



**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**

**Ústav procesní a zpracovatelské
techniky**

**EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ
CHARAKTERISTIKY ODSTŘEDIVÉHO ČERPADLA**

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF
CENTRIFUGAL PUMP CHARACTERISTICS**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2019**

**VOJTĚCH
KLIMOVÍČ**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Klimovič** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **457540**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav procesní a zpracovatelské techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Energetika a procesní technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Experimentální stanovení charakteristiky odstředivého čerpadla

Název bakalářské práce anglicky:

Experimental determination of centrifugal pump characteristics

Pokyny pro vypracování:

Na základě vlastních experimentů stanovte charakteristiku konkrétního typu odstředivého čerpadla a porovnejte dosažené výsledky s katalogovými hodnotami.

1. Seznamte se s konkrétními typy hydrodynamických čerpadel a proveďte teoretický rozbor jejich procesních parametrů. Zaměřte se zejména na charakteristiky čerpadel potřebných pro jejich návrh a provoz v potrubní větvi.
2. Navrhněte a postavte experimentální hydraulickou trať na měření výkonnostní charakteristiky odstředivého čerpadla.
3. Experimentálně stanovte výkonnostní charakteristiku konkrétního vybraného čerpadla. Proveďte vyhodnocení naměřených dat a výkonnostní charakteristiky čerpadla. Porovnejte získané výsledky s katalogovými hodnotami dostupnými od výrobce testovaného typu odstředivého čerpadla.

Seznam doporučené literatury:

dle vlastní literární a průmyslové rešerše a doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

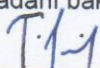
prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D., ústav procesní a zpracovatelské techniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **23.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.06.2019**

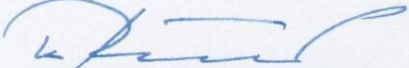
Platnost zadání bakalářské práce: _____



prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



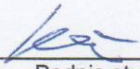
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30-04-2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Anotační list

Jméno autora:	Vojtěch
Příjmení autora:	KLIMOVIČ
Název práce česky:	Experimentální stanovení charakteristiky odstředivého čerpadla
Název práce anglicky:	Experimental determination of centrifugal pump characteristics
Rozsah práce:	počet stran: 52
	počet obrázků: 26
	počet tabulek: 9
	počet rovnic: 28
	počet příloh: 1 x CD
Akademický rok:	2018/2019
Jazyk práce:	český
Ústav:	Ú 12 118 - Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Studijní program:	B2341 Strojírenství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.
Oponent:	
Konzultant práce:	
Klíčová slova:	čerpadlo, odstředivé čerpadlo, charakteristika čerpadla, výkonnostní charakteristika, hydraulická trať, experimentální měření
Keywords:	pump, centrifugal pump, pump characteristic, performance characteristic, hydraulic circuit, experimental measurement

Anotace:

Na základě literární rešerše je definováno jednotlivých typů čerpadel a jejich charakteristik potřebných pro připojení čerpadla do potrubní sítě. Práce se věnuje návrhu hydraulické měřící tratě pro stanovení výkonnostní charakteristiky odstředivého čerpadla. Je proveden výběr vhodných měřících komponent a regulačního ventilu a jejich následné aplikování na hydraulické trati. Dále se práce zabývá stavbou a zprovozněním hydraulické tratě. Hlavním cílem práce je experimentální stanovení výkonnostní charakteristiky odstředivého čerpadla a její porovnání s katalogovými hodnotami výrobce. Bylo zjištěno, že katalogové hodnoty odpovídají s naměřeným charakteristikám.

Abstract:

Based on the literature research, the individual types of pumps and their characteristics are defined in order to connect the pump to the pipeline network. The thesis deals with design of hydraulic measuring line for determination of performance characteristics of centrifugal pump. A selection of suitable measuring components and a control valve is made. Then these are applied to the hydraulic track. Furthermore, the work deals with the construction of hydraulic lines and making it work. The main aim of the thesis is to determine the performance characteristics of the centrifugal pump and then compare it with the manufacturer's catalog values. It was found that the catalog values correspond to the measured characteristics.

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Experimentální stanovení charakteristiky odstředivého čerpadla“ vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Tomáše Jirouta, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Vojtěch Klimovič

Poděkování

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Tomášovi Jiroutovi, PhD. za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

Obsah

1	Úvod	- 9 -
2	Teoretická část	- 10 -
2.1	Princip odstředivých čerpadel.....	- 10 -
2.2	Rozdělení hydrodynamických čerpadel.....	- 11 -
2.2.1	Jednostupňové radiální čerpadlo.....	- 12 -
2.2.2	Vícestupňové radiální čerpadlo	- 13 -
2.2.3	Problematika řazení čerpadel	- 13 -
2.2.4	Normovaná čerpadla	- 14 -
2.2.5	Hermeticky utěsněné čerpadlo.....	- 15 -
2.2.6	Ponorné čerpadlo	- 15 -
2.2.7	Čerpadlo pro odpadní vody	- 15 -
2.3	Základní parametry	- 15 -
2.3.1	Průtok.....	- 16 -
2.3.1.1	Objemový průtok	- 16 -
2.3.1.2	Hmotnostní průtok	- 16 -
2.3.2	Měrná energie	- 17 -
2.3.3	Dopravní výška.....	- 17 -
2.3.4	Tlak.....	- 17 -
2.3.5	Příkon	- 17 -
2.3.6	Účinnost.....	- 17 -
2.3.7	Kavitační deprese.....	- 18 -
2.3.8	Sací výška čerpadla NPSH	- 19 -
2.4	Výkonové charakteristiky čerpadel	- 19 -
2.4.1	Charakteristika dopravní výšky	- 19 -
2.4.2	Charakteristika účinnosti čerpadla	- 20 -
2.4.3	Charakteristika příkonu čerpadla.....	- 20 -
2.4.4	Charakteristika NPSH	- 21 -
2.5	Charakteristika potrubního systému.....	- 21 -
2.6	Provozní bod čerpadla.....	- 22 -
	Experimentální stanovení charakteristiky odstředivého čerpadla	- 6 -

3	Experimentální část	- 23 -
3.1	Hydraulický okruh	- 23 -
3.2	Jednotlivá zařízení hydraulického okruhu	- 27 -
3.3	Testovaná čerpací jednotka	- 27 -
3.3.1	Čerpadlo.....	- 27 -
3.3.2	Základní parametry čerpadla	- 28 -
3.3.3	Motor	- 29 -
3.3.4	Snímač tlaku (tlakoměr).....	- 29 -
3.3.5	Průtokoměr	- 30 -
3.3.6	Teploměr	- 31 -
3.3.7	Manuální škrtkící ventil.....	- 33 -
4	Měření charakteristiky čerpadla	- 34 -
4.1	Popis experimentu	- 34 -
4.2	Příprava měřícího zařízení	- 34 -
4.3	Postup měření.....	- 34 -
5	Zpracování naměřených dat.....	- 36 -
5.1	Výpočet	- 38 -
6	Data z katalogu výrobce.....	- 41 -
7	Porovnání naměřených dat s katalogovými hodnotami výrobce.	- 45 -
8	Závěr	- 47 -
9	Seznam použité literatury	- 48 -
10	Seznam obrázků	- 50 -
11	Seznam tabulek	- 51 -
12	Seznam příloh.....	- 52 -

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

Veličina	Jednotka	Popis
\dot{Q}_v	m^3/s	Objemový průtok
\dot{Q}_m	kg/s	Hmotnostní průtok
Y	J/kg	Měrná energie
p	Pa, bar	Tlak
p''	Pa, bar	Tlak nasycených par
ρ	kg/m^3	Hustota
g	m^2/s	Tíhové zrychlení
T	K	Teplota
H_{ξ}	m	Dopravní výška
e_z	J/kg	Ztrátová energie
P_2	kW	Příkon
P_H	kW	Hydraulický výkon
f	Hz	Frekvence
n	min^{-1}	Otáčky
l	m	Délka
S	m^2	Plocha
d	m	Průměr
u	m/s	Rychlost
Δy_{kr}	J/kg	Kavitační deprese
NPSH	m	Sací výška čerpadla
η_c	-	Celková účinnost
η_P	-	Účinnost čerpadla
η_M	-	Účinnost motoru
η_{FC}	-	Účinnost frekvenčního měniče
Re	-	Reynoldsovo číslo
ν	m^2/s	Kinematická viskozita
λ	-	Součinitel třecích ztrát
ξ	-	Součinitel místních ztrát

1 Úvod

Odstředivá čerpadla jsou používána v každém odvětví průmyslu a jejich využití stále roste. V dnešní době si průmysl bez čerpadel nelze představit. Vzhledem ke stálému zdokonalování vlastností materiálů představuje problematika čerpací techniky rozsáhlé téma, i přestože základní princip čerpání kapalin se nemění. Na trhu je veliké množství různých druhů čerpadel s odlišnými provozními parametry. Volba správného čerpadla pro konkrétní aplikaci závisí na mnoha různých faktorech a není vůbec jednoduché vybrat nejvhodnější čerpadlo z katalogů výrobců. Pro komplexnější pochopení problematiky odstředivých čerpadel a ověření katalogových parametrů vznikla tato bakalářská práce.

Hlavním cílem této práce je experimentální stanovení výkonnostní charakteristiky konkrétního odstředivého čerpadla. Za tímto účelem je navržena a postavena měřicí hydraulická trať na základě znalostí a instalačních doporučení výrobců jednotlivých komponent. Uvedení hydraulické tratě do provozu, na které je zvolené čerpadlo testováno. Z provedeného testování je předkládán záznam naměřených dat na postaveném hydraulickém okruhu a následné vyhodnocení výkonnostní charakteristiky čerpadla. Získané parametry jsou pak porovnávány s katalogovými hodnotami poskytnuté výrobcem vybraného odstředivého čerpadla. Výstupem práce je vykreslení křivek a vyhodnocení vzájemných odchylek. Výkonnostní charakteristika čerpadla je důležitá volbu správné aplikace čerpadla.

Výzkumné části předcházejí kapitoly, které předkládají vhled do samotné problematiky hydrodynamických čerpadel a obecné rozdělení jednotlivých typů podle směru toku kapaliny z pracovního prostoru čerpadla, způsobu činnosti a druhu aplikace. Zejména se tato část zaměřuje na teoretický rozbor procesních parametrů a vzájemných vztahů, řazením čerpadel, charakteristik čerpadel a potrubních tras potřebných pro návrh pracovního rozsahu a provozního bodu čerpadla.

