních plynů se říká suchý vzduch. [2]

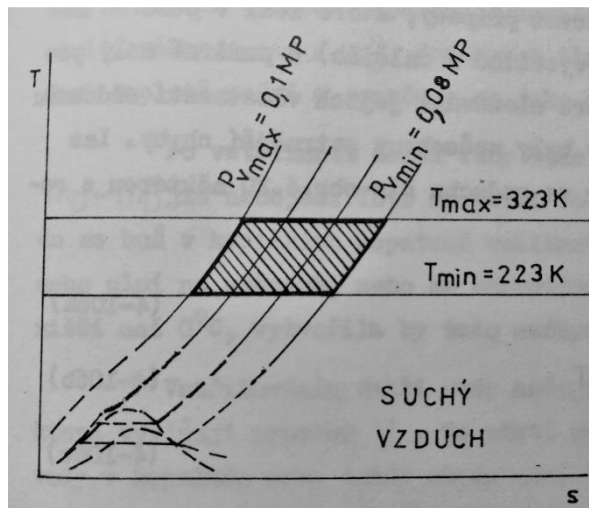
Tabulka 1: Složení suchého vzduchu

Složení stlačeného vzduchu			
složka	chem. zn.	hmotnostní podíl [%]	molový podíl [%]
kyslík	O ₂	23,10	20,90
dusík	N ₂	75,56	78,13
argon a jiné vzácné plyny	Ar	1,30	0,94
oxid uhličitý	CO ₂	0,05	0,03

Zdroj: [2]

Z T - s diagramu pro suchý vzduch je patrné, že jednotlivé mezní křivky těchto plynů leží ve velmi nízkých teplotách, které jsou velmi daleko od teplot běžných v provozech stlačeného suchého vzduchu. Proto při dostatečném vyloučení vody a nečistot ze vzduchu lze (suchý) vzduch považovat za ideální plyn, pro který lze použít stavovou rovnici ideálního plynu. Pro určení stavu

ideálního plynu je nutné znát dvě ze tří veličin tento stav definujících. Těmito veličinami jsou: tlak, teplota, měrný objem/hustota. [2]



Obrázek 1: T-s diagram suchého vzduchu
Zdroj: [2]

2.1.1 Tlak

Tlak je možné definovat dvěma rovnocennými způsoby. První definice říká, že tlak p je roven

$$p = \frac{F}{S} , \quad (17)$$

kde F [N] je kolmo působící síla na plochu S [m²]. Druhým způsobem je definice pomocí hydrostatického tlaku

$$p = h \cdot \rho \cdot g , \quad (18)$$

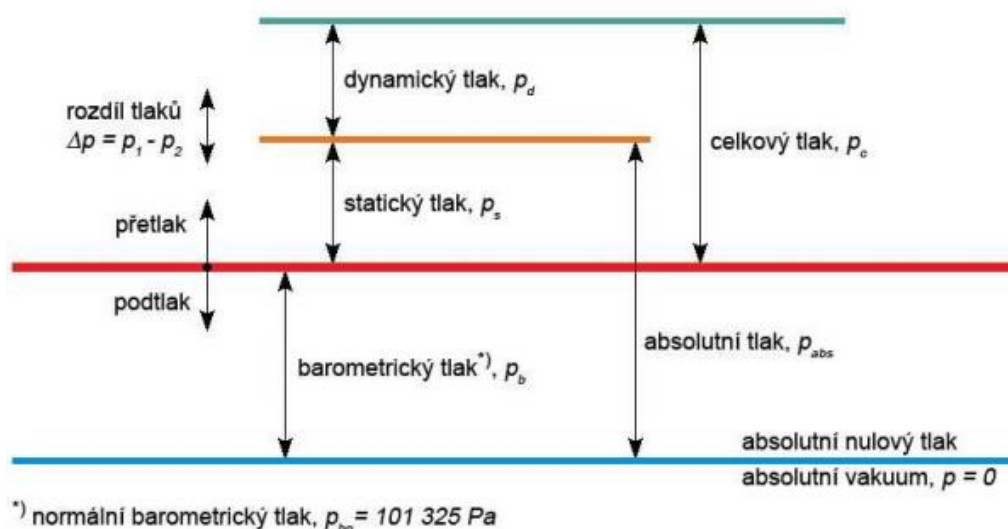
která definuje tlak pomocí součinu výšky sloupce kapaliny v nádobě h [m], hustoty kapaliny ρ [m³·kg⁻¹] a tíhového zrychlení g [m·s⁻²]. Základní jednotkou tlaku v soustavě SI je 1 Pascal [kg·m⁻¹·s⁻²]. Jelikož je Pascal velmi malá jednotka, v praxi jsou proto více užívány násobky Pascalů, nebo starší jednotky (viz tabulka 2). [7]

Tabulka 2: Základní jednotky tlaku

Jednotka	Hodnota v [Pa]
1 bar	100000
1 mbar	100
1 kp/m ²	9,80665
1 atm (fyzikální atmosféra)	101325
1 at (technická atmosféra)	980665
1 Torr	133,322
1 1mm H ₂ O	9,80665
1 PSI	6894,757293

Zdroj: [7]

Pro práci se stlačeným vzduchem je důležité umět rozlišit mezi absolutním tlakem a přetlakem.



Obrázek 2: Pojmy z oblasti měření tlaku
Zdroj: [5]

Tlak vakua je označován jako tlak absolutní nuly. Od absolutní nuly je měřen tlak barometrický a tlak absolutní. Přetlak nebo podtlak je vztahován k barometrickému tlaku. Absolutní tlak je součtem přetlaku (u proudících plynu statickým tlakem) a okamžitým barometrickým tlakem, tedy

$$p_{abs} = p_s + p_b. \quad (1)$$

Barometrický tlak kolísá okolo hodnoty 100 kPa. Avšak pro výpočty se toto kolísání zanedbává a počítá se právě s hodnotou 100 kPa. U proudících kapalin je možné naměřit ještě tlak kinetický, který je u nestlačitelných kapalin roven dynamickému tlaku. [1]

2.1.2 Teplota

Další veličinou je teplota. Teplota je úzce spjata s kinematickou energií molekul látek. Vyjadřuje tepelný stav látky. Její hodnoty se udávají ve stupních Celsia ($[t]=^{\circ}\text{C}$) nebo ve spojení s termodynamickými výpočty v kelvinech ($[T]=\text{K}$). Přepočtení mezi stupnicemi je dán vztahem

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15. \quad (2)$$

A zároveň je rozdíl teploty ve stupních Celsia totožný s rozdílem teplot v kelvinech,

$$\Delta t (^{\circ}\text{C}) = \Delta T (\text{K}), \quad (3)$$

z toho je patrné, že $1 \text{ K} \approx 1 ^{\circ}\text{C}$. [1]

2.1.3 Měrný objem

Jelikož tlak i teplota patří mezi intenzivní veličiny, měla by být pro správnou indikaci daného stavu suchého vzduchu i třetí veličina veličinou intenzivní. Definici intenzivní veličiny splňují ty veličiny, jejichž vlastnosti a hodnoty jsou totožné v celé soustavě. Následně i vyjmutý element látky nese stejné hodnoty veličiny jako celá soustava. Na rozdíl od extenzivní veličiny, kdy při rozdělení soustavy nese každý díl jen část hodnoty veličiny a výsledná hodnota soustavy je pak dána součtem těchto hodnot. Mezi extenzivní veličiny patří i objem či hmotnost. Aby nedošlo ke změně stavu látky změnou množství látky, zavádí se proto veličiny vztažené na jeden kilogram látky. Jedním z nich je měrný objem. Měrný objem je třetí potřebnou veličinou k určení daného stavu suchého vzduchu. Měrný objem je definován jako podíl objemu $V [\text{m}^3]$ dané látky v dané soustavě podělenou její hmotností $m [\text{kg}]$, tedy

$$v = \frac{V}{m} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]. \quad (4)$$

V některých případech je vhodnější použít veličinu zvanou hustota, jejíž převrácená hodnota je rovna právě měrnému objemu. Tudíž

$$\rho = \frac{1}{v} \quad (5)$$

tedy

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (6)$$

[1]

2.1.4 Rovnice ideálního plynu

Zmiňované stavové veličiny ideálního plynu jsou na sebe vázány rovnicí, jež může mít mnoho tvarů. Jedno z vyjádření je:

$$p \cdot v = r \cdot T, \quad (7)$$

kdy p [Pa] je tlak, v [$m^3 \cdot kg^{-1}$] je měrný objem, r [$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$] je měrná plynová konstanta a T [K] termodynamická teplota. Měrná plynová konstanta má pro vzduch hodnotu $r = 287,1$ [$J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$]. [1]

2.2 Výroba stlačeného vzduchu

Při výrobě stlačeného vzduchu se používá kompresor, který nasává atmosférický vzduch, ten stlačí a předá do rozvodné sítě. Existuje široká škála konstrukčních provedení kompresorů, které splňují nejrůznější požadavky různých oborů využívající stlačený vzduch. Vždy je při výběru nutné brát ohled na nároky kladené na moderní energetické stroje, kterými jsou: účelnost, účinnost, jednoduchá obsluha, bezpečnost provozu, spolehlivost, malý měrný příkon. [1]

Základní rozdělení kompresorů je podle způsobu, jakým stlačují médium:

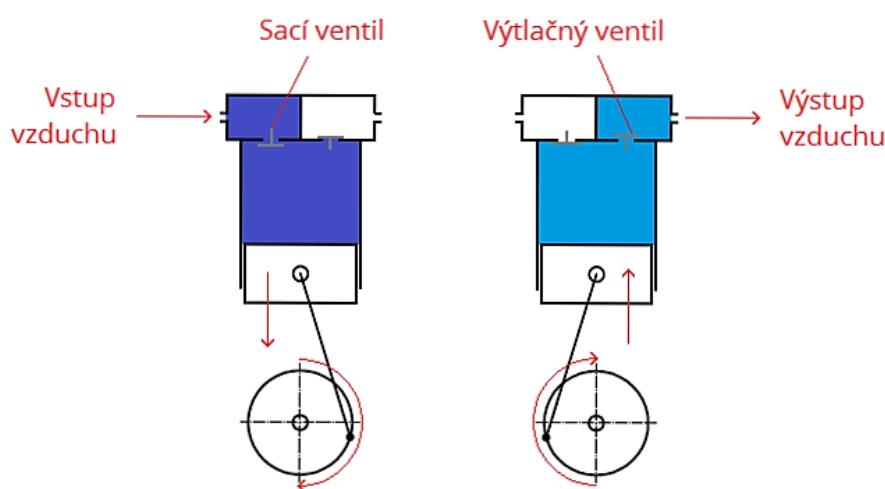
- a) Objemové (statické)
- b) Rychlostní (dynamické)

[1]

2.2.1 Objemové kompresory

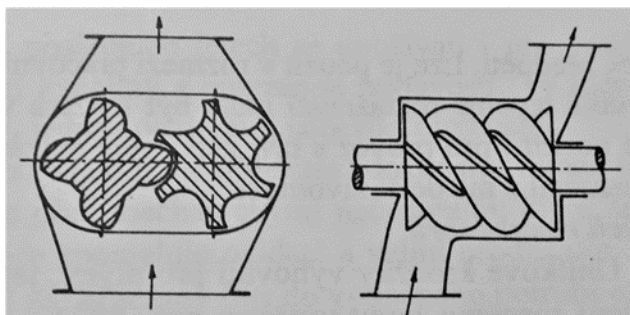
Principem těchto kompresorů je nasátí vzduchu do pracovního prostoru, jehož objem je po uzavření zmenšován, a tím dojde ke stlačení nasátého vzduchu. Principy, podle kterých pracuje zmenšení daného prostoru, lze rozdělit podle pohybu pracujícího členu. Pracovní element koná vratný nebo rotační pohyb. [3]

Mezi kompresory vykonávající vratný pohyb patří například pístové nebo membránové kompresory. Pístové kompresory jsou nejjednoduššími typy kompresorů, které se často využívají v dílenských provozech a ve stavebnictví jako zdroj stlačeného vzduchu pro pohon strojů a technologické účely. Nevýhodou pístových kompresorů je kontaminace vzduchu olejem (vyjma speciálních provedení). Membránové kompresory jsou nejčastěji využívány v chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu. U membránových, jak tomu název napovídá, je vzduch oddělen od pohyblivých částí kompresoru membránou. Díky tomu nedochází ke znečištění vzduchu či jiného média olejem. Zároveň se membránové kompresory vyznačují vysokou těsností.[3]

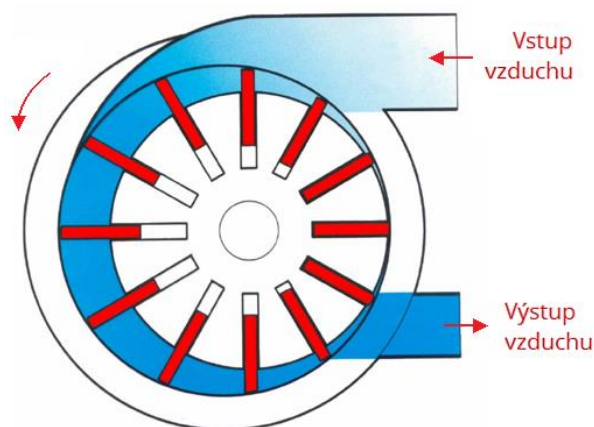


Obrázek 3: Princip pístového kompresoru
Zdroj: [9]