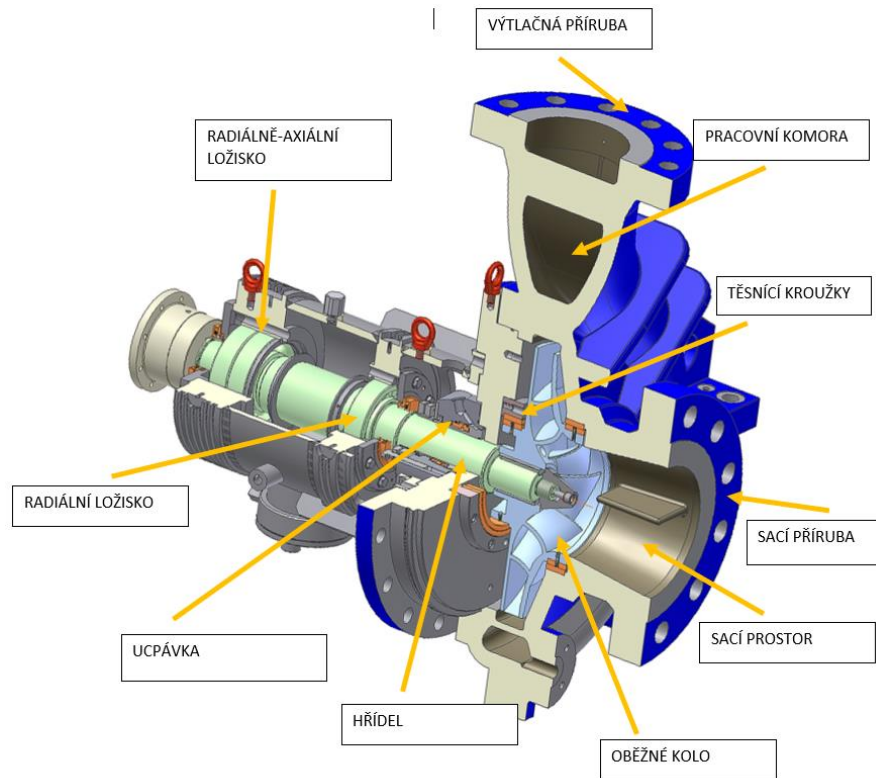
Experimentální část se věnuje popisu, návrhu a stavbě experimentální hydraulické tratě pro měření výkonnostní charakteristiky odstředivého čerpadla. Pro přehledné pochopení je uvedeno procesní schéma, CAD model hydraulické trati a rozbor jednotlivých měřících zařízení, která jsou používána k měření. Uvedeny jsou jejich nezbytné parametry jako měřící rozsah a přesnosti měření. Dále je uveden podrobný popis průběhu samotného měření, protokol s naměřenými hodnotami a zpracování měření pomocí výpočtů a tabulek.

2 Teoretická část

2.1 Princip odstředivých čerpadel

První odstředivé čerpadlo vynalezl fyzik Denis Papin na konci 17. století. Prvním konstruktérem, který si jej nechal patentovat v Anglii 2. července 1698, se však stal Thomas Savery. Tento stroj měl úlohu čerpání vody z dolů a posloužil jako základ pro rozvoj čerpací techniky. Pro jednoduchý princip fungování je tento typ čerpadla v dnešní době nejpoužívanější.

Základní funkci radiálního čerpadla zajišťuje oběžné kolo, připevněné na hřídeli a umístěné v pracovní komoře se dvěma hrdly. Vstupním hrdlem je přiváděna kapalina na střed oběžného kola. Odstředivá síla na lopatkách rotujícího oběžného kola unáší kapalinu k vnějšímu okraji. Tam je kapalina odváděna podél stěny pracovní komory směrem k výtlačnému hrdlu. Odtékající kapalina má větší kinetickou energii, kterou jí předalo oběžné kolo. Před výstupním hrdlem se průtočný průřez prostoru zvětšuje, dochází ke zpomalení kapaliny a tím roste tlak. Spojení čerpadla a pohonu (nejčastěji asynchronní motor) tvoří čerpací jednotku. Spojení těchto částí může být tvořeno pouze spojkou (pevná, pružná) nebo v kombinaci s převodovkou. Pokud je pohon čerpací jednotky vypnutý a zároveň nastane rozdíl hodnot tlaků na hrdlech čerpadla, může stále docházet k průtoku kapaliny pracovní komorou. Čerpadlo pak vytváří hydraulický odpor. Řez a popis pracovního prostoru lze vidět na obrázku (obr. 1). [1]

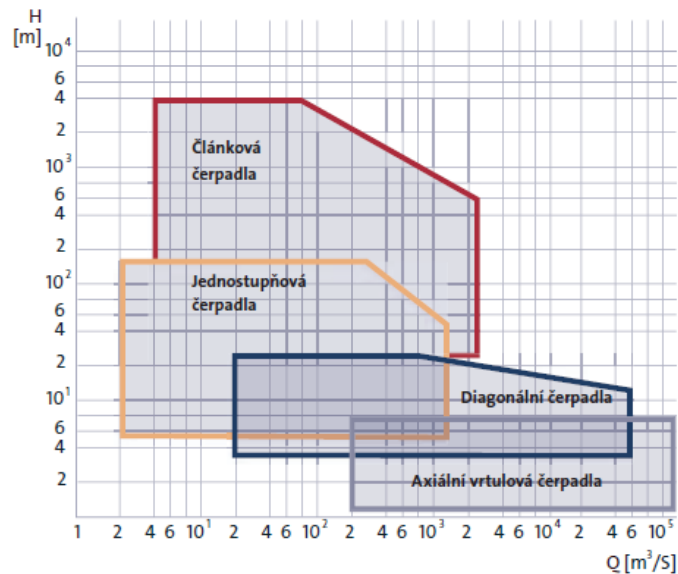


Obr.: 1 Popis odstředivého čerpadla [4]

2.2 Rozdělení hydrodynamických čerpadel

Čerpadla jsou využívána pro různé aplikace s odlišnými požadavky na jejich provozní parametry, proto jsou dělena do mnoha skupin. Jednotlivé skupiny se třídí podle směru toku kapaliny, konstrukčního provedení a oblasti využití.

Podle směru toku kapaliny se hydrodynamická čerpadla dělí na odstředivá a axiální. Skupina odstředivých čerpadel se skládá z radiálních a diagonálních. V podskupině radiálních rozlišujeme jednostupňová a vícestupňová čerpadla. Tato podskupina je v dnešní době nejpoužívanější. Diagram (obr. 2) zobrazuje rozdíly hlavních parametrů jednotlivých druhů čerpadel. Podle tohoto diagramu je zřejmé, že axiální čerpadla jsou používána v oblasti velkých průtoků a nízkých hodnot tlaku, resp. malé dopravní výšky. Radiální čerpadla jsou využívána v opačném případě, tedy v oblasti vyšší dopravní výšky. [1]



Obr.: 2 Schéma rozdělení čerpadel podle průtoku a dopravní výšky [5]

Hlavní příčinou rozdílných parametrů čerpadel je vystupující směr toku kapaliny z oběžného kola. Z obrázku (obr. 3) je patrné, že směr kapaliny při sání oběžného kola je u všech typů čerpadel stejný. Směr vytékající kapaliny z oběžných kol jednotlivých typů čerpadel je naopak rozdílný. [2]



Obr.: 3 Rozdělení odstředivých čerpadel [5]

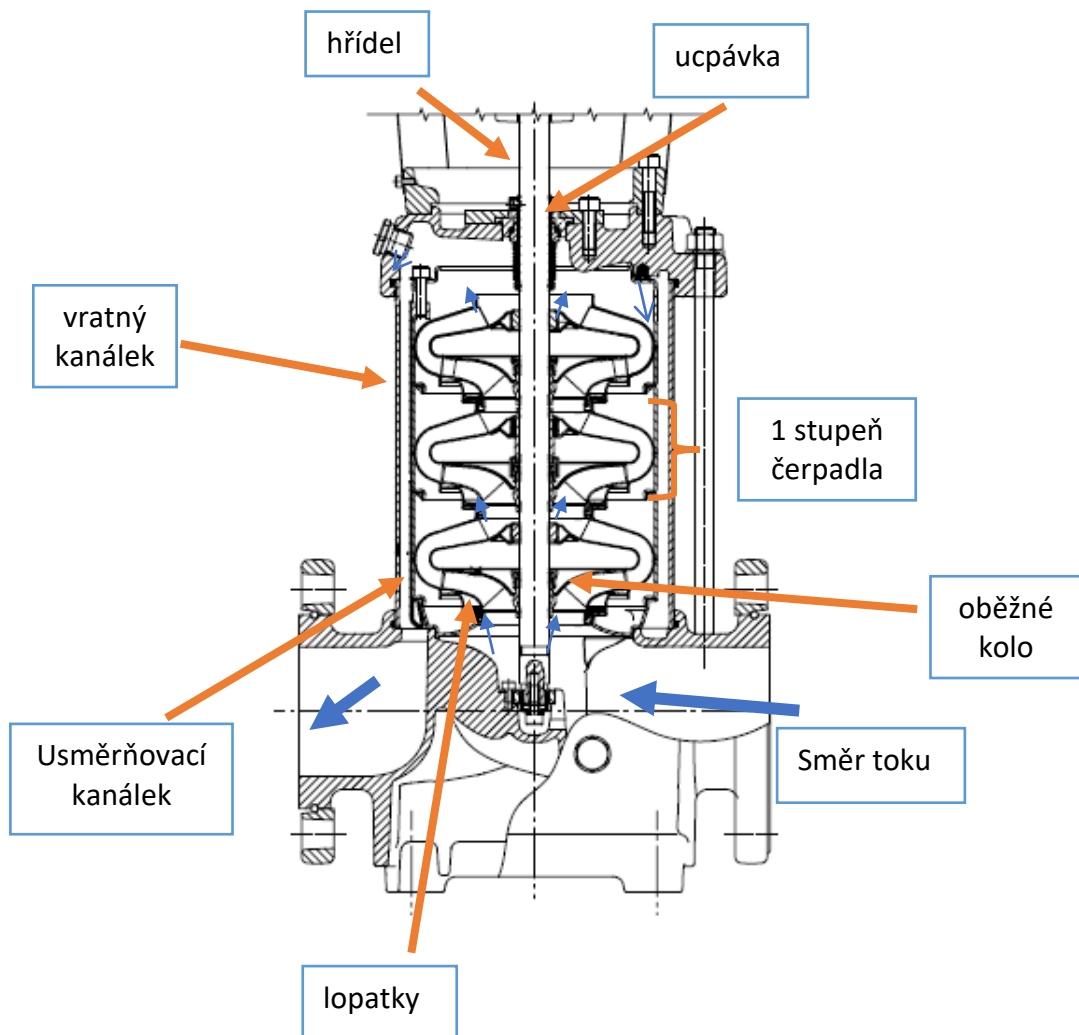
2.2.1 Jednostupňové radiální čerpadlo

Počet stupňů je dán počtem oběžných kol čerpadla. Jednostupňová čerpadla jsou aplikována v procesech, při kterých není potřeba více než 150 metrů dopravní výšky v systému potrubí. Standartní rozmezí dopravní výšky jednostupňových čerpadel je od 3 do 100 metrů. Tento typ čerpadel je aplikován např. v zemědělství, průmyslu nebo vodárenství. Jejich průtok dosahuje více než 1 m³/min. Konstrukční provedení může být pro vertikální i horizontální instalaci. [5]

2.2.2 Vícestupňové radiální čerpadlo

Hlavní výhodou čerpadel ve vícestupňovém provedení je dosažení vyšší dopravní výšky než u jednostupňových čerpadel (při stejném průtoku). Princip součinnosti více stupňů je poměrně jednoduchý. Na hnaném hřídeli čerpadla jsou za sebou umístěna oběžná kola. V tělese čerpadla jsou kanálky, které usměrňují tok kapaliny z předchozího oběžného kola do místa sání následujícího kola v dalším stupni. Konstrukce těchto čerpadel je složitější a také nákladnější. Na obrázku (obr. 4) je zobrazen řez třístupňového čerpadla.

[5]

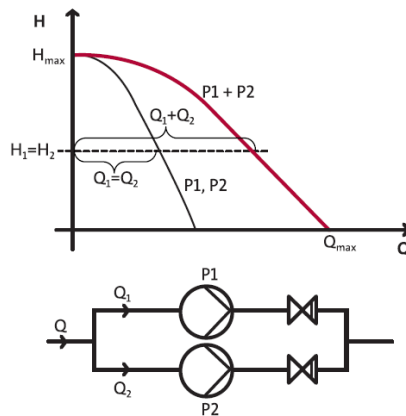


Obr.: 4 Popis řezu vícestupňovým čerpadlem [6]

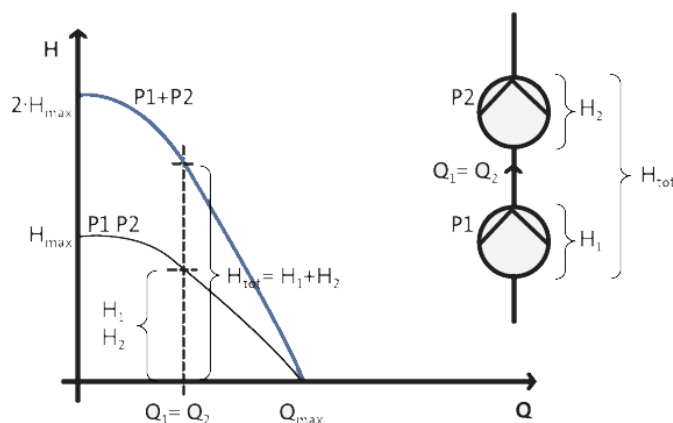
2.2.3 Problematika řazení čerpadel

Vyšších výkonových parametrů v systému, než mají čerpadla samotná, lze docílit propojením jednotlivých čerpadel potrubním systémem. Zvýšení průtoku kapaliny systémem při konstantní hodnotě tlaku lze dosáhnout paralelním zapojením čerpadel. Naopak pro potřebu zvýšení tlaku, resp. dopravní výšky v systému s konstantním

průtokem, slouží sériové zapojení čerpadel o podobných provozních parametrech. Tento princip je využíván při konstrukci vícestupňových čerpadel. Na obrázcích (obr. 5, obr. 6) jsou znázorněny jednotlivé situace řazení čerpadel v grafech dopravní výšky (více o závislosti dopravní výšky a průtoku v kapitole 2.4.1.) a schematicky. [6]



Obr.: 5 Paralelní zapojení čerpadel [5]



Obr.: 6 Sériové zapojení čerpadel [5]

2.2.4 Normovaná čerpadla

Několik technických norem (např. ČSN EN ISO 9906, ČSN EN ISO 17769-2) se zabývá problematikou čerpacích jednotek. Normované čerpadlo je takové, které vyhovuje předpisům týkajících se základních provozních parametrů a provozních bodů, instalačních rozměrů. Na základě norem je jednodušší provést výběr čerpadla pro určitou aplikaci. Existuje však mnoho čerpadel, které nesplňují mezinárodní normy. Tato čerpadla lze vyhledat pouze pomocí katalogů jednotlivých výrobců. [5]

2.2.5 Hermeticky utěsněné čerpadlo

Prostor kolem hřídele typického čerpadla bývá utěsněn provazcovou nebo mechanickou ucpávkou. Skrz tento typ těsnění stále hrozí průsak čerpané kapaliny z pracovní komory do okolí.

Hermeticky utěsněné čerpadlo je konstruováno pro čerpání těkavých nebo agresivních kapalin. Utěsnění je řešeno dvojitou mechanickou ucpávkou nebo použitím magnetického pohonu. Pracovní prostor je oddělen tenkou membránou. Tím je vyřešen problém nežádoucího průsaku čerpané látky mimo pracovní komoru čerpadla. [5]

2.2.6 Ponorné čerpadlo

Konstrukce ponorného čerpadla je vytvořena tak, že hydraulická část je ponořena v nádrži čerpané kapaliny a část s pohonem je umístěná v suchém prostředí. Tato čerpadla jsou z pravidla instalována ve vertikální poloze vůči hladině kapaliny. Tento typ čerpadel je např. používán pro aplikaci čerpání chladiv obráběcích strojů nebo čerpání paliv z nádrže. [5]

2.2.7 Čerpadlo pro odpadní vody

Tento typ čerpadel je vyráběn jako kompaktní utěsněná jednotka, kterou lze celou ponořit do jímky. Obvykle je takové čerpadlo opatřeno automatickou spojkou, která se ovládá spouštěcími tyčemi. Odpojení čerpadla lze tedy provést na dálku a není nutné vstupovat do konkrétní jímky. Lze tak zajistit velmi snadnou údržbu nebo výměnu čerpadla. [1]

2.3 Základní parametry

Pro výpočet provozních parametrů čerpadla platí následující základní obecné vztahy – rovnice kontinuity (rov. 1) a Bernoulliho rovnice (rov. 3). [1]

Rovnice kontinuity určuje vztah mezi průtokem, rychlostí proudění, průtočnou plochou průřezu potrubí a hustotou.

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_v \cdot \rho = S \cdot u \cdot \rho = konst. \quad (1)$$

2.3.1 Průtok

Průtok je definován jako množství čerpané kapaliny, které proteče plochou za určitou jednotku času. Ztracená kapalina mezi vstupním a výstupním hrdlem se do průtoku nezapočítává. Proteče ucpávkou a případně jinými netěsnostmi. Do dopravního množství kapaliny se počítá pouze ta, kterou má spotřebitel k dispozici. Průtok se dělí na objemový a hmotnostní.

2.3.1.1 Objemový průtok

Objemový průtok \dot{Q}_v je hlavní výkonnostní parametr čerpadel. Tato veličina je závislá na změně hustoty, resp. změně teploty čerpané kapaliny. Jednotkou objemového průtoku je m^3/h . Hodnota jmenovitého průtoku odpovídá oblasti nejvyšší účinnosti čerpadla.

2.3.1.2 Hmotnostní průtok

Hmotnostní průtok \dot{Q}_m vyjadřuje hmotnost kapaliny, která proteče čerpadlem za určitou jednotku času. Jednotkou hmotnostního průtoku je kg/s . Vztah hmotnostního a objemového průtoku udává rovnice (rov. 2).

$$\dot{Q}_m = \dot{Q}_v \cdot \rho \quad (2)$$

Bernoulliho rovnice – inženýrský tvar (rov. 3).

$$\kappa_1^2 \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot h_1 = \kappa_2^2 \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot h_2 + e_z \quad (3)$$

Jednotlivé členy představují jednotlivé složky energie. Člen $\frac{p}{\rho}$ představuje příspěvek tlakové energie, člen $g \cdot h$ představuje energii potenciální a člen $\frac{u^2}{2}$ představuje energii kinetickou. Člen e_z vyjadřuje třecí a místní ztráty měřenými místy okruhu. κ je konstanta závislá na typu proudění kapaliny. Jednotkou měrné energie je J/kg .

2.3.2 Měrná energie

Hlavní funkcí čerpadla je dodat čerpané kapalině energii. Součet složek energií, tj. tlakové, potenciální a kinetické, je celková mechanická energie. Celkovou energii Y včetně hydraulických ztrát definuje upravený tvar Bernoulliho rovnice (rov. 4).

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + g \cdot h_1 + Y = \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + g \cdot h_2 + e_z \quad (4)$$

2.3.3 Dopravní výška

Dopravní výška H_ξ je parametr, který udává, do jaké výšky je čerpadlo schopné vyčerpat kapalinu. Jednotkou dopravní výšky je metr. Vztah měrné energie a dopravní výšky popisuje rovnice (5).

$$H_\xi = \frac{Y}{g} \quad (5)$$

2.3.4 Tlak

Tlak p je velikost síly působící na plochu. Celkový tlak je součtem statického a dynamického tlaku. Hodnota tlaku se udává v Pascalech Pa nebo barech $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$. Statický tlak kapaliny se snižuje při zvyšování rychlosti proudění kapaliny. Při měření tlaku je nutné rozlišit, jaký druh tlaku se měří (absolutní nebo manometrický). Absolutní tlak se počítá od nuly (tlak nad absolutním vakuem). Manometrický tlak je rozdíl hodnoty měřeného a atmosférického tlaku.

2.3.5 Příkon

Příkon P_2 čerpadla je stejný jako výkon motoru, při zanedbání ztrát ve spojce (případně převodovce). Tedy výkon předaný hřídelem motoru na hnací hřídel čerpadla. Ten je nutný pro dosažení dopravní výšky při daném průtoku kapaliny. K tomuto parametru se vztahuje spotřeba energie čerpadla. Příkon čerpadla se udává v kilowattech kW.

2.3.6 Účinnost

Při výpočtu účinnosti η je nutné rozlišit o jakou účinnost se jedná. Účinnost je obecně definována jako podíl výkonu a příkonu energie. Výše účinnosti je vždy ovlivněna mnoha faktory. Účinnost samotného čerpadla hlavně závisí na konstrukci, typu provedení, kvalitě povrchu styčných ploch, rychlosti proudící kapaliny a hodnotě průtoku. Účinnost

čerpadla se označuje η_p a je vyjádřena následující rovnicí (rov. 6). Veličina P_H vyjadřuje hydraulický výkon čerpadla.

$$\eta_p = \frac{P_H}{P_2} = \frac{\dot{Q}_v \cdot \rho \cdot Y}{P_2} \quad (6)$$

Celková účinnost celé čerpací jednotky se označuje η_T a je součinem účinnosti čerpadla, motoru a frekvenčního měniče otáček, jak uvádí rovnice (rov. 7). Celková účinnost obvykle dosahuje 70 %.

$$\eta_c = \eta_p \cdot \eta_M \cdot \eta_{FC} \quad (7)$$

2.3.7 Kavitační deprese

Kavitace je nežádoucí děj. Při poklesu tlaku (pod hodnotu tlaku sytých par) v kapalině vznikají dutiny, které následně implodují. Při implozi vznikají rázové vlny, které následně ničí povrch, snižuje výkon a krátí životnost oběžného kola čerpadla.

Kavitační deprese Δy_{kr} charakterizuje hodnotu minimálního přetlaku na straně sání, aby zamezila vzniku kavitace. Kavitační deprese je definována podle rovnice (rov. 8).

$$\Delta y_{kr} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} - \frac{p''}{\rho} \quad (8)$$

Součet prvních dvou členů udává celkovou měrnou energii na straně sání čerpadla. Poslední člen udává energii nasycených par. Tlaky p_1 a p'' jsou hodnoty absolutních tlaků. Kavitační deprese se udává v jednotkách J/kg. Dovolená kavitační deprese se uvádí z důvodu bezpečnosti v následujícím vztahu (rov. 9). Hodnota bezpečnosti se uvádí až 20 % kvůli možnému kolísání tlaku při provozu. [1]

$$\Delta y_{dov} = (1,15 \div 1,2) \cdot \Delta y_{kr} \quad (9)$$

2.3.8 Sací výška čerpadla NPSH

V literatuře se více používá anglická zkratka NPSH (Net Positive Suction Head). Vyjadřuje nejvyšší možnou geodetickou výšku čerpadla na straně sání. Hodnota $\Delta NPSH$ vychází z rovnice (rov. 10) s jednotkou m. Člen H_z udává ztrátovou výšku mezi hladinou v nádrži a sací přírubou čerpadla. [3]

$$\Delta NPSH = H_{gs} \leq \frac{p_s - p_n}{g \cdot \rho} - H_z - \frac{\Delta y_{dov}}{g} \quad (10)$$

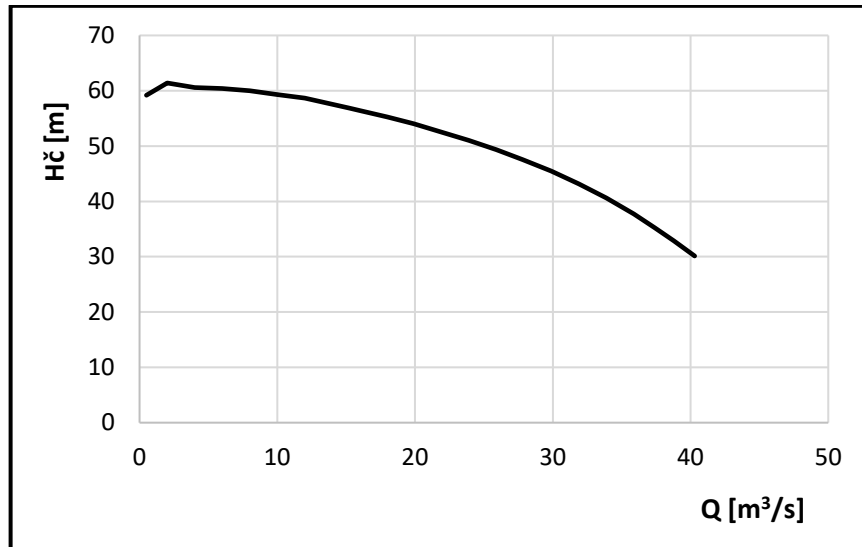
Pokud z výpočtu vyjde kladná kavitační rezerva $\Delta NPSH$, lze čerpadlo umístit o výslednou hodnotu nad hladinu nádrže. Pro zápornou kavitační rezervu $\Delta NPSH$ platí analogicky totéž, tedy umístění čerpadla pod hladinu o výslednou hodnotu.