Rotační objemové kompresory mohou být s jedním, dvěma či více rotory. Jednorotorovými kompresory jsou například lamelové nebo kapalino-kružné kompresory. K vícerotorovým lze zařadit šroubové nebo zubové kompresory. Šroubový kompresor patří mezi moderní typy kompresorů, které postupně v provozech nahrazují kompresory pístové. Vzduch je tady nasáván a vytlačován dvěma do sebe zapadajícími šroubovými vřeteny s konkávním a konvexním profilem ploch. Vzduch je vytlačován v axiálním směru. Výhodami šroubových kompresorů oproti pístovým kompresorům je zejména nižší hmotnost, účinnost a menší hlučnost.[1]



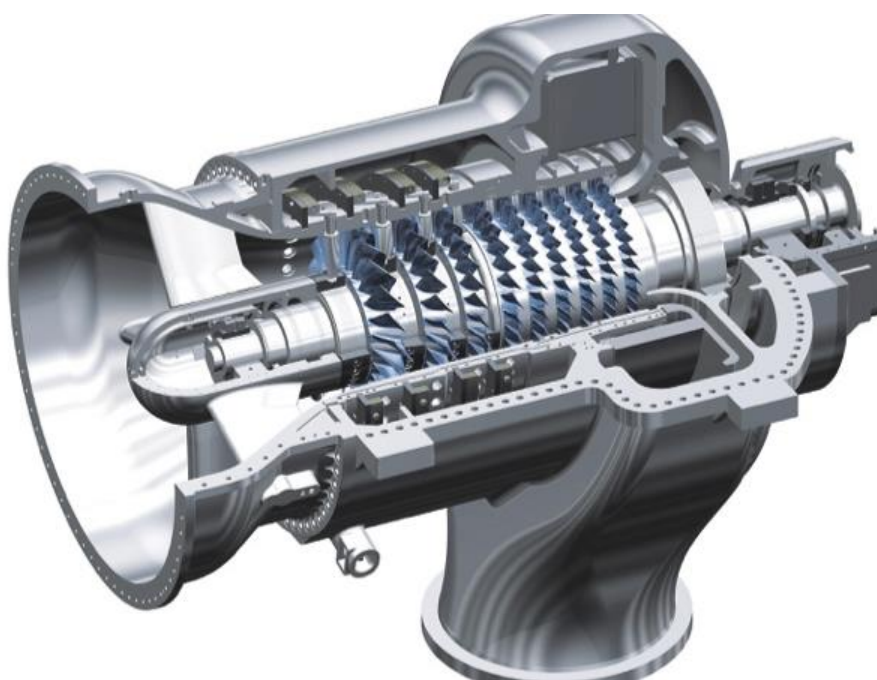
Obrázek 4: Šroubový kompresor
Zdroj: [1]



Obrázek 5: Lamelový kompresor
Zdroj: [9]

2.2.2 Rychlostní kompresory

Rychlostní kompresory, též zvané dynamické kompresory, pracují na rychlostním principu. Nasátý vzduch je urychlován, čímž dochází ke zvýšení kinetické energie plynu a následně je v difuzoru tato energie přeměněna na energii tlakovou. Na tomto principu pracují proudové kompresory (ejektory) a turbokompresory. U turbokompresoru je ceněna dlouhá životnost a delší intervaly revizí. Na druhé straně je jeho provoz spojen s vyšší hladinou hluku. Turbokompresory mohou být radiální, axiální nebo radiálně-axiální, kdy názvy jsou spojeny se směrem pohybu stlačovaného média. [1]



Obrázek 6: Kompresor Max1 značky MAN
Zdroj: [13]

2.3 Úprava stlačeného vzduchu

V poslední době, kdy využívání pneumatické či elektropneumatické energie patří mezi důležité oblasti průmyslu, je kladen čím dál větší důraz na kvalitu stlačeného vzduchu. Mezi možnostmi, jak lze upravit stlačený vzduch patří filtrace, sušení či chlazení a ohřev. [1]

Nežádoucími příměsi ve stlačeném vzduchu jsou pevné částice (prach), olej a voda. Množství pevných částic ve vzduchu se pohybuje v rozmezí od 0 do 2 g/m³. Jedním z důležitých prvků zabraňující znečištění stlačeného vzduchu je sací filtr. Běžný sací filtr dokáže zachytit až 96 % - 99 % hmotnosti celkového množství prachu, a to částice o velikosti 5 μm až 10 μm. Avšak počet částic, jež sací filtr nezachytí, se pohybuje okolo 75 % z celkového počtu. Část prachu je pak v kompresoru smíchána s olejem (záleží na typu kompresoru), kde se odstraní pomocí olejového filtru. U typů kompresorů, jež vyžadují mazání olejem (například pístový kompresor) je malá část oleje unášena do rozvodů vzduchu. Značná část tohoto oleje se spolu s vodním kondenzátem odvedou ze vzduchu do odkalovače. [1]

Aby nedocházelo k erozi potrubí nebo poškození pneumatických zařízení kvůli nedostatečné filtraci, lze pro další redukci prachových částic použít jemný vzduchový čistič. Se správnou filtrační vložkou je pak možné zachytit částice o rozměrech až 0,01 μm. [3]

Voda je součástí atmosférického vzduchu ve formě vodní páry. I přes vzrůstající tlak vzduchu v kompresní části rozvodu relativní vlhkost klesá, a to z důvodu zvyšující se teploty vzduchu. Ke kondenzaci však dochází v chladičích, dochlazovačích či v rozvodném potrubí. Takový kondenzát, může zapříčinit vznik koroze potrubí. A proto je třeba zajistit správný odvod tohoto kondenzátu z rozvodu. [1]

2.4 Rozvod stlačeného vzduchu

K dopravě stlačeného vzduchu od zdroje ke spotřebičům slouží rozvod stlačeného vzduchu. Součástí rozvodu stlačeného vzduchu je například potrubí, regulační a ovládací armatury i vzdušník sloužící jako zásobárna stlačeného vzduchu. [1]

2.4.1 Vzdušník

Součástí všech kompresorových stanic je tlaková nádoba, která se u použití stlačeného vzduchu nazývá vzdušníkem. Jako tlaková nádoba podléhá předpisům o výrobě, zkoušení a revizím. Za tlakovou nádobu lze považovat takovou nádobu, pro kterou platí, že součin jejího objemu (v litrech) a přetlaku uvnitř této nádoby (v MPa) je nejméně 10. [1]

K funkcím vzdušníku patří například zabránění přenosu pulzací od kompresoru do rozvodné sítě nebo vyrovnávání kolísání tlaku v rozvodné síti. Vzdušník slouží jako zásobárna stlačeného vzduchu pro zabránění krátkým střídáním mezi zatížením a odlehčením chodu kompresoru. [1]

2.4.2 Potrubí

Pro dopravu stlačeného vzduchu mezi zdroje, vzdušníky a spotřebiči slouží potrubní rozvody. Základním parametrem potrubních rozvodů pro stlačený vzduch je jmenovitá světlost DN a jmenovitý tlak PN. Další parametr potrubních rozvodů je konstrukční materiál potrubí. Potrubí určené pro stlačený vzduch je vyráběno z mnoha materiálů, například ocel, hliník, plast, mosaz, pro zajištění pohyblivosti je možné použít gumové nebo plastové hadice. [28]

Existují firmy, které se zabývají celými potrubními systémy, které vynikají nenáročností montáže. Celý systém je možné poskládat dohromady jednoduše, rychle a těsně. Jedním z takových potrubních systémů jsou potrubní rozvody značky AIRNET, které nabízejí širokou škálu tvarů a délek potrubí, tvarovky potrubních rozvodů a různá příslušenství. Instalace takového systému je až o 85 % rychlejší než u běžných systémů. [27]

Je důležité správně zvolit průměr trubky tak, aby odpovídal požadovanému průtoku. [4]

Tabulka 3: Výběr základních světlostí

Jmenovitá světlost DN – preferované hodnoty			
DN	(")	DN	(")
6	1/8	125	5
8	1/4	150	6
10	3/8	200	8
15	1/2	250	10
20	3/4	300	12
25	1	350	15
32	1 1/4	400	16
40	1 1/2	450	18
50	2	500	20
65	2 1/2	600	24
80	3		
100	4		

Zdroj: Výběr z ČSN EN ISO 6708 s účinností od 1. 12. 1996

Další z požadavků je pracovní přetlak. Zvolené potrubí by mělo splňovat pracovní přetlak potřebný pro daný rozvod. [4]

Tabulka 4: Jmenovité tlaky PN

Jmenovité tlaky PN	
1	40
1,6	63
2,5	80
4	100
6	125
10	160
16	200
25	250

Zdroj: Výběr z ČSN 13 0010 s účinností od 1. 7. 1990

Nejčastěji se volí ocelové potrubí, ale můžeme se setkat i s potrubím plastovým. Zvolené potrubí by mělo být schopné odolávat pulzacím (vzniklých v rozvodu), náhodným mechanickým poškozením nebo například vlivu změně teploty vzduchu nebo okolního prostředí. Pro zabránění poruchy potrubí vlivem teploty je nutné použít kompenzátor, který dokáže dilataci vzniklou změnou teploty absorbovat. [4]

Mezi nejúčinnější způsoby spojování potrubí patří svařování. Tato metoda pod vedením zkušeného svářeče dokáže zaručit stoprocentní těsnost. Potrubí, u kterého svařování nepřipadá v úvahu, lze spojit i jinými způsoby. Ať to je pomocí závitů, rychlospojek nebo s užitím přírub. Jejich výhodami je snadná demontáž a náhrada poškozené části potrubí. [4]

2.4.3 Armatury

Armatury jsou součástí rozvodů stlačeného vzduchu. Mají funkci redukční, regulační a ovládací. Mezi požadované vlastnosti patří snižující se těsnost během používání, malý průtokový odpor, jednoduchá konstrukce, nenáročná obsluha a údržba. [1]

2.4.3.1 Uzavírací armatury

K uzavíracím armaturám patří uzavírací ventily, kulové ventily a šoupátka. Použití ventilů je vyhovující od nejmenších světlostí až do světlostí DN 200, a to pro vysoké pracovní tlaky. Nejčastěji se však používají přímé přírubové ventily zejména pro tlaky PN 10 a PN 60. Aplikace šoupátek s sebou přináší malé průtokové odpory a možnost průtoku média v obou směrech. Šoupátka lze sehnat od světlosti DN 40 a větší. Z kulových ventilů se nejvíce používají přímo průtočné kulové ventily, které se vyznačují dokonalou těsností a též malým průtočným odporem. [1]

2.4.3.2 Redukční armatury

Pro zařízení, které je nutno připojit k rozvodu stlačeného vzduchu o nižším tlaku, než nabízí stávající rozvod vzduchu, není třeba instalace nové kompresorové stanice a nového rozvodu. Pro tyto případy lze použít redukční ventily, které dokáží zredukovat tlak na tlak požadovaný. [4]



Obrázek 7: Redukční ventil
Zdroj: [14]

2.4.3.3 Regulační armatury

Regulační armatury slouží k regulaci množství vzduchu v potrubí. V dnešní době se pro automatizaci obvodů většinou volí regulační ventily s elektrickým pohonem. Jako příklad regulační armatury lze uvést škrťací ventil. [29]



Obrázek 8: Škrťací ventil
Zdroj: [15]

2.4.3.4 Pojistné ventily

Aby nedošlo k poškození zařízení nebo vzdušníku je do rozvodu stlačeného vzduchu zapojen pojistný ventil. Pojistný ventil je většinou nastaven tak, aby při případném zvýšení tlaku v obvodu (nad hodnotu pracovního tlaku), byl tento tlak vzduchu usměrněn do atmosféry a tím nedošlo k poškození zařízení. [29]

3 Měření parametrů stlačeného vzduchu

Pro správnou funkci spotřebičů ať už stlačeného vzduchu nebo jiné technologie je velmi důležité zaregulování. Tím je možné co nejvíce zefektivnit možnosti a použití daného spotřebiče nebo snížit energetické nároky na jeho chod. K zaregulování je nutné znát požadavky na provoz spotřebiče, stav technologie a jeho energetické bilance. Na rozdíl od požadavků na provoz spotřebiče, jež jsou většinou udávány od výrobce spotřebiče, stav technologie spolu s jejími určujícími veličinami je třeba určit pomocí měřících přístrojů.

Měření systému technologie vyžaduje znalosti v oblasti měřící techniky, které jsou nezbytné ke správné volbě měřícího zařízení. V dnešní době je mnoho způsobů měření různých veličin, přičemž ne všechny lze pro dané měření použít. Některá volba je limitována přesností, rozsahem nebo i její cenou. Měřící přístroje je nutné kalibrovat a pravidelně ověřovat. [1]

K měřeným veličinám stlačeného vzduchu patří teplota, tlak, průtočné množství, vlhkost nebo i výkon kompresorového motoru a jiné. [1]

3.1 Měření teploty

Teplota jako veličina hraje roli ve většině stavů a procesů v přírodě. Existuje mnoho principů měření teploty, ale v technologických rozvozech se nejvíce používají kontaktní teploměry s elektrickým výstupem (odporové teploměry, termoelektrické snímače). U kontaktních teploměrů je měřící senzor v dotyku s měřeným objektem (médiem). Aby se však nepoškodily ať už mechanickým, chemickým nebo fyzikálním působením, umisťují se ve většině případů do ochranných jímek. [5]

3.1.1 Bimetalové teploměry

Principem bimetalových teploměrů je roztažnost pevných látek v závislosti na teplotě, v praxi spíše dvou rozdílných roztažností u dvou rozdílných materiálů (kovů). Jde o dva kovové, k sobě pevně připojené pásky, které jsou na jedné straně pevně uchyceny. Díky tomu, že každý pásek se vlivem rozdílné teplotní roztažnosti prodlužuje či zkracuje jinak než ten druhý, dochází k prohnutí, jež může pomocí ručičky přímo reflektovat aktuální teplotu. Proto jsou bimetalové teploměry nejčastěji využívány k místnímu měření. Po přidělení spínacího kontaktu na bimetalový pásek je možné teploměr použít jako teplotní spínač. [5]



Obrázek 9: Bimetalový teploměr
Zdroj: [11]

3.1.2 Odporové teploměry

Odporové teploměry pracují na závislosti elektrického odporu kovů a polovodičů na teplotě. K nejčastěji používaným materiálům kovových odporových snímačů teploty bývají platina a nikl. Označení těchto snímačů je odvozeno od základního odporu při teplotě 0 °C. Například nejběžnější platinový odporový teploměr Pt100 má při teplotě 0 °C odpor $R_0 = 100 \Omega$. Dále se vyrábějí platinové snímače se základní hodnotou odporu 50, 200, 500, 1000, či 2000 Ω . Označení niklových snímačů je podobné těm platinovým a vychází ze stejného principu, tedy Ni100, Ni200, Ni500, Ni1000 nebo Ni2000. [6]

K polovodičovým odporovým sensorům patří NTC-termistory (negastory), PTC-termistory (pozistory) a monokrystalické senzory teplot. K výhodám negastorům patří například velká citlivost nebo malá hmotnost čidla a k nevýhodám časová nestálost. Pozistory jsou vhodné pro měření úzkého teplotního intervalu, zvláště pro signalizační účely. [5]

3.1.3 Termoelektrické teploměry – termočlánky

Princip termoelektrických teploměrů je založen na Seebeckově jevu, který popisuje převod tepelné energie na elektrickou energii. Obvod termočlánku se skládá ze dvou kovových vodičů. Mezi vodiči vlivem rozdílných teplot mezi horkým a studeným spojem začne protékat elektrický proud, čímž dojde ke vzniku termoelektrického napětí na studeném spoji termočlánku. [5]

Základní typy termočlánků (spolu s jejich základními vlastnostmi) jsou uvedeny v tabulce č. 5.

Tabulka 5: Základní typy termoelektrických článků a přibližné hodnoty jejich využití

KÓD	složení	dlouhodobě (°C)	krátkodobě (°C)
K	NiCr (+) NiAl (-)	0 až +1100	-180 až 1350
T	Cu (+) CuNi (-)	-185 až +300	-250 až +400
J	Fe (+) CuNi (-)	+20 až 700	-180 až +750
N	NiCrSi (+) NiSiMg (-)	0 až +1100	-270 až +1300
E	NiCr (+) CuNi (-)	0 až +800	-40 až +900
R	PtRh13 (+) Pt (-)	0 až +1600	-50 až +1700
S	PtRh10 (+) Pt (-)	0 až +1550	-50 až +1750
B	PtRh30 (+) PtRh6 (-)	+100 až +1000	+100 až +1820

Zdroj: Data čerpána z [6]

3.2 Měření tlaku

Měření tlaků probíhá s využitím různých fyzikálních zákonů. Ve většině případů se jedná o deformační tlakoměry, které se liší pouze tím, jaký prvek tlakoměru je deformován, a jak je tato deformace přenesena na informaci o daném tlaku. [5]

3.2.1 Deformační tlakoměry

Deformační tlakoměry pracují na efektu pružné deformace. Působením tlaku mění část tlakoměru svůj geometrický tvar. Tato změna je pomocí různých mechanismů převedena na analogový ukazatel tlaku. Jedním z typů deformačních tlakoměrů jsou trubicové tlakoměry. Deformačním prvkem je Bourdonova trubice. Jedná se o trubici oválného nebo eliptického průřezu, jež bývá stočena do tvaru písmene C nebo písmene U. Díky zvyšujícímu se tlaku má trubice snahu svůj průřez změnit z oválného či eliptického na kruhový. Při upevnění jednoho konce trubice k rámu tlakoměru dojde snahou změnit průřez k vychýlení druhého konce z původní polohy. Toto vychýlení je pak pomocí převodového ústrojí ukazatelem tlaku. Měřicí rozsah trubicových tlakoměrů úzce souvisí s volbou materiálu trubice. [5]

Jako další příklad je možné uvést membránové tlakoměry, které používají k měření tlaku deformaci kovové membrány zvlněnou soustředěnými kruhy. Membrána je pevně uložena mezi dvě příruby, kdy z jedné strany je pod membránu přiváděn měřený tlak. Průhyb membrány vyvolaný působícím tlakem je následně přenášen na ukazatel. Výhodou těchto tlakoměrů je vyšší citlivost na změnu tlaku než u trubicových tlakoměrů. [5]

V dnešní době je možná více než kdy předtím potřeba takových snímačů tlaků, které jsou schopné přenášet výstupní signál na větší vzdálenost. Proto největší uplatnění v technologických procesech tak nacházejí tlakoměry, jejichž výstupem bývá elektrický signál. Měření tlaku však ve většině případů vychází z deformačních či hydrostatických tlakoměrů, na které je připojen sekundární senzor, který výsledný tlak převede na výstupní elektrický signál. Zařízení schopna převést hodnotu tlaku na elektrický signál se nazývají převodníky. [5]

Možností, jak daný elektrický signál získat, je mnoho. Základní senzory lze rozdělit podle změny stavu primárního senzoru. Buď je možné použít senzory k určení změny polohy (senzory potenciometrické, indukční, kapacitní, optické) nebo změny mechanického napětí (senzory tenzometrické, rezonanční, piezometrické). [5]

Výhody a nevýhody vybraných typů senzorů jsou uvedeny v tabulce č. 6.

Tabulka 6: Přednosti a nedostatky vybraných typů snímačů tlaku

Typ senzoru	Výhody	Nevýhody
Kapacitní	<ul style="list-style-type: none"> - velmi dobrá přesnost a stabilita - kompaktní konstrukce čidla - rychlá odezva - malý drift nuly - s keramickou membránou odolné vůči agresivním médiím - vhodné i pro měření vakua - inteligentní snímače vybavené kompenzací okolních vlivů 	<ul style="list-style-type: none"> - citlivost na parazitní kapacity přívodů - citlivost na vibrace
Tenzometrické	<ul style="list-style-type: none"> - velmi dobrá přesnost a stabilita - příznivé dynamické vlastnosti - malé rozměry čidla - snímače s křemíkovou membránou nevykazují hysterezi - inteligentní snímače vybavené kompenzací okolních vlivů 	<ul style="list-style-type: none"> - nutnost teplotních korekcí - vysoké pořizovací náklady
Piezoelektrické	<ul style="list-style-type: none"> - příznivé dynamické vlastnosti - vhodné i pro měření rychlých dějů - vhodné i pro vysoké tlaky a teploty - možná miniaturizace čidla 	<ul style="list-style-type: none"> - obtížné zpracování signálu, nutnost použití zesilovače s vysokým vstupním otvorem - nevhodné pro měření statických tlaků
Rezonanční	<ul style="list-style-type: none"> - moderní snímače s mikroprocesorovým řízením umožňují měřit současně statický tlak i rozdíl tlaků - výstupem je frekvence, jednoduchý převod na digitální signál - nevykazuje hysterezi - inteligentní snímače vybavené kompenzací okolních vlivů - vysoká přesnost a stabilita 	<ul style="list-style-type: none"> - nutnost teplotních korekcí - vysoké pořizovací náklady

Zdroj: [5]

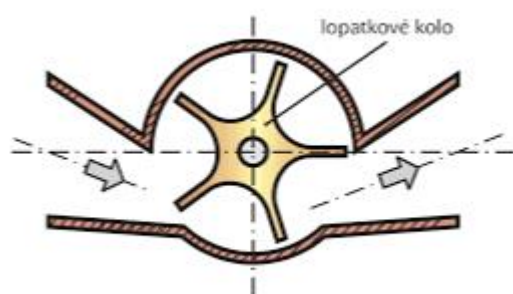
3.3 Měření průtoku

Způsobů, jak zjistit proteklé množství tekutin v potrubních systémech, je celá řada. Široký výběr je dán možnostmi využít různé fyzikální principy, velkou škálou měřitelných tekutin s různými fyzikálními i chemickými vlastnostmi. Každý z průtokoměrů svými přednostmi či nedostatky splňuje určité podmínky pro dané měření a náročnost uživatele. [5]

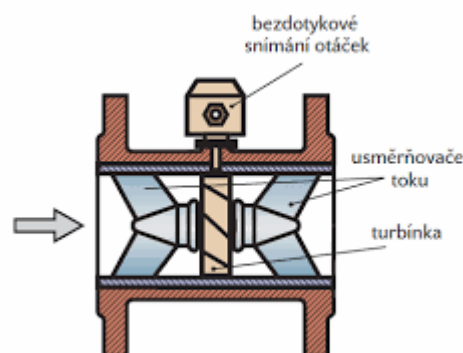
Některé metody už však byly nahrazeny novějšími, přesnějšími. V technologické praxi nacházejí nejčastěji svá uplatnění jen některé typy průtokoměrů. K takovým patří rychlostní měřidla (turbínkové a lopátkové, ultrazvukové, vírové průtokoměry), hmotnostní průtokoměry (Coriolisové průtokoměry) či měření průtoku pomocí škrťacích členů. [8]

3.3.1 Turbínové a lopatkové průtokoměry

Součástí těchto průtokoměrů jsou turbíny nebo lopatková (popř. šroubová kola), která jsou silovým účinkem tekutiny uváděna do rotačního pohybu. Střední rychlost proudění kapaliny je pak úměrná rychlosti otáčení. Průtokoměry dělíme na radiální a axiální. Nevýhodami turbínových a lopatkových průtokoměrů je neschopnost měřit malé průtoky (rotor se začíná otáčet až po dosažení minimálního průtoku) i relativně velká trvalá tlaková ztráta. [5]



Obrázek 10: Radiální lopatkový průtokoměr
Zdroj: [5]



Obrázek 11: Turbínový axiální průtokoměr
Zdroj: [5]

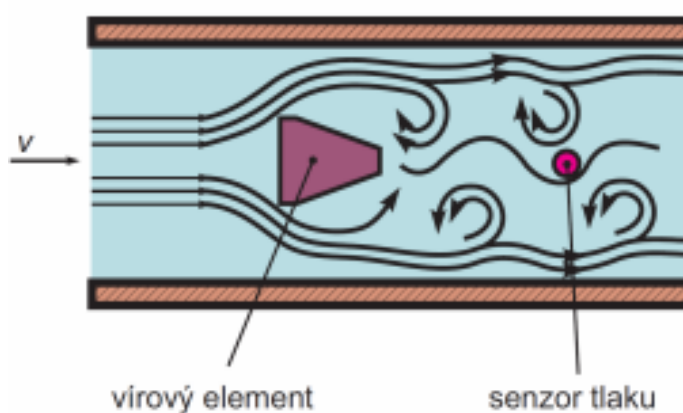
3.3.2 Ultrazvukové průtokoměry

K měření rychlosti proudění se využívá metod, kdy se se změnou rychlosti proudění změní i rychlost (frekvence) ultrazvukového vlnění. Mohou pracovat s vyhodnocováním doby průchodu signálu, která se mění s rychlostí proudění nebo s principem Dopplerova jevu. [8]

K přednostem ultrazvukových průtokoměrů patří možnost měřit nevodivé tekutiny, měřit i při malých průtocích, rychlá odezva i malá tlaková ztráta. S využitím Dopplerova jevu je ale možné měřit jen zakalená či znečištěná média. [5]

3.3.3 Vírové průtokoměry

Při obtékání tělesa neproudnicového tvaru umístěného kolmo na směr proudící tekutiny dochází ke tvorbě vírů za obtékaným tělesem. Tvorba vírů je podmíněna dostatečnou rychlostí proudění. Tvorba vírů se pravidelně střídá na jedné a druhé straně přepážky, pootočené o 180° , kdy měřonosnou veličinou měření rychlosti proudění je frekvence tvorby vírů. Výhodami vírových průtokoměrů je výstupní signál ve formě frekvenčního signálu. Vykazují trvalou tlakovou ztrátu, není možné měřit malé průtoky (podmínkou měření je turbulentní charakter proudění). [5]



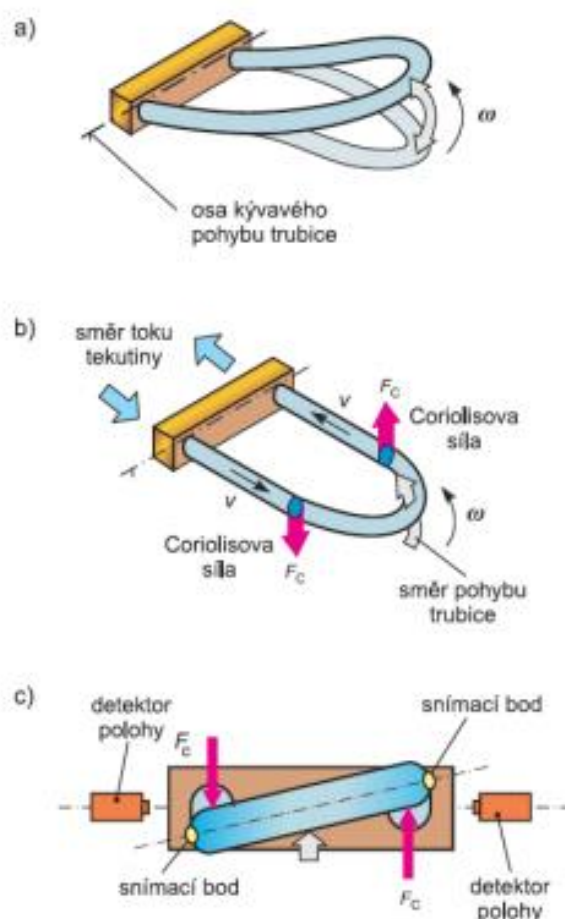
Obrázek 12: Vírový průtokoměr
Zdroj: [5]