2.4 Výkonové charakteristiky čerpadel

Charakteristika čerpadla je závislost provozních parametrů čerpadla. Tato závislost je reprezentována křivkou, která je tvořena spojnici provozních bodů čerpadla. Představuje hlavní údaj pro navrhování čerpadel nebo pro správný výběr čerpadla pro danou aplikaci. Charakteristiky vyjadřují grafické závislosti dopravní výšky, průtoku, příkonu, účinnosti a $\Delta NPSH$ při konstantních otáčkách. Každé čerpadlo je testováno na zkušebním hydraulickém okruhu a jednotlivé charakteristiky se ověřují. [2]

2.4.1 Charakteristika dopravní výšky

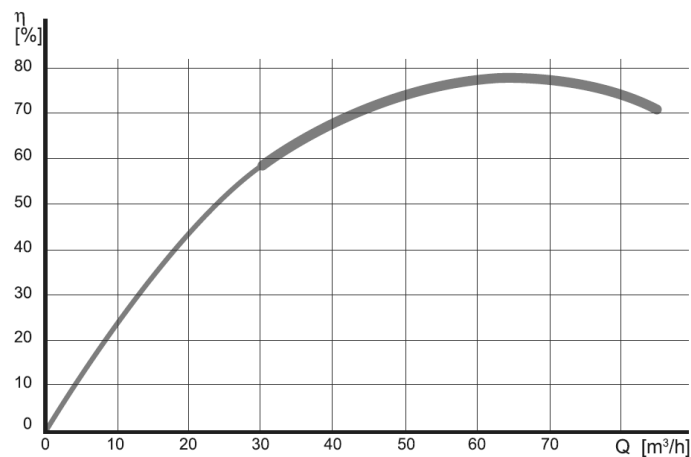
Tato charakteristika $H - \dot{Q}$ zobrazuje závislost dopravní výšky, do které je čerpadlo schopno vyčerpávat kapalinu při daném (objemovém) průtoku. Typická charakteristika odstředivého čerpadla je zobrazena na obrázku (obr. 7).



Obr.: 7 Charakteristika $H - \dot{Q}$

2.4.2 Charakteristika účinnosti čerpadla

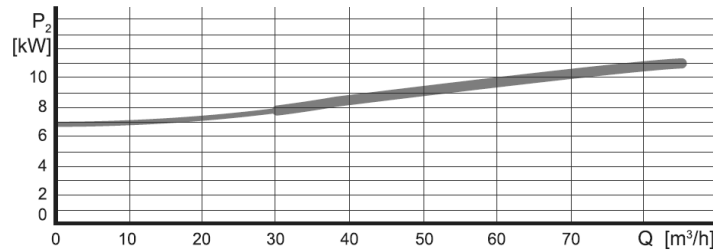
Křivka $\eta - \dot{Q}$ na obrázku (obr. 8) znázorňuje průběh účinnosti čerpadla v závislosti na průtoku kapaliny. Optimální provozní bod se nachází v oblasti nejvyšší účinnosti čerpadla.



Obr.: 8 Charakteristika $\eta - \dot{Q}$ [5]

2.4.3 Charakteristika příkonu čerpadla

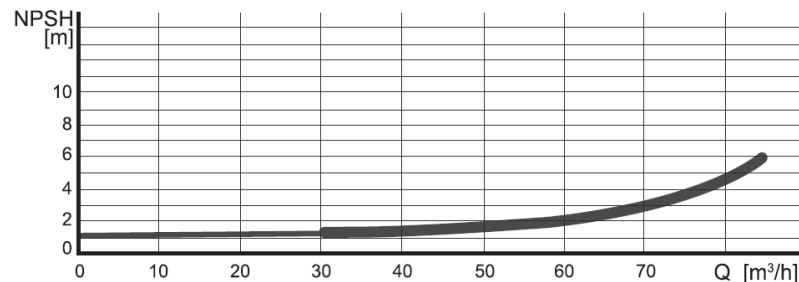
Tato křivka $P_2 - \dot{Q}$ (obr. 9) ukazuje závislost příkonu čerpadla na průtoku kapaliny. Z tohoto důvodu je zapnutí čerpadla úspornější při škrceném průtoku.



Obr.: 9 Charakteristika $P_2 - \dot{Q}$ [5]

2.4.4 Charakteristika NPSH

Křivka $\Delta NPSH - \dot{Q}$ je důležitá pro provoz čerpadla v bezpečném režimu (bez kavitace). Z tohoto důvodu je důležitá poloha čerpadla při instalaci. Na obrázku (obr.10) lze vidět, že ztrátová sací výška a kavitační deprese jsou funkcí průtoku.



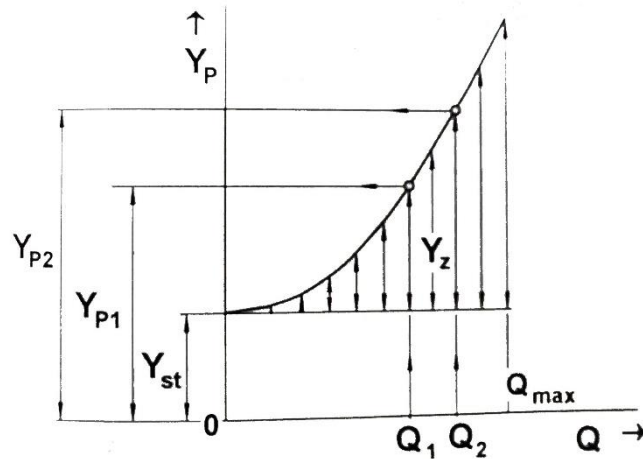
Obr.: 10 Charakteristika $\Delta NPSH - \dot{Q}$ [5]

2.5 Charakteristika potrubního systému

Charakteristika potrubí určuje, kolik energie musí být kapalině dodáno, aby protékala potrubním systémem. Množství potřebné energie lze vyjádřit Bernoulliho rovnicí (rov. 11).

$$Y_p = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + g \cdot (h_2 - h_1) + e_z \quad (11)$$

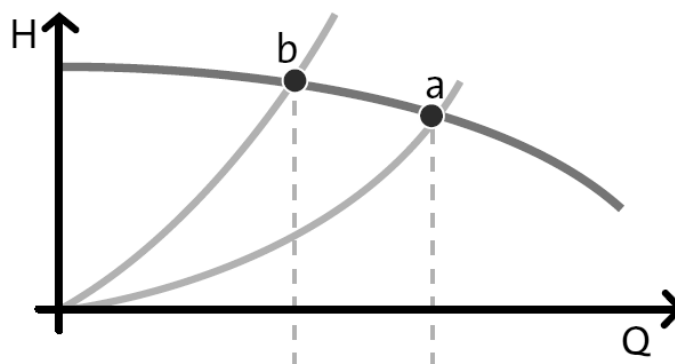
Tato energie Y_p je součtem energie statické Y_{st} a ztrátové Y_z . Složka statické energie je rovna rozdílu potenciálních energií mezi místem nádrže a sací přírubou. Disipace energie kapaliny tvoří ztrátovou složku energie, je tedy závislá na velikosti průtoku kapaliny. Podíl jednotlivých složek energií zobrazuje obrázek (obr. 11). [1]



Obr.: 11 Charakteristika potrubního systému [1]

2.6 Provozní bod čerpadla

Optimální provozní bod čerpadla je pouze jeden, udává hodnotu průtoku a měrné energie v bodě nejvyšší účinnosti čerpací jednotky. Provozní bod je průsečíkem charakteristiky potrubí a charakteristiky čerpadla (bod **a** na obr. 12). Při změně charakteristiky potrubní sítě, resp. změně průtoku kapaliny, se průsečík těchto křivek posouvá do jiných hodnot (bod **b** na obr. 12). Tímto posuvem průsečíku vzniká nový provozní bod. Cíl správného návrhu provozního bodu je takový, aby byl co nejbližší optimálnímu provoznímu bodu. Všechny provozní body čerpadla leží na jedné společné křivce. Tato křivka je charakteristikou (obr. 12) čerpadla. [1]



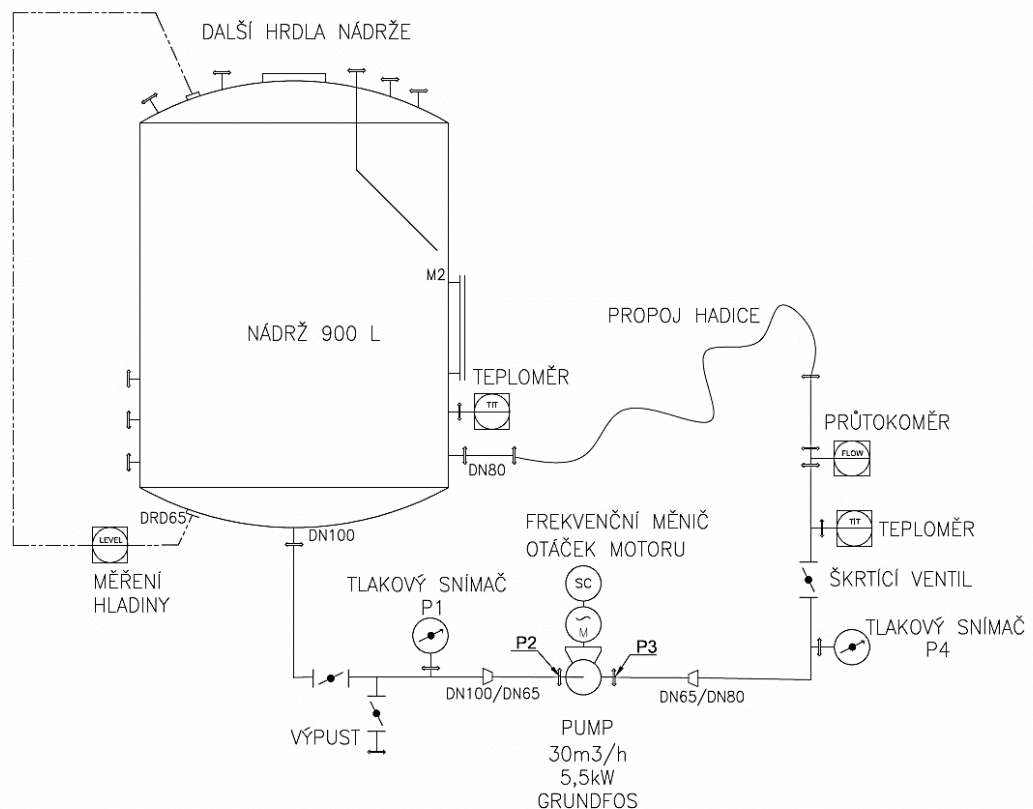
Obr.: 12 Charakteristika odstředivého čerpadla s vyznačeným provozním bodem [6]

3 Experimentální část

3.1 Hydraulický okruh

Experimentální hydraulický okruh je potrubní trasa s řadou měřících zařízení a armatur, která simuluje skutečný potrubní řad pomocí škrcení průtoku kapaliny. Hydraulický okruh stejně jako potrubní řad má svou vlastní potrubní charakteristiku. Testovací okruh je složen z několika důležitých částí. Dispozice a pořadí přístrojů v okruhu nejsou náhodné. Při instalaci jednotlivých komponent je zapotřebí dbát na doporučení výrobců jednotlivých komponent. [příloha 2, 3 ,4]

Hydraulický okruh je postaven univerzálně, aby sloužil pro testování různých čerpadel v provedení „inline“ (stejná výšková úroveň vstupního a výstupního hrdla). V následující kapitole je zkušební okruh znázorněn v podobě P&ID (Piping and Instrument Diagram) schématu (obr. 13).



Obr.: 13 P&ID – Piping and Instrument Diagram

Při maximálním výkonu čerpací jednotky by mohlo docházet ke vzniku kavitace. Z tohoto důvodu je poloha výtokového hrdla nádrže umístěna ve vyšší poloze, než je

umístění sací příruby čerpadla. To zamezí nežádoucímu vzniku podtlaku kapaliny na straně sání. Přesné rozměry celého okruhu jsou uvedeny ve výkresu technické dokumentace. [příloha 5]

Z důvodu nedostatku prostoru v okolí čerpací jednotky jsou digitální snímače tlaku označené p_1 a p_4 umístěny v určité vzdálenosti od sací a výtlačné příruby čerpadla. Důsledkem je přepočítání tlaku pomocí úpravy základního tvaru Bernoulliovy rovnice. Rovnice je rozdělena na dvě části – stranu sání a výtlačný řad. Předpokládaná oblast proudění kapaliny je turbulentní ($Re > 2300$). Pro turbulentní proudění platí $\kappa \rightarrow 1$. Tento předpoklad je ověřen při výpočtu hodnot rychlostí proudění v jednotlivých místech okruhu. Z toho vyplývá, že mezi bodem p_1 a p_2 platí následující vztah (rov. 12).

$$\frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + e_{z1} \quad (12)$$

Hodnotu tlaku p_2 (rov. 13) lze vyjádřit z předchozí rovnice.

$$p_2 = \left(\frac{u_1^2 - u_2^2}{2} \right) \rho + p_1 + e_{z1} \rho \quad (13)$$

Velice podobná skutečnost platí i pro vztah (rov. 14 a 15) mezi bodem p_3 a p_4 , jen zde musí být započítán i rozdíl výškové úrovně jednotlivých míst měření.

$$\frac{u_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho} = \frac{u_4^2}{2} + \frac{p_4}{\rho} + gh_4 + e_{z2} \quad (14)$$

$$p_3 = \left(\frac{u_4^2 - u_3^2}{2} \right) \rho + p_4 + e_z \rho + gh_4 \rho \quad (15)$$

Mezi místy p_1 a p_2 na sací straně čerpadla a body p_3 a p_4 na výtlačné straně jsou umístěny tvarovky a armatury (redukce a koleno), kde dochází ke ztrátě hydraulické energie. Vztah hydraulických ztrát v závislosti na rychlosti proudění kapaliny vyjadřuje následující vztah (rov. 16).

$$e_z = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \xi_i \right) \frac{u^2}{2} \quad (16)$$

Z důvodu krátké délky potrubí l je tření v těchto místech zanedbáno, avšak velikost místních tlakových ztrát zanedbat nelze. Jednotlivé součinitele místních tlakových ztrát lze najít v následujících tabulkách (tab. 1, 2, 3).

2δ	5°	7°	10°	20°	30°	60°
Ztrátový součinitel	0,06	0,12	0,16	0,20	0,24	0,32

Tabulka ztrátových součinitelů pro místní ztráty kónickým zúžením

Tab.: 1 Součinitel místních ztrát – kónické zúžení [2]

r/D	1,0	1,5	2,0	4,0	6,0	10,0	20,0
Ztrátový součinitel – hladká potrubí	0,21	0,17	0,15	0,11	0,09	0,07	0,05
Ztrátový součinitel – drsná potrubí	0,42	0,34	0,30	0,22	0,18	0,14	0,10

Tabulka ztrátových součinitelů pro místní ztráty obloukovým kolenem

Tab.: 2 Součinitel místních ztrát – koleno 90° [2]

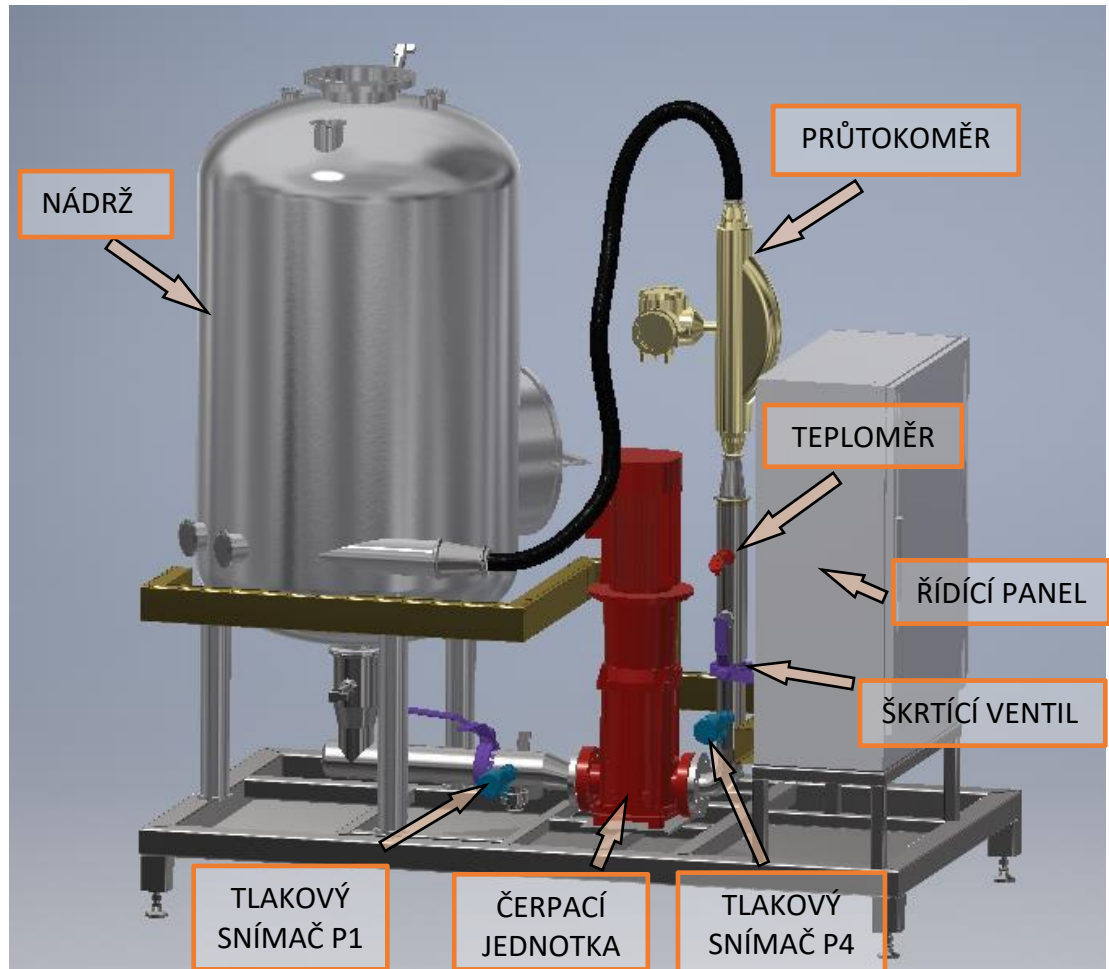
S_2/S_1	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	6,0	8,0
$2\delta=5^\circ$	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10
$2\delta=10^\circ$	0,02	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,12
$2\delta=15^\circ$		0,06	0,08	0,10	0,13	0,17	0,20
$2\delta=20^\circ$					0,17	0,20	0,23

Tabulka ztrátových součinitelů pro místní ztráty kónickým rozšířením

Tab.: 3 Součinitel místních ztrát – kónické rozšíření [2]

Dle doporučení výrobce pro přesné měření průtoku je delší rovinný úsek před instalovaným průtokoměrem nezbytný. V opačném případě by hrozilo zkreslení výsledků měřených hodnot. Podrobnější informace o instalaci průtokoměru jsou k nalezení v technické dokumentaci. [příloha 2]

V poslední části okruhu je průtokoměr propojen se vstupním hrdlem nádrže hadicí, ale na experiment to nemá negativní vliv. Tímto je hydraulický okruh uzavřen a kapalina může cirkulovat.



Obr.: 14 CAD model hydraulického okruhu

Pro lepší představu je ukázka (obr. 14) popsáno CAD modelem, nakresleného v aplikaci Autodesk Inventor Professional. Zachycuje dispoziční hydraulického okruhu s popisem jednotlivých zařízení potřebných pro měření. Skutečnou podobu okruhu lze vidět na fotce (obr. 15).



Obr.: 15 Fotka hydraulického okruhu

3.2 Jednotlivá zařízení hydraulického okruhu

Měřené zařízení této práce je čerpací jednotka CRN-32-3-A-F-A-E-HQQE od společnosti Grundfos s.r.o. Další zařízení připojená v okruhu slouží k měření fyzikálních veličin kapaliny cirkulující v hydraulickém okruhu. Pro výpočet charakteristiky čerpací jednotky je nezbytné znát hodnoty objemového průtoku a hodnot tlaku, pro jejichž měření bylo použito průtokoměru a snímačů tlaku. Speciálním zařízením je škrtkový ventil, který neslouží k měření veličiny, ale pouze ke změně velikosti průtoku kapaliny hydraulickým okruhem. Všechny tyto komponenty okruhu jsou spojeny rychlospojkou nazývanou „Tri-Clamp“. Dále je měřena teplota kapaliny pro kontrolu správného měření objemového průtoku.

3.3 Testovaná čerpací jednotka

Testovaná čerpací jednotka je kompaktní zařízení, které se skládá z třístupňového odstředivého čerpadla a třífázového elektromotoru. Tyto dvě hlavní části jsou spojeny pomocí pevné spojky, která slouží k přenosu sil z motoru na hlavní hřídel čerpadla. Kompaktní jednotku vyrobila a dodala společnost GRUNDFOS Sales s.r.o. Každá čerpací jednotka je dodávána s výrobním kódem, podle kterého lze rychle a jednoznačně rozpoznat základní parametry dodávaného čerpadla. [6]

3.3.1 Čerpadlo

Čerpadlo je určeno pro vertikální instalaci a je typu inline, tedy vstupní a výstupní příruba čerpadla je ve stejné úrovni. Tělo čerpadla, pracovní komory a oběžná kola jsou

vyrobená z korozi-vzdorné oceli vysoké kvality. Profil lopatek na oběžných kolech zajišťuje vysokou účinnost stroje. Všechny stykové části s kapalinou mají několik povrchových úprav (např. zinkofosfátování a katodické elektropovlakování epoxidovou vrstvou).

Materiál mechanické ucpávky obou částí (rotačního těsnícího kruhu a pevného sedla) je karbid křemíku (SiC). Tento materiál zajišťuje lepší odolnost proti korodování a abrazi dílů ucpávky. Primární ucpávka je vsazena do zásobníkové jednotky čerpadla, to poskytuje jednoduchou údržbu či výměnu. Sekundární ucpávku tvoří těsnící kroužek z EPDM (ethylenová pryž), tento materiál má dobrou odolnost proti horké vodě. [5]

Dělená pevná spojka spojuje výstupní hřídel motoru a hnaný hřídel samotného čerpadla. Spojka se nachází v lucerně motoru, která spojuje motor s horní deskou tělesa čerpadla (obr. 16).