3.3.4 Měření pomocí škrťacích členů

K měření se využívá principu zachování energie popsaného Bernoulliho rovnicí. Při proudění tekutiny nabývá tekutina kinetickou energii a ztrácí energii tlakovou. To znamená, že velikost dynamického tlaku roste a velikost statického klesá. Rychlost proudící tekutiny je možné určit ze znalosti dynamického tlaku. Dynamický tlak lze určit jako rozdíl statických tlaků před překážkou (umístěnou kolmo na směr proudění) a za překážkou. Nevýhodou je trvalá tlaková ztráta. [6]

3.3.5 Coriolisovy průtokoměry

V průběhu posledních let se Coriolisovy průtokoměry rozšířili do mnoha oblastí měření. Využívají principu Coriolisovy síly, která vzniká při průtoku tekutiny potrubím, jenž se pohybuje úhlovou rychlostí ω [rad/s]. Tato síla je přímo úměrná protékajícímu průtoku média potrubím. Coriolisovy průtokoměry měří hmotnostní průtok. Řadí se k nejpřesnějším a tím i k dražším měřidlům průtoku. Vyznačují se širokým uplatněním v různých oblastech průmyslu. Použitelnost se obvykle omezuje na potrubí o rozměrech do 100 mm. U plynných médií je nutné pro efektivitu dosáhnout vyšší rychlosti proudění (desítky až stovky m/s), což má za následek velké ztráty tlaku. [5]



Obrázek 13: Princip Coriolisova průtokoměru
Zdroj: [16]

4 Návrh experimentálního zařízení

Předchozí kapitoly se zabývaly základní problematikou techniky stlačeného vzduchu. Tato kapitola je zaměřena na praktický návrh experimentálního standu pro zkoušení lopatkových strojů a modifikací příslušného rozvodu stlačeného vzduchu. Tento experimentální stand bude sloužit v laboratoři Katedry energetických zařízení TUL pro výzkum lopatkových strojů poháněných vzduchem.

4.1 Zadávací parametry

Pracovním médiem experimentálního zařízení bude stlačený vzduch o maximálním pracovním tlaku 20 bar. Zařízení bude napojeno na rozvod v nové laboratoři o jmenovitém průměru potrubí DN50. Testovacími stroji by měly být lopatkové stroje typu kompresor a turbína, jejichž technické specifikace mohou být rozličné, proto je snahou navrhnout univerzální experimentální zařízení.

Tabulka 7: Tabulka provozních parametrů

Jmenovitý tlak	20 bar
Rozměr potrubí	DN50
Rozsah teplot	0 °C až 100 °C
Objemový průtok	10 l/s

Zdroj: autor

Výstupem testování lopatkového stroje by mělo být srovnání energetických a hmotových bilancí získaných výpočtem při návrhu stroje a bilancí získaných experimentálním měřením. U testování lopatkového stroje typu turbína je do testovaného lopatkového stroje přiváděno určité množství suchého stlačeného vzduchu o určité teplotě a tlaku, kdy tlak a teplota jsou nositeli energie. Část této tlakové energie je převedena na energii mechanickou. U testování lopatkových strojů typu kompresor je přeměna energie opačného charakteru. Pro určení velikosti mechanické energie (nebo mechanického výkonu odebíraného na hřídeli lopatkového stroje) je nutné znát otáčky a momentovou charakteristiku lopatkového stroje. Jelikož senzory pro měření otáček a kroutícího momentu na hřídeli jsou úzce spjati s rozsahy měření těchto veličin, bude jejich výběr záležet na typu a účelu použití lopatkového stroje (tedy na objednateli měření). Proto je předmětem této práce pouze rozvod stlačeného vzduchu a jeho měření.

Při navrhování zařízení hraje důležitou roli volby komponentů a měřících zařízení. Důležitá je cena, u měřících senzorů přesnost i určitá automatizace ovládacích armatur a senzorů měření. Výstupem měřících senzorů by měl být analogový proudový signál 4–20 mA s komunikačním protokolem HART.

Návrh experimentálního standu je spojen s návrhem na úpravy rozvodu stlačeného vzduchu a jeho umístění v budoucí laboratoři Katedry energetických zařízení. Experimentální zařízení je potřeba otestovat a navrhnout postup experimentu. K otestování experimentálního standu bude použito repasované turbodmychadlo, které je možné použít jako lopatkový stroj typu kompresor nebo turbína.

4.2 Návrh postupu experimentu

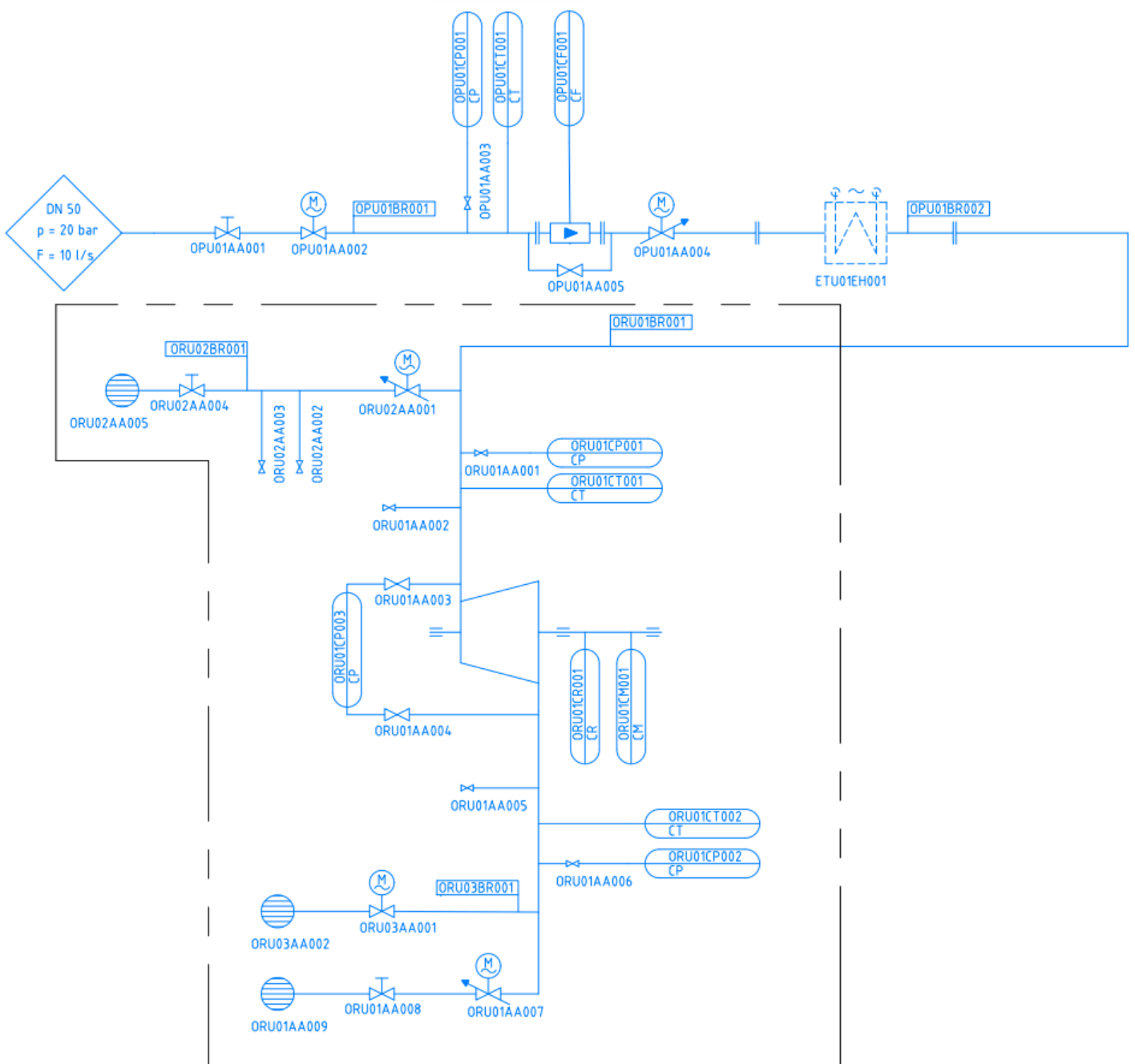
Kvůli určení energetické a hmotnostní bilance je nutné změřit parametry stlačeného vzduchu a lopatkového stroje. Jako parametry, potřebné pro určení energetické a hmotnostní bilance, jsou myšleny ty veličiny, pomocí kterých je možné určit přeměnu energie stlačeného vzduchu na energii mechanickou. U stlačeného vzduchu se jedná o teplotu, tlak a průtok zatímco u lopatkového stroje o otáčky a kroutící moment na hřídeli.

Harmonogram postupu experimentu je důležitý pro tvoření PID schématu experimentálního zařízení. Navržený časový postup měření:

- 1) Určení vlastností vzduchu vystupujícího z rozvodu stlačeného vzduchu
 - a) Měření tlaku
 - b) Měření teploty
 - c) Měření průtoku
- 2) Určení vlastností vzduchu vstupujícího do testovací části experimentálního standu
 - a) Měření tlaku
 - b) Měření teploty
- 3) Určení parametrů lopatkového stroje
 - a) Měření otáček
 - b) Měření kroutícího momentu
- 4) Určení vlastností vzduchu vystupujícího z testovací části experimentálního standu
 - a) Měření teploty
 - b) Měření tlaku
- 5) Určení tlakového spádu na lopatkovém stroji

4.3 Návrh experimentálního standu

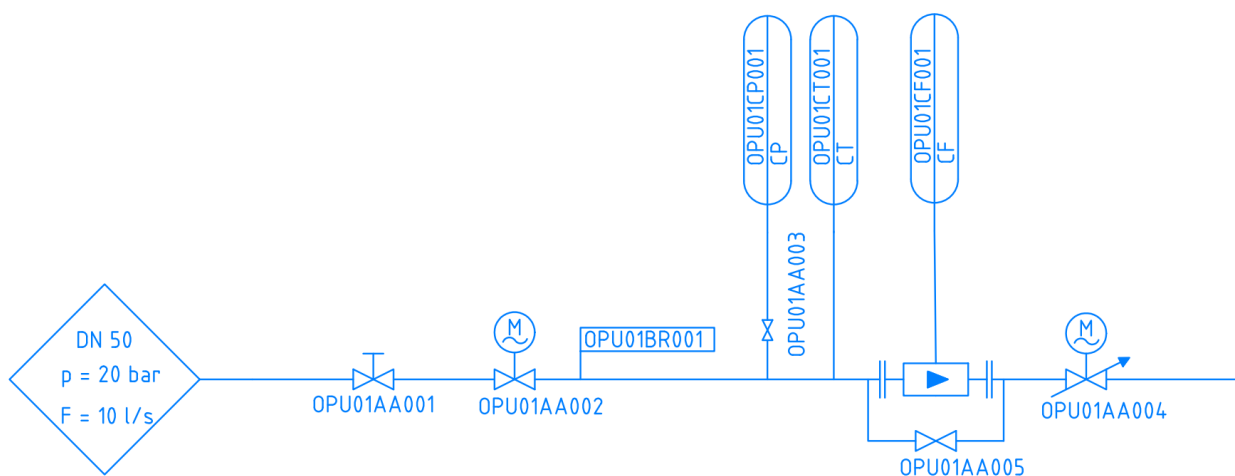
Na následujícím obrázku (č.14) je uveden návrh experimentálního standu společně s návrhem úprav rozvodu stlačeného vzduchu.



Obrázek 14: PID schéma návrhu rozvodu v budoucí laboratoři a navrženého experimentálního standu
Zdroj: autor

V nově vybudované laboratoři Katedry energetických zařízení jsou naplánovány rozvody stlačeného vzduchu obdobně jako ve stávající laboratoři. Budovány budou dva samostatné rozvody: nízkotlaký (12 bar) a vysokotlaký (20 bar). Pro výrobu nízkotlakého stlačeného vzduchu bude použit šroubový stacionární kompresor typ KS 35, vzduchem chlazený, mazaný olejem. Z kompresoru putuje stlačený vzduch do vymrazovacího sušiče typu ES 15. Pro výrobu vysokotlakého stlačeného vzduchu bude použit dotlačovací pístový kompresor-booster HB 15, který z nízkotlakého vyrobí vysokotlaký. Návrh experimentálního standu počítá s vysokotlakým systémem stlačeného vzduchu. Pro akumulaci stlačeného vzduchu 20 bar bude instalován vzdušník o objemu 8,2 m³ o tlakové třídě PN39. Tento vzdušník bude použit ze stávající kompresorové stanice a jeho stav umožňuje podle revizního technika provoz jen pro maximální tlak 20 bar.