Obr.: 16 Třístupňové odstředivé čerpadlo s motorem – CRN-32 [7]

3.3.2 Základní parametry čerpadla

Čerpadlo pracuje na základě provozních parametrů. Lze je najít v tabulce (tab. 4). Tyto parametry najdeme též na výrobním štítku každého čerpadla.

název veličiny	hodnota	jednotky
jmenovitý průtok	30	m ³ /h
jmenovitá dopravní výška	44,1	m
jmenovité otáčky	2919	ot/min
jmenovitý výkon P ₂	5,5	kW
frekvence el. sítě	50	Hz
max. provozní tlak	16	bar
max. teplota kapaliny	120	°C
max. dopravní výška	58,5	m

Tab.: 4 Provozní parametry čerpací jednotky Grundfos CRN-32 [8]

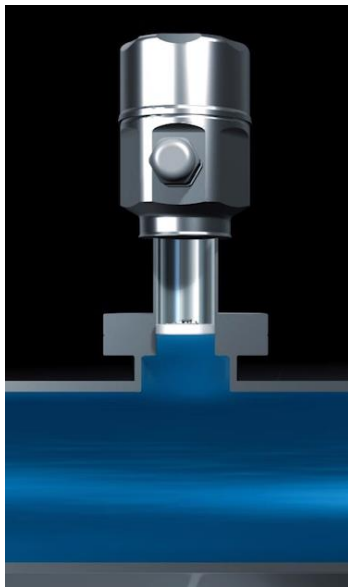
3.3.3 Motor

Součástí čerpací jednotky je třífázový asynchronní motor, který je přišroubovaný přímo na přírubu tělesa čerpadla. Motor slouží transformaci elektrické energie na mechanickou, kterou přenáší pevná spojka. Podle technické dokumentace pracuje motor s účinností 90 % při maximálním zatížení.

Výstupní výkon motoru je 5,5 kW a zároveň je i příkonem čerpadla. Tato veličina je značena P₂ [kW]. K motoru je připojen frekvenční měnič otáček, který slouží k nastavení dodávané elektrické energie motoru tedy otáček motoru. Tento postup je využit pro měření charakteristiky čerpadla. Všechny další parametry motoru a způsob zapojení do elektrické sítě lze vyhledat v technické dokumentaci. [8], [příloha 1]

3.3.4 Snímač tlaku (tlakoměr)

Pro odečítání hodnot tlaků v místech p₁ a p₄ hydraulického okruhu bylo použito univerzálních digitálních snímačů tlaku Cerabar PMP55 od společnosti Endress+Hauser Czech s.r.o.



Obr.: 17 Tlakový snímač Cerabar PMP55 [11]

Tlakové snímače jsou vybaveny kovovou oddělovací membránou (obr. 17), která zajišťuje univerzálnost použití v mnoha různých procesech. Tímto přístrojem lze měřit plynnou i kapalnou fázi téměř jakékoliv pracovní látky. Digitální signál z přístroje lze ukládat do paměti počítače nebo jen odečítat aktuální naměřenou hodnotu tlaku na displeji. Výrobce udává, že měřící rozsah tohoto zařízení je -1 až +400 bar (absolutní tlak) s velmi vysokou přesností měření. Maximální odchylka je $\pm 0,15$ % měřené hodnoty.

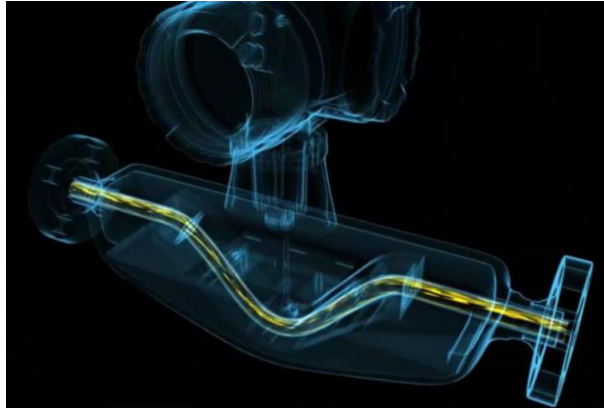
Měřící membrána je umístěna v oblasti procesního připojení „Tri-Clamp“ o průměru 2 inch (50,8 mm), pomocí kterého je tlakový snímač připojen do okruhu. [14], [příloha 3]

3.3.5 Průtokoměr

Zařízení Proline Promass F300 od společnosti Endress+Hauser Czech s.r.o. je hmotnostní průtokoměr s vysokou mírou přesnosti. Má širokou oblast využití ve všech druzích průmyslu. Procesní připojení průtokoměru je o velikosti 2 inch (50,8 mm). Měřící rozsah průtoku je 0 – 70 000 kg/h. Podle technické dokumentace výrobce garantuje maximální odchylku měření hmotnostního průtoku $\pm 0,05$ %. [příloha 2]

Princip měření Coriolisova průtokoměru je složitější. Pracuje na principu měření Coriolisových sil kapaliny, která proudí trubičkami průtokoměru. Trubičky jsou v místě průtokoměru mírně ohnuté. Při změně hodnoty průtoku kapaliny se trubičky mírně deformují vlivem unášivých sil původního směru toku. Během tohoto děje jsou zároveň trubičky rozkmitávány budícím elementem o určité frekvenci. Senzory po stranách

od budícího elementu snímají tyto kmity a měří časový posun průběhu kmitání trubiček při průtoku kapaliny. Tím přístroj získává hodnotu hmotnostního průtoku kapaliny. Znázornění toku kapaliny lze pozorovat na následujícím obrázku (obr. 18).



Obr.: 18 Měření průtoku Coriolisovým průtokoměrem [10]

Průtokoměr (obr. 19) se nachází za čerpadlem a měří hmotnostní (nebo objemový) průtok, který zajišťuje čerpadlo. Při nulovém průtoku se průtokoměr automaticky zkalibruje. Tento typ průtokoměru má více měřících režimů. Mimo jiné dokáže měřit hustotu pracovní kapaliny, lze tedy v jednom ze zvolených režimů odečítat přímo hodnotu objemového průtoku kapaliny. [13], [příloha 2]



Obr.: 19 Průtokoměr Proline Promass F300 [10]

3.3.6 Teploměr

Pro měření teploty kapaliny v okruhu byl nainstalován odporový teploměr typu iTHERM TM41 od společnosti Endress+Hauser Czech s.r.o. Tento teploměr měří s rychlou odezvou, takže je vhodný pro aplikaci v mnoha odvětvích procesního průmyslu.

Provozní parametry podle technické dokumentace uváděné výrobcem jsou následující. Teplotní rozsah měření je -200 až +600 °C při tlaku až 40 bar. Maximální odchylka měření v rozsahu teplot -50 až 300 °C je uváděna jako $\pm (0,1 + 0,00017 * t)$. Při výpočtu odchylky měření se za parametr t dosazuje naměřená hodnota teploty ve stupních celsia.

Měření teploty vody v okruhu slouží především pro zjištění hodnoty hustoty a ověření správnosti měření průtokoměru. Teploměr (obr. 20) je připojen na okruh pomocí spojení „Tri-Clamp“ o průměru 2 inch (50,8 mm). [15], [příloha 4]



Obr.: 20 Odporový teploměr iTHERM TM41 [12]

3.3.7 Manuální škrtecí ventil

Pro nejjednodušší regulaci průtoku je použit manuální ventil (motýlová klapka) s označením DPX od společnosti Definox SAS.

Hlavním důvodem zařazení manuálního ventilu (obr. 21) ve výtlačném řadu je změna hydraulického odporu. Změna průtoku slouží k simulaci reálného odporu v potrubí výtlačného řadu čerpací jednotky. Tento odpor však nesmí dosáhnout maximální hodnoty, tedy nesmí být zcela uzavřen při chodu čerpací jednotky. Jinak by mohlo dojít k přehřátí či jinému poškození čerpací jednotky, nejhůře pak k havárii potrubí. [1], [9]



Obr.: 21 Motýlová klapka DPX [9]

4 Měření charakteristiky čerpadla

4.1 Popis experimentu

Pro změření a následné vykreslení charakteristik čerpadla v hydraulickém okruhu je potřebné změřit hodnoty tlaku v místech na sací a výtlačné hraně měřeného čerpadla. Dále je potřeba změřit hodnotu objemového průtoku kapaliny, který vytváří čerpadlo. Aby bylo možné změřit více pracovních bodů čerpadla, je nutné regulovat průtok kapaliny hydraulickým okruhem. Pro každou hodnotu průtoku je důležité zaznamenat příslušné hodnoty obou tlaků. Regulaci průtoku zajistí změna polohy škrtkícího ventilu na výtlačné straně čerpadla. Regulace průtoku simuluje změnu charakteristiky potrubí a tím se mění odpor na výtlačné straně čerpadla. Rychlost kapaliny v jednotlivých částech okruhu se následně vypočítá z rovnic kontinuity (rov. 17, 18) při znalosti aktuální hodnoty průtoku a vnitřních průměrů potrubí v jednotlivých úsecích okruhu.

4.2 Příprava měřicího zařízení

- A. dokončení sestavení hydraulického okruhu
- B. kontrola instalace všech zařízení podle doporučení výrobců (pro přesné měření)
- C. uzavření ventilu pod nádrží a napuštění dostatečného množství demineralizované vody do nádrže
- D. otevření všech ventilů (včetně škrtkícího) v okruhu, zaplavení čerpadla a tlakoměrů vodou
- E. odvzdušnění čerpadla
- F. ověření těsnosti celého okruhu, kontrola všech spojů (tri-clampy, příruby) armatur a přístrojů, odstranění případných nedostatků

4.3 Postup měření

- G. zapnutí hlavního spínače na panelu, automatická kalibrace průtokoměru
- H. nastavení měřené veličiny na objemový průtok (měření hustoty a automatický převod veličiny) v průtokoměru
- I. odečítání hodnot tlaku v místech p_1 a p_4 a teplotu vody na teploměru (všechny odečítané údaje jsou zapsány do protokolu naměřených hodnot (tab. 6))
- J. zapnutí motoru čerpadla a nastavení jeho otáček na požadovanou hodnotu pomocí frekvenčního měniče na ovládacím panelu

- K. nastavení průtoku kapaliny škrtícím ventilem na předem požadovanou hodnotu
- L. vyčkání na ustálený stav odečítaných hodnot měřených veličin
- M. odečtení hodnot tlaku ze snímačů na místech p_1 , p_4
- N. opakování bodů K-M pro získání všech potřebných hodnot tlaků v závislosti na změně hodnoty průtoku kapaliny hydraulickým okruhem
- O. odstavení čerpadla a vypnutí celého okruhu

5 Zpracování naměřených dat

Pro získání výkonových charakteristik čerpadla je nutné výpočtem získat jednotlivé parametry p_2 , u_2 , p_3 a u_3 pro každou naměřenou hodnotu průtoku. Dosazením těchto parametrů do rovnice 27, resp. 28, lze jednoduše vypočítat měrnou energii, tedy dopravní výšku pro každý měřený bod. Z těchto bodů lze následně vykreslit potřebnou charakteristiku.

Rozměry geometrie okruhu a vnitřní průměry potrubí v místech měření lze najít v tabulce (tab. 5) nebo ve výkresu sestavy v technické dokumentaci (příloha 5). Hustota vody při teplotě 20 °C je 998,2 kg/m³. Naměřené hodnoty tlaků p_1 a p_4 pro různé průtoky jsou v protokolu naměřených hodnot (tab. 6).

místo v okruhu	vnitřní $\varnothing d_i$ trubky	Průtočná plocha S_i
1	100 mm	0,00785 m ²
2	66 mm	0,00342 m ²
3	66 mm	0,00342 m ²
4	81 mm	0,0063585 m ²

Tab.: 5 Vnitřní geometrie potrubí

PROTOKOL NAMĚŘENÝCH HODNOT

MĚŘENÉ ČERPADLO GRUNDFOS CRN32-3-A-F-A-E-HQGE

DATUM 23.03.2019

TEPLOTA 20,9 °C

TLAK 101,87 kPa

PRŮTOK - NASTAVÍM NA POŽADOVANOU HODNOTU

POMOCÍ ŠKRTIČÍHO VENTILU



ČÍSLO MĚŘENÍ	1	NASTAVĚNÉ OTÁČKY ČERPADLA	2930	TLAK p1 [Pa]	405000	TLAK p4 [Pa]	455200	ČÍSLO MĚŘENÍ	2	NASTAVĚNÉ OTÁČKY ČERPADLA	2930	TLAK p1 [Pa]	99800	TLAK p4 [Pa]	404000	ČÍSLO MĚŘENÍ	3	NASTAVĚNÉ OTÁČKY ČERPADLA	2930	TLAK p1 [Pa]	99700	TLAK p4 [Pa]	405300	ČÍSLO MĚŘENÍ	4	NASTAVĚNÉ OTÁČKY ČERPADLA	2930	TLAK p1 [Pa]	99300	TLAK p4 [Pa]	405200
POŘADÍ ODEČTU HODNOT	PRŮTOK V [m ³]							POŘADÍ ODEČTU HODNOT	PRŮTOK V [m ³]							POŘADÍ ODEČTU HODNOT	PRŮTOK V [m ³]						POŘADÍ ODEČTU HODNOT	PRŮTOK V [m ³]							
1	39	99500	405000	2930	405000	455200	455000	2	39	99800	404000	2930	99800	404000	458200	1	39	99700	405300	2930	99700	405300	455100	2	39	99300	405200	99300	405200		
2	36	97000	455200	2930	455200	495900	455000	3	36	96900	458200	2930	96800	458200	495900	2	36	96800	455100	2930	96800	455100	495900	3	36	97100	455000	97100	455000		
3	33	94600	496200	2930	496200	520800	495900	4	33	94100	495600	2930	94900	496000	520800	3	33	94900	496000	2930	94900	496000	520800	4	33	94800	495900	94800	495900		
4	30	89900	520600	2930	520600	550200	520800	5	30	89600	521100	2930	89200	520800	550300	4	30	89200	520800	2930	89200	520800	550300	5	30	89900	520800	89900	520800		
5	27	85690	550200	2930	550200	578300	550200	6	27	85500	549600	2930	86100	550300	578300	5	27	86100	550300	2930	86100	550300	578300	6	27	85710	550200	85710	550200		
6	24	80300	578300	2930	578300	595600	578300	7	24	85000	578500	2930	80500	579000	595400	6	24	80500	579000	2930	80500	579000	595400	7	24	80500	578300	80500	578300		
7	21	76900	595600	2930	595600	611000	595600	8	21	77200	596200	2930	77000	595400	611000	7	21	77000	595400	2930	77000	595400	611000	8	21	76800	595600	76800	595600		
8	24	79800	578400	2930	578400	600000	578400	9	24	79600	578600	2930	79800	577800	600000	8	24	79800	577800	2930	79800	577800	600000	9	24	79900	578400	79900	578400		
9	27	85690	549900	2930	549900	585000	549900	10	27	86100	551200	2930	85690	549800	585000	9	27	85690	549800	2930	85690	549800	585000	10	27	85800	549900	85800	549900		
10	30	90420	521000	2930	521000	560000	521000	11	30	90700	521400	2930	90500	521300	560000	10	30	90500	521300	2930	90500	521300	560000	11	30	90600	521300	90600	521300		
11	33	94600	493400	2930	493400	530000	493400	12	33	95000	493700	2930	94300	493100	530000	11	33	94300	493100	2930	94300	493100	530000	12	33	94200	493200	94200	493200		
12	36	97100	454300	2930	454300	500000	454300	13	36	97300	453900	2930	96900	452300	500000	12	36	96900	452300	2930	96900	452300	500000	13	36	97200	454000	97200	454000		
13	39	99600	406900	2930	406900	510000	406900	13	39	99500	406700	2930	99600	407200	510000	13	39	99600	407200	2930	99600	407200	510000	13	39	99700	407100	99700	407100		

Tab.: 6 Protokol naměřených hodnot

5.1 Výpočet

Následující ilustrační výpočet je uveden pro jmenovitou hodnotu průtoku čerpadla 30 m³/h.

Výpočet hodnot rychlostí proudění kapaliny u_1 a u_4 v místech měření lze získat pomocí rovnice kontinuity (rov. 17, 18).

$$u_1 = \frac{S_1}{Q_v} = \frac{0,00785}{0,00833} = 1,06 \text{ [m/s]} \quad (17)$$

$$u_4 = \frac{S_4}{Q_v} = \frac{0,006259}{0,00833} = 1,31 \text{ [m/s]} \quad (18)$$

Hodnoty rychlostí proudění u_2 a u_3 v místech sání a výtlačku čerpadla se vypočítají pomocí rovnic (rov. 19, 20) a dosazením vypočítaných hodnot u_1 a u_4 z rovnic (rov. 17, 18).

$$u_2 = \frac{S_1 \cdot u_1}{S_2} = \frac{0,00785 \cdot 1,06}{0,00342} = 2,44 \text{ [m/s]} \quad (19)$$

$$u_3 = \frac{S_4 \cdot u_4}{S_4} = \frac{0,006259 \cdot 1,31}{0,006259} = 2,44 \text{ [m/s]} \quad (20)$$

Před použitím upravených Bernoulliho rovnic (rov. 25, 26) je nutné zkontrolovat oblast proudění kapaliny pomocí následujících vztahů pro výpočet Reynoldsova čísla (rov. 20, 21).

$$Re_2 = \frac{u_2 \cdot L_{CH}}{\nu} = \frac{2,44 \cdot 0,066}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 168200 \quad (21)$$

$$Re_3 = \frac{u_3 \cdot L_{CH}}{\nu} = \frac{2,44 \cdot 0,066}{1,004 \cdot 10^{-6}} = 168200 \quad (22)$$

Hodnota oblasti turbulentního proudění v hladké kruhové trubce je definována $Re > 2300$. Hodnoty Re_2 , Re_3 splňují podmínku oblasti turbulentního proudění. Stejná hodnota Re_2 a Re_3 potvrzuje předpoklad, že rychlost kapaliny v místě sání a výtlačku musí být stejná kvůli stejnému průměru potrubí po obou stranách čerpadla.

Tlakové ztráty e_z lze vypočítat z rovnic (rov. 23, 24) dosazením rychlostí kapaliny u_2 tedy u_3 a součinitelů místních ztrát z tabulek (tab. 1,2,3) pro dané armatury.

$$e_{z_1} = (\xi) \frac{u_2^2}{2} = (0,12) \frac{2,44^2}{2} = 0,0676 \quad (23)$$

$$e_{z_2} = (\sum \xi) \frac{u_3^2}{2} = (0,05 + 0,17) \frac{2,44^2}{2} = 0,653 \quad (24)$$

Délkové ztráty lze zanedbat z důvodu krátkých vzdáleností mezi jednotlivými body měření.

Nyní lze dosadit všechny vypočítané hodnoty parametrů do upravené Bernoulliho rovnice (rov. 25), resp. (rov. 26) pro výpočet hodnot tlaků p_2 , resp. p_3 .

$$\begin{aligned} p_2 &= \left(\frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \right) \rho + p_1 + e_{z_1} \rho = \\ &= \left(\frac{2,44^2 - 1,06^2}{2} \right) 998,2 + 89900 + 998,2 = 87657 \text{ [Pa]} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} p_3 &= \left(\frac{u_4^2 - u_3^2}{2} \right) \rho + p_4 + e_{z_2} \rho + gh_4 \rho = \left(\frac{2,44^2 - 1,31^2}{2} \right) 998,2 + \\ &+ 520600 + 998,2 + 9,81 \cdot 998,2 = 521104 \text{ [Pa]} \end{aligned} \quad (26)$$

Upravením Bernoulliho rovnice (rov. 27) a dosazením vypočítaných hodnot u_2 , p_2 , u_3 a p_3 lze získat hodnotu měrné energie čerpadla.

$$\begin{aligned} Y &= \left(\frac{u_3^2 - u_2^2}{2} \right) + \left(\frac{p_3 - p_2}{\rho} \right) + g \cdot h_2 = \\ &= \left(\frac{2,44^2 - 2,44^2}{2} \right) + \left(\frac{521104 - 87657}{998,2} \right) + 9,81 \cdot 0,2 = 434,4 \text{ [J/kg]} \end{aligned} \quad (27)$$

Hodnota dopravní výšky čerpadla se získá dosazením měrné energie do vztahu (rov. 28).

$$H_c = \frac{Y}{g} = \frac{434,405}{9,81} = 44,28 \text{ [m]} \quad (28)$$

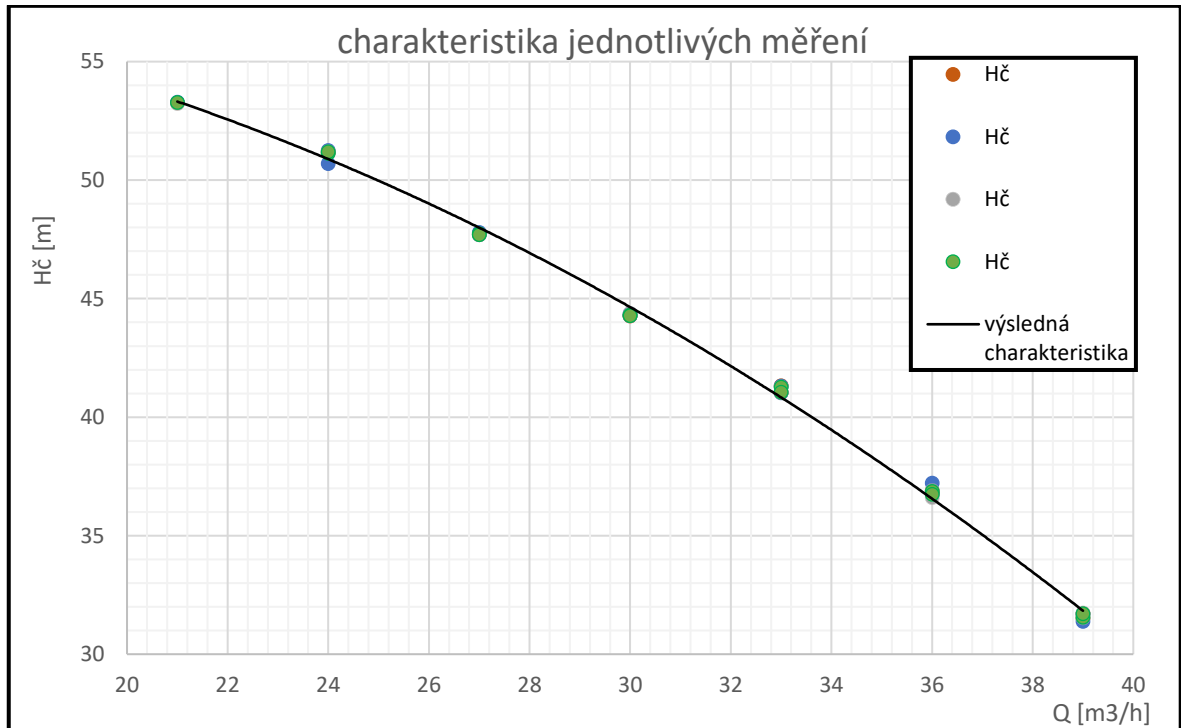
Celý předchozí výpočet je nutno zopakovat pro všechny naměřené hodnoty průtoku.