Pro zmenšení rozměrů experimentálního standu pro testování lopatkových strojů bylo navrženo, aby měřicí senzory určující parametry stlačeného vzduchu, vstupující do experimentálního zařízení, byly součástí rozvodu stlačeného vzduchu. Těmito senzory je myšlen snímač absolutního tlaku OPU01CP001, snímač teploty OPU01CT001 a senzor měření průtoku OPU01CF001. Nejen, že pro zástavbu testovacím zařízením bude možné využít menší plochy, ale také bude možné použít měřicí senzory i pro jiné experimenty, prováděné v této laboratoři. Přívod stlačeného vzduchu do jeho rozvodu je oddělen kulovým ventilem OPU01AA001 i uzavíracím ventilem s elektrickým pohonem OPU01AA002 pro dálkově řízené otevírání a zavírání rozvodu stlačeného vzduchu. Průtok je posléze řízen regulačním ventilem OPU01AA004 s elektrickým pohonem. Pro napojení testovacích zařízení je vysokotlaký rozvod stlačeného vzduchu ukončen přírubou EN 1092.



Obrázek 15: PID schéma rozvodu stlačeného vzduchu
Zdroj: Autor

Kvůli snaze zajistit co nejvšestrannější použití experimentálního zařízení je v rozvodu stlačeného vzduchu počítáno s elektrickým ohřívacem. Ten by měl být schopný ohřívat stlačený vzduch až na teplotu alespoň 100 °C, schopný pracovat při tlaku 20 bar a být napojitelný pomocí příruby EN 1092 na rozvod stlačeného vzduchu a experimentální stand.

Tabulka 8: Návrhové parametry ohříváče

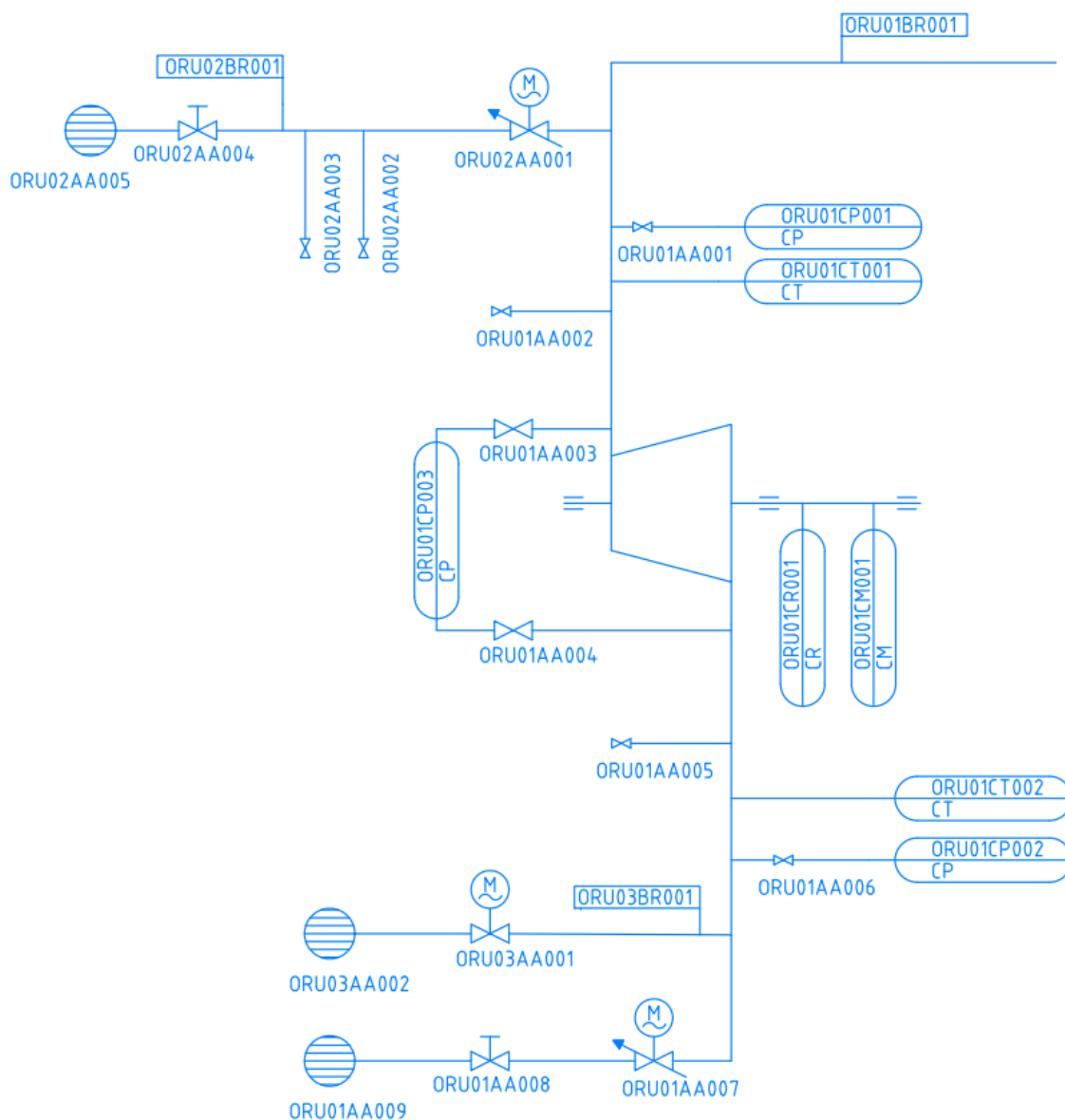
Průtok	10 l/s
Regulační rozsah	20 °C až 100 °C
Max. tlak	20 bar
Připojení	příruba EN 1092

Zdroj: autor

Ostatní komponenty uvedené na obrázku č. 16 jsou součástí experimentálního zařízení, které je k rozvodu stlačeného vzduchu připojeno pomocí normalizované příruby EN 1092. Před expanzní částí experimentálního zařízení je potřeba pro dosažení co největší přesnosti testování lopatkového stroje znovu přeměřit vstupní hodnoty stlačeného vzduchu. Obdobně jako u měření v rozvodu stlačeného vzduchu v laboratoři bude i tady nutné změřit tlak (ORU01CP001) a teplotu (ORU01CT001) vzduchu v potrubí, jenž proudí na lopatkový stroj. Snímač tlaku ORU01CP001 je opět připojen až za kulový ventil ORU01AA001 a umístěn před snímač teploty ORU01CT001. Jelikož ten je umístěn v potrubí spolu jímkou, která by mohla snímání teploty znepresnit. Pro zjištění tlakového spádu na lopatkovém stroji je důležité změřit tlakovou diferencí. Proto je připojen měřič tlakové difference ORU01CP003, který je uložen mezi dvěma kulovými ventily ORU01AA002 a ORU01AA004. Měření výstupních hodnot stlačeného vzduchu vystupujícího z expanzní části zařízení je projektováno obdobně jako měření před touto částí (snímač teploty ORU01CT002 a snímač tlaku ORU01CP002 s kulovým ventilem ORU01AA006).

Expanze do okolní atmosféry je možná ve třech větvích zařízení. Větev číslo ORU02BR001 slouží jako baypass. Tato větev končí výfukem do atmosféry a množství protékajícího vzduchu je řízeno elektricky poháněným regulačním ventilem. Pomocí baypassu je možné snížit průtok a tlak v hlavní větvi zařízení. Pomocí této je možné jemné nastavení průtoku nebo protitlaku na vstupu do experimentálního zařízení. Hlavní větev číslo ORU01BR001 je též ukončena výfukem do atmosféry. Výfuk hlavní větve je také pro univerzálnost použití řízen elektricky poháněným regulačním ventilem. Pro jednoduchý výfuk bez tlakových ztrát na regulačních členech je projektována větev s číslem ORU01BR001.

Předchozí dva odstavce popisují zařízení při testování lopatkového stroje typu expanzní plynová turbína. Při testování stroje typu turbokompresor bude sání probíhat větví ORU03BR001. Na sání proběhne měření tlaku (ORU01CP002) a teploty (ORU01CT002). Po kompresní části proběhne měření teploty (ORU01CT001) a tlaku (ORU01CP001), dále možné tlakovou diferencí před a za kompresní částí experimentálního standu. Pro zabránění úniku stlačeného vzduchu ven z experimentálního standu větví ORU01BR001 je plánováno zajistit použitím ucpávky. Protitlak bude regulován pomocí regulačního ventilu ORU02AA001. Armatury ORU02AA002 a ORU02AA003 jsou navrženy pro připojení průtokoměru pro měření průtoku stlačeného vzduchu. Expanze stlačeného vzduchu do atmosféry by proběhla pomocí tlumiče ORU02AA005.

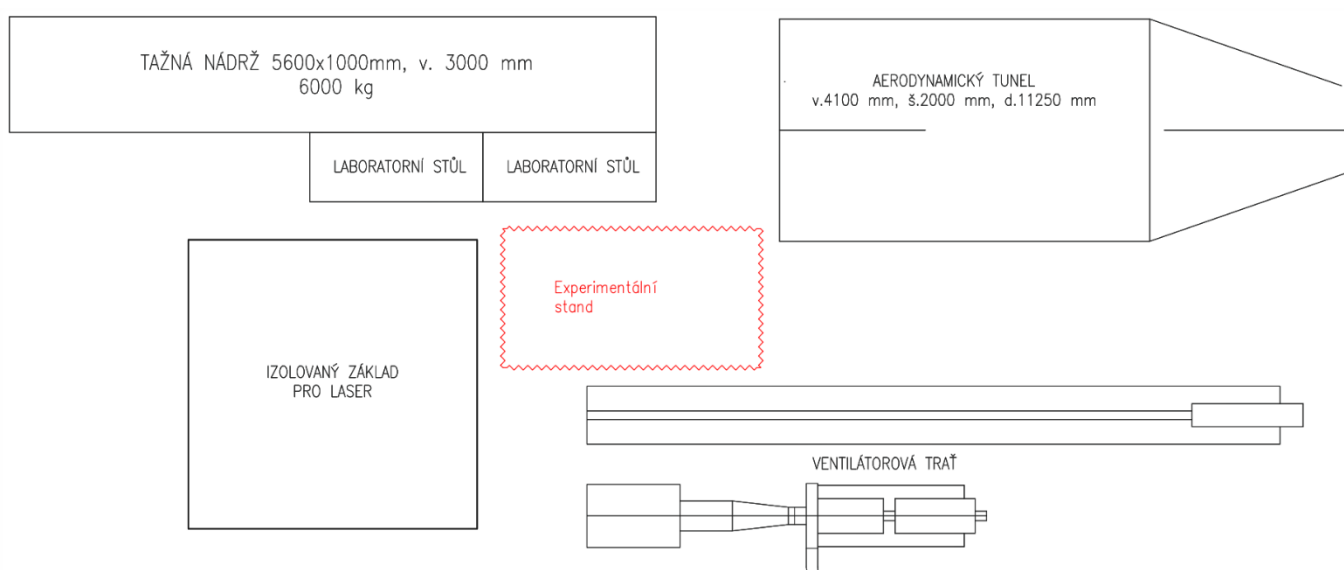


Obrázek 16: PID schéma experimentálního zařízení
Zdroj: Autor

4.4 Dispozice experimentálního standu v laboratoři

Jelikož navrhující zařízení je úplně nové, je potřeba pro něj najít v laboratoři místo, kde by nepřekáželo k bezpečnému provozu ostatních experimentálních zařízení. S volbou místa koresponduje i potřeba změnit a doplnit stávající rozvod stlačeného vzduchu potřebný pro experimentální stand k testování lopatkových strojů.

Na obrázku č. 17 je pomocí červeně zbarvené vlnovkové čáry zobrazena oblast případného umístění experimentálního standu.

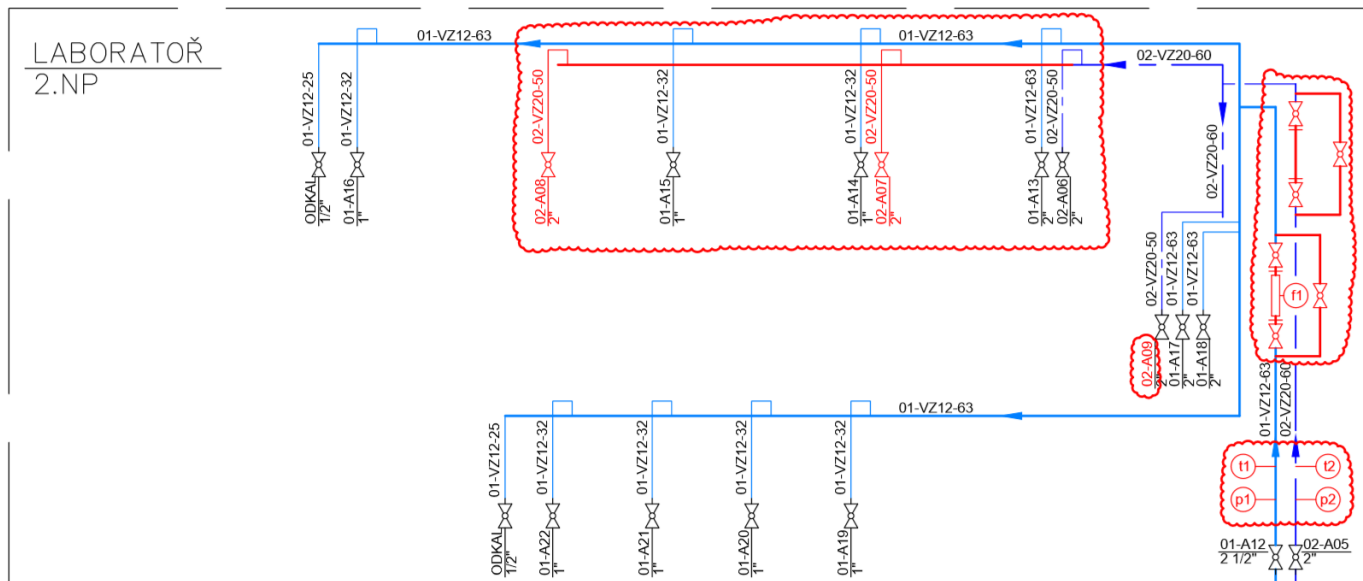


Obrázek 17: Návrh umístění experimentálního standu
Zdroj: 33

4.5 Úprava rozvodu stlačeného vzduchu v laboratoři

Aby bylo možné znát vlastnosti stlačeného vzduchu vstupujícího do budoucí laboratoře Katedry energetických zařízení je navrženo zapojení měřících senzorů teploty, tlaku a průtoku. Měření teploty a tlaku bude probíhat ve větvích s vysokým tlakem (20 bar) i s nízkým tlakem (12 bar). Z důvodu toho, že přesné měření průtoku není levná záležitost, je navrženo použití pouze jednoho průtokoměru na oba rozvody obou tlaků. Průtokoměr bude možné přemístovat z jednoho tlaku na druhý.

Přesnější zobrazení návrhu umístění měřících prvků budoucího rozvodu stlačeného vzduchu je zobrazeno na obrázku č. 18. Původní schéma je pomocí červeně barevných značek a čar rozšířeno o prodloužení vysokotlakého rozvodu stlačeného vzduchu a o měřící prvky. Potrubí bude rozměrově odpovídat stávajícímu rozvodu, tedy velikosti 2“. Dále jsou k danému rozvodu navrženy uzavírací a regulační prvky (viz kapitola 4.3).



Obrázek 18: Schéma návrhu úpravy rozvodů stlačeného vzduchu
Zdroj: 33

4.6 Návrh potrubí

Z materiálů používaných pro rozvody stlačeného vzduchu se pro experimentální zařízení hodí nejlépe ocelové nerezové potrubí. Ocelové potrubí je možné použít i pro vyšší tlaky. Pracovní tlak experimentálního zařízení (20 bar) leží v únosných mezích ocelového potrubí.

Rozměry potrubí experimentálního zařízení souhlasí s rozměry potrubí rozvodu stlačeného vzduchu v laboratoři Katedry energetických zařízení. Jako jmenovitý rozměr potrubí se volí velikost o světlosti DN50.

Tabulka 9: Návrhové parametry potrubí

Typ	bezešvé
Materiál	nerez
Vnější rozměr	50 mm
Tloušťka stěny	2,5 mm
Tlaková třída	PN25

Zdroj: autor

4.7 Popis měření

V tabulce č. 10 je uvedeno označení a typ jednotlivých vybraných měřících zařízení.

Tabulka 10: Seznam jednotlivých měření

KÓD	MĚŘENÁ VELIČINA	TYP SNÍMAČE	NÁZEV SNÍMAČE	ROZSAH MĚŘENÍ	PŘESNOST	VÝSTUPNÍ SIGNÁL
OPU01CP001	TLAK	snímač absolutního tlaku	SITRANS P420	od 0,63 bar do 63 bar	0,04 %	analogový
			(SITRANS P500)	od 0,16 bar do 32 bar	0,03 %	analogový
OPU01CT001	TEPLOTA	odporový	ModuTEMP® 70	10 °C až 120 °C	-	analogový
OPU01CF001	PRŮTOK	hmotnostní průtokoměr	SITRANS FC430	až 52 000 kg/h	0,25 %	analogový
ORU01CP001	TLAK	snímač absolutního tlaku	SITRANS P420	od 0,63 bar do 63 bar	0,04 %	analogový
			(SITRANS P500)	od 0,16 bar do 32 bar	0,03 %	analogový
ORU01CT001	TEPLOTA	odporový	ModuTEMP® 70	10 °C až 120 °C	-	analogový
ORU01CT002	TEPLOTA	odporový	ModuTEMP® 70	10 °C až 120 °C	-	analogový
ORU01CP002	TLAK	snímač absolutního tlaku	SITRANS P420	od 0,63 bar do 63 bar	0,04 %	analogový
			(SITRANS P500)	od 0,16 bar do 32 bar	0,03 %	analogový
ORU01CP003	TLAKOVÁ DIFERENCE	snímač tlakové difference	SITRANS P420	od 0,63 bar do 63 bar	0,04 %	analogový
			(SITRANS P500)	od 0,16 bar do 32 bar	0,03 %	analogový

Zdroj: [17], [18], [19], [20]

4.7.1 SITRANS P420 (SITRANS P500)

Tlakový snímač SITRANS P420 je digitální tlakový snímač, vhodný k měření agresivních i neagresivních plynů a kapalin. Umožňuje měřit absolutní, relativní nebo diferenční tlak. [17]

V následující tabulce č. 11 jsou uvedeny technické informace a rozsahy měření.

Tabulka 11: Technické specifikace SITRANS P420

Veličina	Odpovídající hodnota
Měřicí rozsah	od 0,63 bar do 63 bar
Přesnost	až 0,04 %
Teplotní rozsah	-40 °C až 100 °C
Výstupní signál	analogový (4-20 mA)
Komunikační protokol	HART
Procesní připojení	G1/2

Zdroj: [17]



Obrázek 19: SITRANS P420

Zdroj: [17]

Jako alternativu je možné zvolit tlakový snímač SITRANS P500, který svými vlastnostmi předbíhá snímač SITRANS P420, ale tyto přednosti se promítnou v jeho ceně. SITRANS P500 hlavně vyniká svojí přesností. Vlastnosti tlakového snímače SITRANS P500 jsou shrnuty v tabulce č. 12 [18]

Tabulka 12: Technické specifikace SITRANS P500

Veličina	Odpovídající hodnota
Měřicí rozsah	od 0,16 bar do 32 bar
Přesnost	$\leq 0,03 \%$
Teplotní rozsah	-40 °C až 125 °C
Výstupní signál	analogový (4-20 mA)
Komunikační protokol	HART
Procesní připojení	G1/2

Zdroj: [18]



Obrázek 20: SITRANS P500

Zdroj: [18]

4.7.2 ModuTEMP® 70

Jedná se o průmyslové odporové snímače teploty. Jsou dostání jak s převodníkem, tak i bez převodníku. Bývají určeny pro přesné dálkové měření. Je možné použít extrémně odolné provedení, odolné proti vibracím a rázům. Snímače je možné uložit do jímky i použít bez jímky. Pro navržené zařízení by se použily snímače s převodníkem uložený v jímce. V tabulce č. 13 je shrnuta technická specifikace odporových snímačů teploty ModuTEMP® 70. [19]

Tabulka 13: Technické specifikace ModuTEMP® 70

Veličina	Odpovídající hodnota
Typy snímačů	Pt 100
Rozsah měření	-200 °C až +700 °C
Volený rozsah převodníku	10 °C až 120 °C
Třída přesnosti	B dle ČSN EN 60751
Výstupní signál	analogový (4-20 mA)
Komunikační protokol	HART

Zdroj: [19]



Obrázek 21: ModuTEMP® 70
Zdroj:[19]

4.7.3 SITRANS FC430

Pro měření tlaku se jako nejlepší varianta jeví hmotnostní průtokoměr SITRANS FC430. Jedná se o Coriolisův průtokoměr. Vyznačuje se výbornou kompaktností, velmi vysokou přesností, nízkou tlakovou ztrátou a vysokou rychlostí přenosu výstupního signálu. Tento průtokoměr se skládá ze senzoru SITRANS FCS400 a převodníku SITRANS FCT030. Jedná se tedy průtokoměr s digitálním výstupem. Vlastnosti SITRANS FC430 jsou uvedeny v tabulce č. 14 [20]



Obrázek 22: SITRANS FC430
Zdroj: [20]

Tabulka 14: Technické specifikace SITRANS FC430

Veličina	Odpovídající hodnota
Velikost	DN 50
Měřicí rozsah	až 52 000 kg/h
Přesnost	$\pm 0,25 \%$
Teplotní rozsah	-50 °C až 200 °C
Výstupní signál	analogový (4-20 mA)
Komunikační protokol	HART
Napájení	24 V až 90 V DC, 100 V až 240 V AC
Procesní připojení	příruba

Zdroj: [20]

4.8 Popis zvolených armatur

V následující tabulce č. 15 jsou uvedeny vybrané komponenty experimentálního zařízení.

Tabulka 15: Seznam jednotlivých armatur experimentálního zařízení

KÓD	TYP	ROZMĚR	JMENOVIÝ TLAK	NAPOJENÍ	POHON
OPU01AA001	kulový ventil	DN 50	PN 63	návarek	ruční
OPU01AA002	kulový ventil	DN 50	PN 63	návarek	elektrický
OPU01AA003	kulový ventil	DN 50	PN 25	závit	ruční
OPU01AA004	regulační ventil	DN 50	PN 25	návarek	elektrický
OPU01AA005	kulový ventil	DN 50	PN 25	závit	ruční
ORU01AA001	kulový ventil	DN 50	PN 25	závit	ruční
ORU01AA002	kulový ventil	DN 50	PN 25	závit	ruční
ORU01AA003	kulový ventil	DN 50	PN 63	návarek	ruční
ORU01AA004	kulový ventil	DN 50	PN 63	návarek	ruční
ORU01AA005	kulový ventil	DN 50	PN 25	závit	ruční
ORU01AA006	kulový ventil	DN 50	PN 25	závit	ruční
ORU01AA007	regulační ventil	DN 50	PN 25	návarek	elektrický
ORU01AA008	kulový ventil	DN 50	PN 63	návarek	ruční
ORU01AA009	tlumič	DN 50	PN 25	závit	–
ORU02AA001	regulační ventil	DN 50	PN 25	návarek	elektrický
ORU02AA002	kulový ventil	DN 50	PN 25	závit	ruční
ORU02AA003	Kulový ventil	DN 50	PN 25	závit	ruční
ORU02AA004	kulový ventil	DN 50	PN 63	návarek	ruční
ORU02AA005	tlumič	DN 50	PN 25	závit	–
ORU03AA001	kulový ventil	DN 50	PN 63	návarek	elektrický
ORU03AA002	tlumič	DN 50	PN 25	závit	–

Zdroj: [21], [22], [24]

4.8.1 Kulové ventily

Kulový ventil slouží k uzavření potrubí. Existuje velká řada kulových ventilů pro různá média. V návrhu jsou použity dva druhy kulových ventilů. Ventily, které ve schématu chrání tlakové snímače, jsou napojeny na potrubí pomocí závitů. Lepší by bylo použít kulové ventily, které jsou určeny k přivaření k potrubí, ale pro tlak, na který je zařízení navrhováno a rozměry potrubí (DN 50), vycházely tyto ventily s porovnáním závitovým ventilům dost drahé. Pár svařovatelných ventilů je však v návrhu použito, z důvodu záruky těsnosti.

Pro automatizaci provozu zařízení jsou některé kulové ventily poháněny elektrickým pohonem. Zvolené typy ventilů jsou uvedeny v tabulce č. 16. Vybraný pohon kulových ventilů je s jeho vlastnostmi uveden v tabulce č. 17.

Tabulka 16: Technické specifikace kulových ventilů

Kulové ventily	VL521B-050	obyčejný
Značka	OMAL Automation	neznámá
Rozměr	DN 50	DN 50
Jmenovitý tlak	PN 63	PN 25
Provedení	přímý ventil	přímý ventil
Materiál	nerezová ocel	mosaz
Rozsah teplot	do 190 °C	-20 °C do 120 °C
Připojení	návarek	závit
Ovládání	elektrický pohon LUFBERG	ruční

Zdroj: [21], [22]

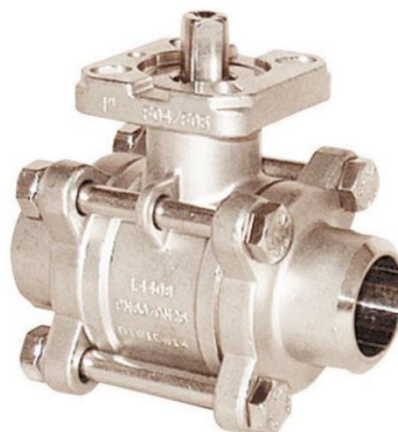
Tabulka 17: Technické specifikace elektrického pohonu kulového ventilu

Veličina	Odpovídající hodnota
Napájení	24 V AC/DC
Doba přestavení	35 až 40 s
Kroutící moment	4 Nm
Havarijní funkce	Ne
Výrobce	Luftberg
Označení	DA04N24PIS
Ovládání	0 až 10 V nebo 4 až 20 mA
Pomocný kontakt	Ano 2x
Velikost klapky	0,8 m ²

Zdroj: [23]



Obrázek 23: Kulový ventil s ručním pohonem
Zdroj: [21]



Obrázek 24: Kulový ventil značky OMAL Automation
Zdroj: [22]



Obrázek 25: Elektrický pohon kulového ventilu
Zdroj: [23]

4.8.2 Regulační ventil

Regulační ventil slouží k řízení velikosti průtoku protékajícího potrubím. V návrhu experimentálního standu byl zvolen regulační ventil firmy LDM. Jedná se o dvoucestný, tlakově vyvážený přímý ventil. Technické parametry zvoleného ventilu jsou uvedeny v tabulce č. 18. [24]

Tabulka 18: Technické specifikace regulačního ventilu BEE line RV 122

Veličina	Odpovídající hodnota
Rozměr	DN 50
Jmenovitý tlak	PN 25
Napájení	24 V AC/DC
Doba přestavení	10 s
Hodnoty Kvs	(0,16 až 40) m ³ /hod
Připojení	příruba
Výrobce	LDM
Označení	ANT3-11.11SC
Ovládání	0 až 10 V nebo 4 až 20 mA
Zpětná vazba	0 až 10 V nebo 4 až 20 mA
Rozsah teplot	do 150 °C

Zdroj: [24]



Obrázek 26: Regulační ventil BEE line RV 122
Zdroj: [24]

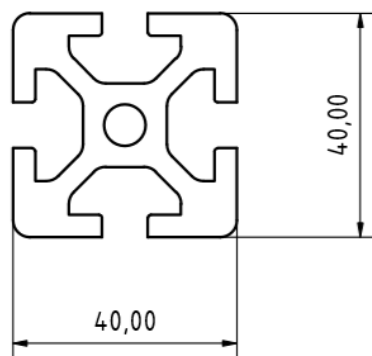
4.8.3 Tlumič

Výběr tlumiče není cílem této práce, volba tlumiče je spjata s testovacím lopatkovým strojem a s požadavky konkrétní aplikace.

4.9 Návrh stolu pro experimentální stand

Pro návrh pracovního stolu experimentálního standu se jako nejlepší volba jeví použití hliníkových konstrukčních systémů od firmy ALUTEC K&K. Portfolio této firmy zahrnuje velkou škálu různých profilů a příslušenství. Systém firmy ALUTEC K&K je navržen pro snadnou montáž a všestranné použití. [25]

Navržený stůl je sestaven z profilu s názvem 104040, který patří mezi základní profily nabízené ve firemním katalogu produktů. Rozměry profilu jsou uvedeny v milimetrech na obrázku č.27. Profily jsou vyrobeny ze slitiny hliníku AlMgSi 0.5F25.



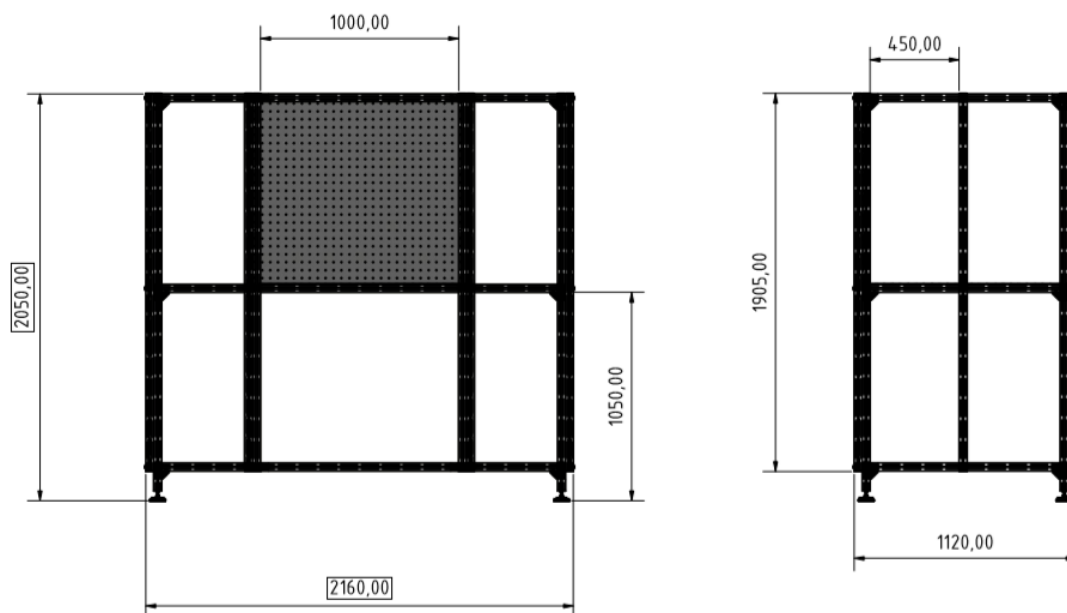
Obrázek 27: Nárys použitého profilu
Zdroj: Vlastní zpracování podle [25]

Na obrázku č. 28 je uveden prvotní návrh stolu pro experimentální zařízení. Navržený stůl by měl sloužit k upevnění testovacího stroje i k upevnění měřících senzorů s příslušnými převodníky. Součástí stolu by měl být rozvod stlačeného vzduchu spolu s regulačními prvky.



Obrázek 28: Navržený stůl pro experimentální stand
Zdroj: Autor

Jelikož laboratoř Katedry energetických zařízení má své limity ohledně kapacity testovacích zařízení, je důležité pro umístění experimentálního standu znát jeho rozměry. Základní rozměry pracovního stolu jsou uvedeny v milimetrech a znázorněny na obrázku č. 29.



Obrázek 29: Rozměry pracovního stolu
Zdroj: Autor

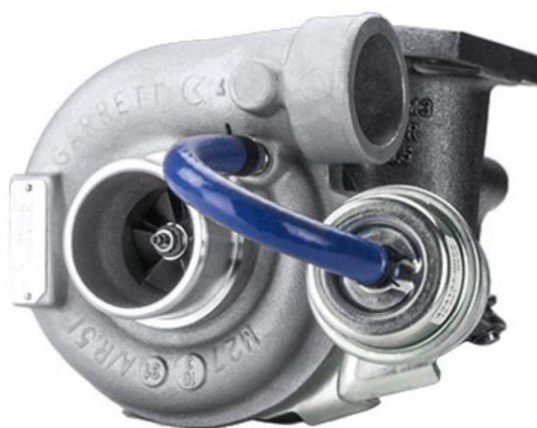
Pokud by došlo ke stavbě experimentálního standu, stůl by byl jistě přizpůsoben daným potřebám vystávajících při montáži měřících senzorů, či rozvodu stlačeného vzduchu.

4.10 Adaptace repasovaného turbodmychadla

Každé navržené zařízení, které má být uvedeno do provozu je nutné nejdříve otestovat. K otestování navrženého experimentálního zařízení pro testování lopátkových strojů typů kompresor nebo expanzní turbína se jako nejvhodnější a nejdostupnější jeví použití repasovaného turbodmychadla.

Turbodmychadlo se používá k přepřívání spalovacích motorů pro zvýšení jejich výkonu. Jedná se o soustrojí na společném hřídeli tvořené jednostupňovým radiálním turbokompresorem a jednostupňovou radiální plynovou turbínou. K přepřívání spalovacího motoru slouží turbokompresor, který poháněn plynovou turbínou, jenž je roztáčena výfukovými plyny. [30]

Pro otestování funkčnosti experimentálního zařízení je možné použít turbodmychadla firmy Garrett. Pro otestování je vhodné vybrat z takových turbodmychadel značky Garrett, jež jsou snadno dostupné. K dostupným se řadí například turbodmychadla značky Garrett GT2052, Garrett GT2252 nebo Garrett GT2871. Tato turbodmychadla jsou k sehnání pomocí internetových bazarů v rámci první desítky tisíc korun, lze sehnat nové i použité.



Obrázek 30: Turbodmychadlo Garrett GT2052
Zdroj: [26]

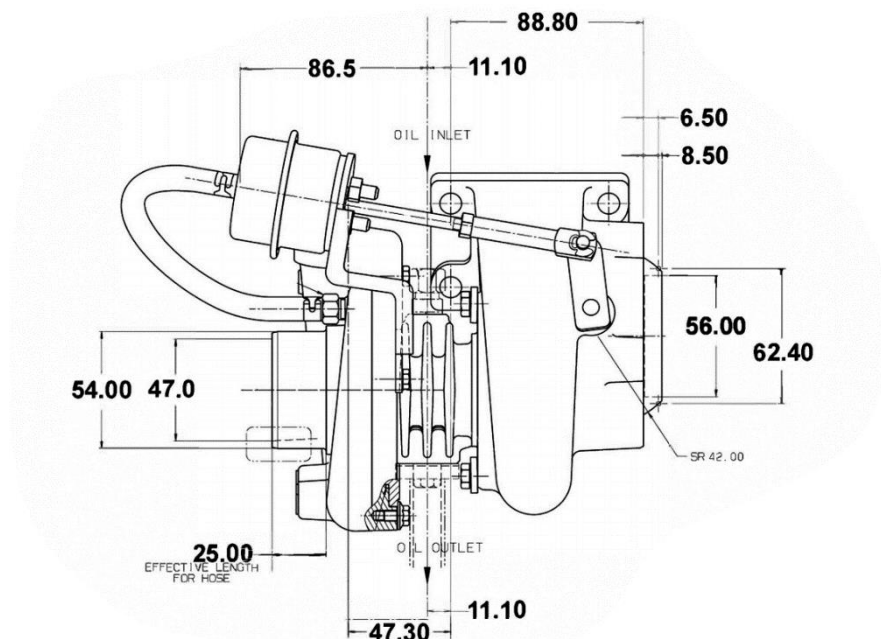


Obrázek 31: Turbodmychadlo Garrett GT2252
Zdroj: [32]

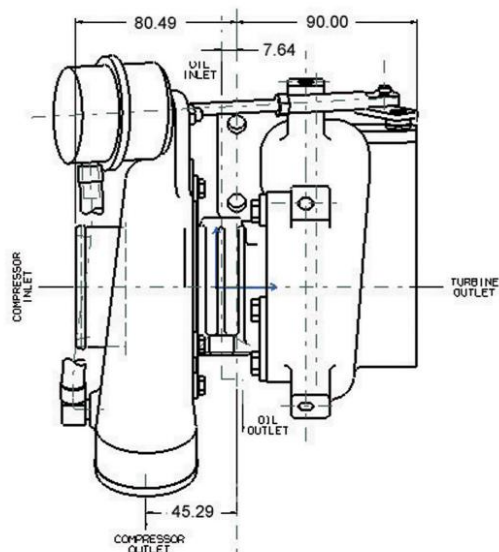


Obrázek 32: Turbodmychadlo Garrett GT2871
Zdroj: [31]

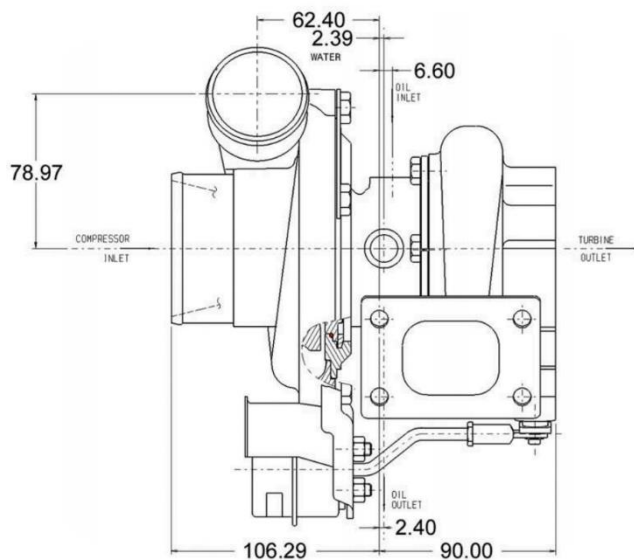
Aby bylo možné, zvolit správné uložení turbodmychadla do experimentálního standu za účelem testování je důležité znát alespoň přibližné rozměry testovaného lopatkového stroje. K představě o rozměrech vybraných turbodmychadel Garrett slouží obrázky č. 33, 34 a 35. Veškeré rozměry uvedené na tomto obrázku jsou v milimetrech.



Obrázek 33: Rozměry turbodmychadla Garrett GT2052
Zdroj: [26]



Obrázek 34: Rozměry turbodmychadla Garrett GT2252
Zdroj: [32]



Obrázek 35: Rozměry turbodmychadla Garrett GT2871
Zdroj: [31]

Cílem použití repasovaného turbodmychadla je možnost vyzkoušení funkčnosti experimentálního standu využitím expanzní plynové turbíny turbodmychadla nebo jeho kompresní části s turbokompresorem.

5 Závěr

Návrh experimentálního standu pro testování lopatkových strojů typu turbokompresor nebo expanzní plynová turbína reflektuje možnosti Katedry energetických zařízení TUL. Jelikož v budoucí laboratoři KEZ TUL je plánován rozvod stlačeného vzduchu, bylo k testování zvoleno použít jako pracovní látku stlačený vzduch.

První část práce se zabývá vlastnostmi, součástmi i měřením stlačeného vzduchu. Byly rozebrány základní armatury a potrubí rozvodu stlačeného vzduchu, popsány základní druhy zařízení sloužící k výrobě stlačeného vzduchu. Byly charakterizovány typy senzorů tlaku, průtoku a teploty, které patří k nejčastěji používaným senzorům v oblasti měření stlačeného vzduchu. Nabyté znalosti byly přínosné při navrhování experimentálního zařízení.

Experimentální zařízení je navrhováno pro rozvod stlačeného vzduchu o tlaku 20 bar a velikosti potrubí DN50. Navržené zařízení disponuje možností testovat lopatkové stroje typu turbokompresor a expanzní plynová turbína. Při testování expanzních plynových turbín je počítáno s objemovým průtokem stlačeného vzduchu o hodnotě 10 [l/s], který je možné plynule regulovat. Jak při testování expanzních plynových turbín nebo turbokompresorů umožňuje regulace průtoku na výstupu simulaci expanze do protitlaku. Zařízení je koncipováno pro rozsah teplot od 0 °C do 100 °C. Jedním z cílů experimentální zařízení je určit energetickou bilanci lopatkového stroje. S tím souvisí navržené řetězce měření tlaku, teploty, průtoku, otáček a kroutících momentů. Navržený postup měření je spolu s regulačními a ovládacími prvky zakreslen v PID schématu. Veškeré výstupy převodníků senzorů měření mají analogový výstup 4 až 20 mA a jsou schopné komunikovat pomocí protokolu HART.

K ověření funkčnosti všech měřících řetězců experimentálního standu je zvoleno použití repasovaného turbodmychadla značky Garrett. Byly navrženy tři typy turbodmychadel, které by bylo možné pro otestování použít. K potencionálnímu využití experimentálního standu nepatří jen možnost testování lopatkových strojů typu turbokompresor a expanzní plynová turbína za účelem validace vlastností zkoušeného stroje, ale také možnost ukázat fungování lopatkových strojů, měřidla a regulační prvky stlačeného vzduchu v rámci výuky.

Pro inovaci experimentálního zařízení navrhuji vyřešit konstrukci ohřívače a chladiče stlačeného vzduchu. Návrh ohřívače a chladiče by zvýšil variabilitu testování lopatkových strojů, díky kterým by bylo možné lépe uspokojit kladené požadavky zadavatele měření na ověřování všech vlastností lopatkového stroje.

6 Seznam použité literatury

[1] LIŠKA, Antonín a Pavel NOVÁK. *Technika stlačeného vzduchu*. Praha: České vysoké učení technické, 1999. ISBN 80-01-01947-0.

[2] MAYER, Jiří *Teoretické základy energetických zařízení 2. díl*. Druhé upravené. Liberec: Ediční středisko; VŠŠT Liberec, 1984. Číslo publikace 55-818-83.

[3] BENEŠ, Pavel a Antonín MYKISKA. *Úvod do pneumatiky: Učebnice FESTO Didactic Postgraduální studium*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1989. ISBN 80-01-00042-7.

[4] LIŠKA, Antonín a Jiří PTÁČEK. *Stlačený vzduch: příručka*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965.

[5] KADLEC, Karel, Miloš KMÍNEK a Pavel KADLEC. *Měření a řízení chemických, potravinářských a biotechnologických procesů*. Ostrava: Key Publishing, 2017. Monografie (Key Publishing). ISBN 978-80-7418-284-6.

[6] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.

[7] NOVÁK, Martin. *Technická měření*. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06388-0.

[8] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. *Měření průtoku a výšky hladiny*. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-x.

[9] Kompresor. *Encyklopédia poznania* [online]. Malacky: Wesline, c2013-2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <https://encyklopediapoznania.sk/clanok/7047/kompresor>

[10] Měření průtoku a proteklého množství. *Technická měření* [online]. Praha: VŠCHT. [cit. 2020-06-21]. Dostupný z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4-ram.htm>

[11] METROLOGIE A ZKUŠEBNICTVÍ. *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_02.pdf

[12] Měření tlaku. *Encyklopedie fyziky* [online]. Jaroslav Reichl and Martin Všeticka, c2006-2020 [cit. 2020-06-21]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main/article/view/112-mereni-tlaku>

[13] MAN Max1 Finds New Application. *Compressortech2* [online]. Wadhurst: KHL, 2017 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://1url.cz/ZzV4T>

[14] Regulátor tlaku vzduchu 3/8", 0-1 MPa. *Top nářadí* [online]. Jeseník: Jeseník, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://1url.cz/CzV4j>

[15] Přímý škrťací ventil průtoku vzduchu 8. *Kompresory a vzduchotechnika* [online]. Žebrák: Kompresory-vzduchotechnika, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://1url.cz/DzV4f>

[16] KADLEC, K. Coriolisovy průtokoměry. *AUTOMA: odborný časopis pro automatizační techniku*, listopad 2010, roč. 16, č. 11, s. 40-45. Dostupné také z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42308.pdf> ISSN 1210–9592.

[17] SITRANS P320/420. *Siemens* [online]. Siemens, 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://1url.cz/ZzanO>

[18] SITRANS P500. *Siemens* [online]. Siemens, 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://1url.cz/czaAG>

[19] ModuTEMP® 70 Modulární odporové a termoelektrické snímače teploty. *JSP Industrial Controls* [online]. Jičín: JSP Industrial Controls, 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://1url.cz/pzanc>

[20] SITRANS FC430 for OEM customers. *Siemens* [online]. Siemens, 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://1url.cz/Tzann>

[21] Kulový kohout 25 bar vnitřní a vnější závit - 2." *Kompresory a vzduchotechnika* [online]. Žebrák: Kompresory Vzduchotechnika, 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://1url.cz/7z3jf>

[22] Kulový kohout VL521B – DN50. *Kompresory a vzduchotechnika* [online]. Žebrák: Kompresory Vzduchotechnika, 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://1url.cz/Tz3jl>

[23] LUFBERG DA04N24PIS servopohon. *ELventil.cz* [online]. Liberec: 2020 Evolution, 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://www.elventil.cz/lufberg-da04n24pis-servopohon>

[24] RV 122 R. *LDM Valves* [online]. Česká Třebová: LDM, spol. s r.o., 2019 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <https://1url.cz/bz3j0>

[25] Katalog Alutec K&K. *Alutec KK* [online]. Čelákovice: ALUTEC KK, 2020 [cit. 2020-07-05]. Dostupné z: <http://katalogaluteckk.aspone.cz/>

[26] GT2052 Turbocharger. *Garrett advancing motion* [online]. GARRETT MOTION, 2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://1url.cz/4zV4d>

[27] Potrubní rozvody AIRNET. *Kompresory a vzduchotechnika* [online]. Žebrák: Kompresory Vzduchotechnika, 2020 [cit. 2020-07-09]. Dostupné z: <https://1url.cz/KzV4D>

[28] Rozvody stlačeného vzduchu. *Kompresory a vzduchotechnika* [online]. Žebrák: Kompresory Vzduchotechnika, 2020 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://1url.cz/dzV4h>

[29] DROZD, Arnošt a A KOLEKTIV. *Stlačený vzduch v průmyslu*. Druhé, přepracované. Praha: Statní nakladatelství technické literatury, 1962.

[30] OPLUŠTIL, Vít. *Zvýšení výkonových parametrů motoru Honda 1.6* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-07-12]. Dostupné z: <https://1url.cz/LzVwM>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. David Svída, Ph.D.

[31] GT2871R Turbocharger. *Garrett advancing motion* [online]. GARRETT MOTION, 2020 [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://1url.cz/ozV4C>

[32] GT2252 Turbocharger. *Garrett advancing motion* [online]. GARRETT MOTION [cit. 2020-07-13]. Dostupné z: <https://1url.cz/xzV4Z>

[33] Technologie stlačeného vzduchu laboratoře KEZ. Číslo zakázky: 20030. Profes Project spol. s r.o., Technoair. 2020. [cit. 2020-07-13]. Dostupnost: Katedra energetických zařízení TUL.

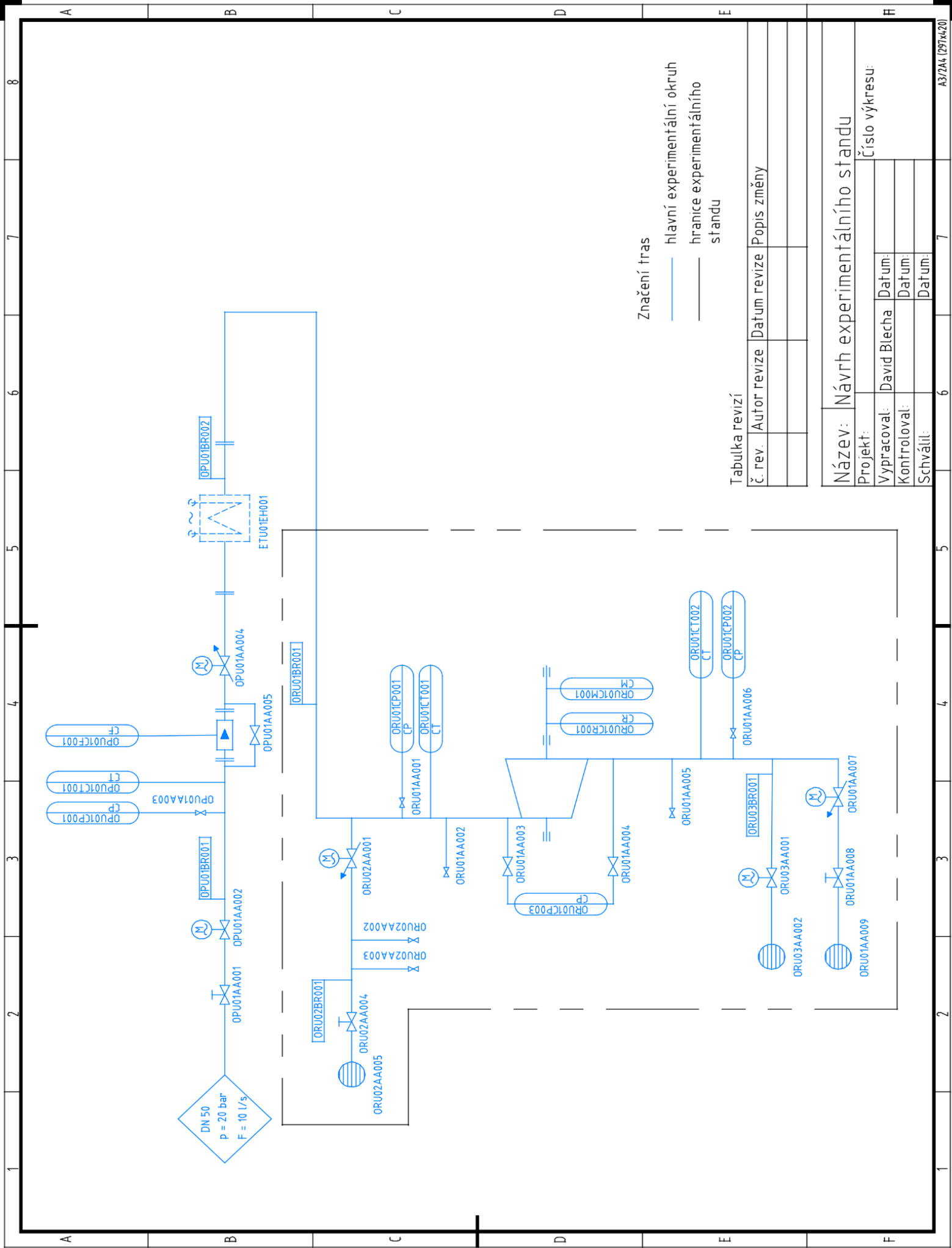
Seznam příloh

Příloha 1: Výkres návrhu experimentálního zařízení a návrhu úpravy rozvodů stlačeného vzduchu v laboratoři KEZ TUL

Příloha 2: Tabulka s klíčem k PID

Příloha 3: Výkres pracovního stolu

Příloha 1: Výkres návrhu experimentálního zařízení a návrhu úpravy rozvodů stlačeného vzduchu v laboratoři KEZ TUL



Značení tras
 — hlavní experimentální okruh
 - - - hranice experimentálního standu

Tabulka revizí

č. rev.	Autor revize	Datum revize	Popis změny

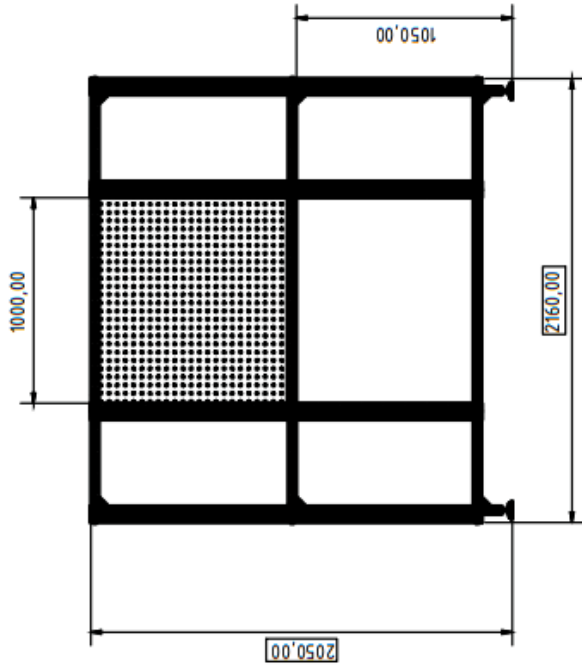
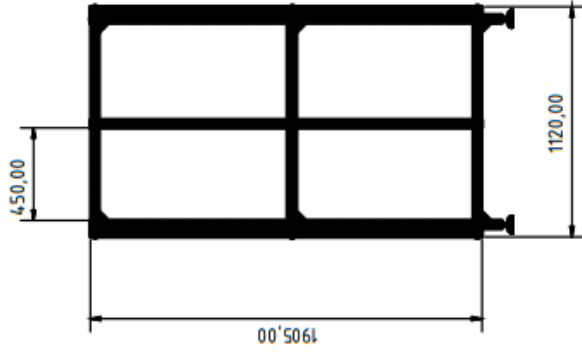
Název: Návrh experimentálního standu

Projekt:	Číslo výkresu:		
Vypracoval:	David Blecha	Datum:	
Kontroloval:		Datum:	
Schválil:		Datum:	

Příloha 2: Tabulka s klíčem k PID

Klíč k PID	
X ₁ X ₂ X ₃ __ YY __ __	
X ₁	
O	experimentální zařízení průtočné
E	elektrické zařízení
X ₂	
P	tlakové zařízení
R	točivý stroj
T	tepelné zařízení
X ₃	
U	vzduch
YY	
AA	armatura
BR	potrubí
EH	elektroohřívák
CP	měření tlaku
CT	měření teploty
CR	měření otáček
CF	měření průtoku
CM	měření momentu

Příloha 3: Výkres pracovního stolu



Jméno		David Blecha		Datum		04.07.2020		Materiál		Kontrola		Svaza		Stav		Zařky		Datum		Jedno	
Základní rozměry																					
Návrh stolu experimentálního standu																					
1																					
A.L.																					