V následující tabulce (tab. 7) je souhrn výsledných hodnot parametrů při daném průtoku.

ČÍSLO MĚŘENÍ	1	NASTAVENÉ OTÁČKY ČERPADLA			2930
POŘADÍ ODEČTU HODNOT	ZADANÉ HODNOTY	VYPOČÍTANÉ HODNOTY			
	PRŮTOK Q [m ³ /h]	TLAK p2 [Pa]	TLAK p3 [Pa]	Hč [m]	Y [J/kg]
1	39	95511	404051	31,51	309,2
2	36	93611	454778	36,89	361,9
3	33	91763	496262	41,32	405,3
4	30	87567	521104	44,28	434,4
5	27	83813	551104	47,73	468,2
6	24	78831	579562	51,15	501,8
7	21	75791	597178	53,26	522,4
8	24	78331	579662	51,21	502,3
9	27	83813	550804	47,70	467,9
10	30	88087	521504	44,27	434,3
11	33	91763	493462	41,03	402,5
12	36	93711	453878	36,79	360,9
13	39	95611	405951	31,70	310,9

Tab.: 7 Tabulka vypočítaných hodnot jednoho měření

Výsledná výkonnostní charakteristika Hč – Q je proložena body ze čtyř opakovaných měření a je vykreslena v grafu (obr. 22). Na ose y je dopravní výška Hč a na ose x vynesena průtok Q.



Obr.: 22 Charakteristika vykreslená naměřených hodnot

6 Data z katalogu výrobce

Všechny provozní i maximální parametry zkoušené čerpací jednotky Grundfos CRN 32-3 jsou uvedeny v technické dokumentaci v příloze. Provozní výkonové křivky čerpadla jsou uváděné dle normy ISO 9906 (Rotačně dynamická čerpadla – zkoušení hydraulického výkonu). Tato norma specifikuje toleranční pásmo křivek ISO9906:2012 3B. Hodnoty v procentních bodech jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 8). [příloha 1]

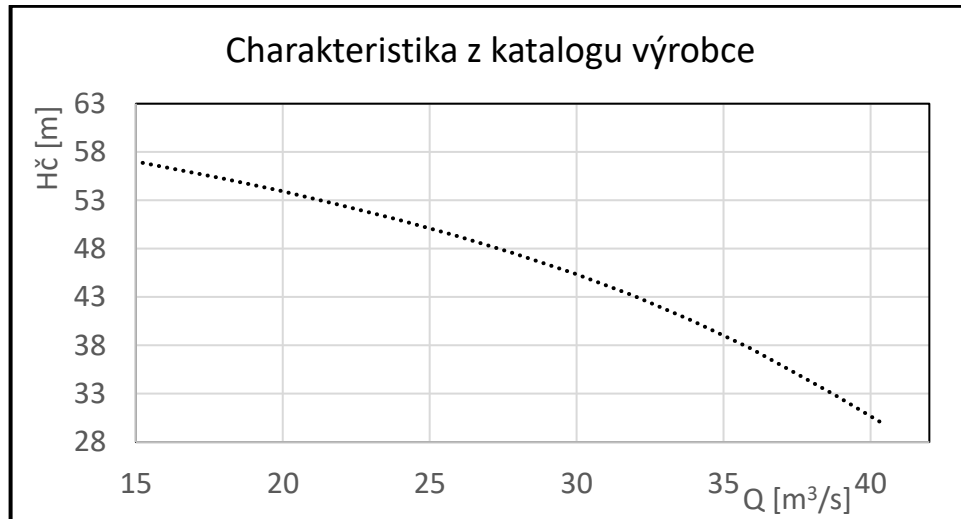
veličina	tolerance
Q	+/- 9 %
Hč	+/- 7 %
P2	0; +9 %
η	0; - 7 %

Tab.: 8 Toleranční pásmo podle normy ISO:9906:2012 3B [5]

Q [m ³ /h]	H [m]
40,3	30,1
38,8	32,9
37,4	35,2
35,9	37,7
33,9	40,6
31,9	43,2
29,9	45,5
27,8	47,6
25,9	49,4
23,9	51,0
21,9	52,6
19,9	54,0
18	55,2
16	56,4
15,2	56,9

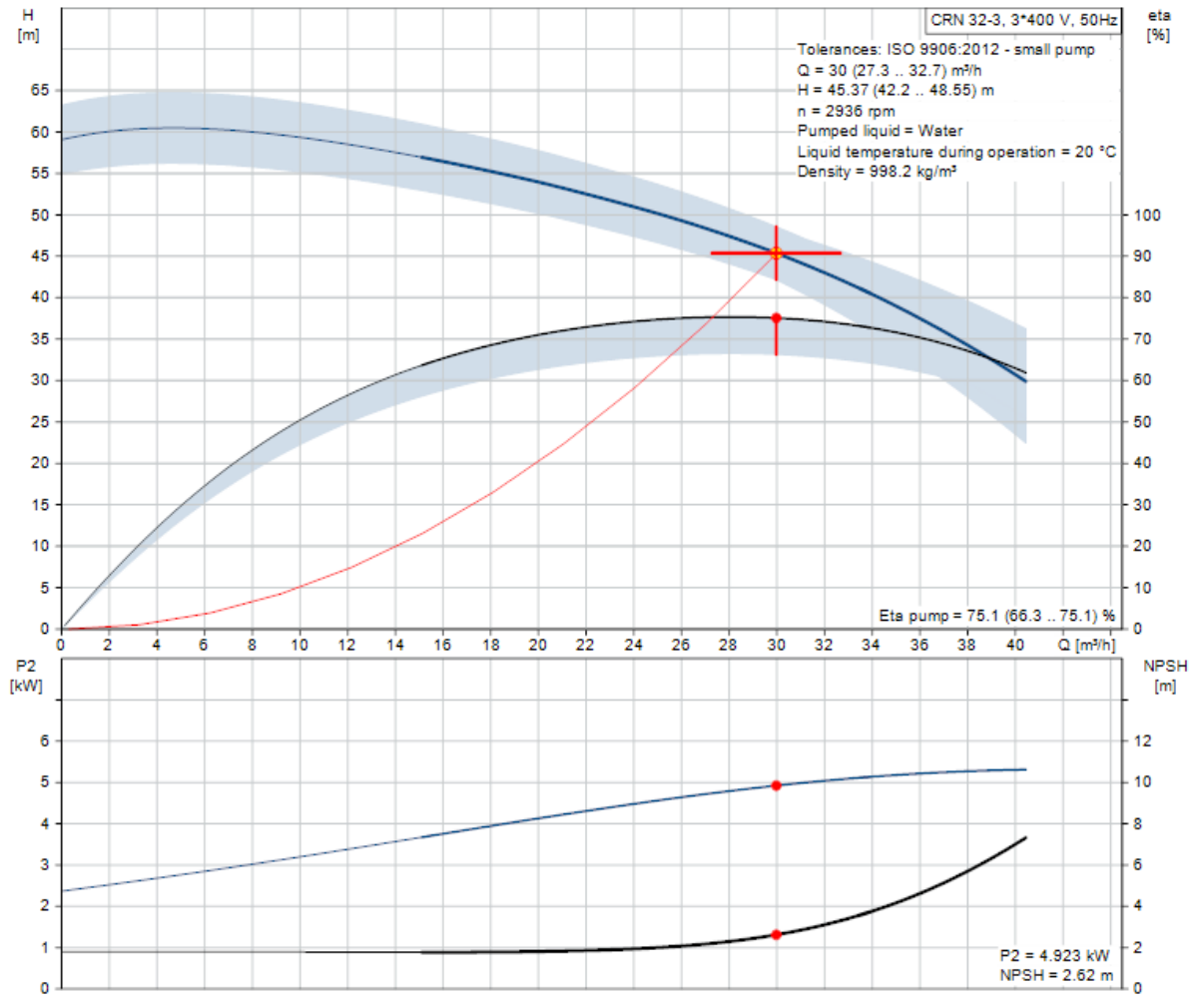
Tab.: 9 Katalogové hodnoty průtoku a dopravní výšky čerpadla [8]

Výkonové parametry čerpadla uvádí tabulka (tab. 9) pro otáčky čerpadla 2930 ot/min. Vykreslená výkonnostní charakteristika čerpadla z katalogových hodnot je v grafu (obr. 23).



Obr.: 23 Charakteristika z katalogu výrobce [8]

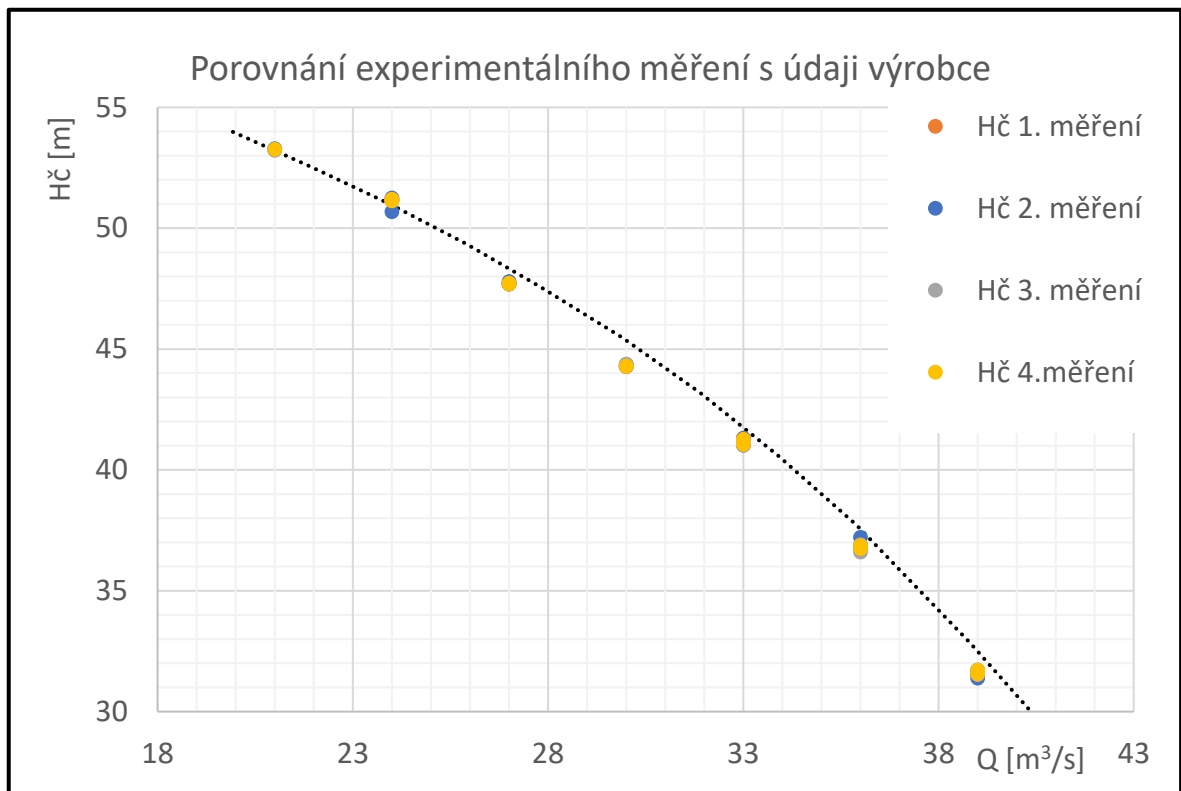
Všechny provozní křivky čerpadla CRN 32, zobrazení optimálního provozního bodu (bod s nejvyšší účinností) a tolerančních polí jednotlivých charakteristik podle normy ISO9906:2012 3B vykresluje graf níže (obr. 24).



Obr.: 24 Charakteristiky čerpadla z katalogu

7 Porovnání naměřených dat s katalogovými hodnotami výrobce.

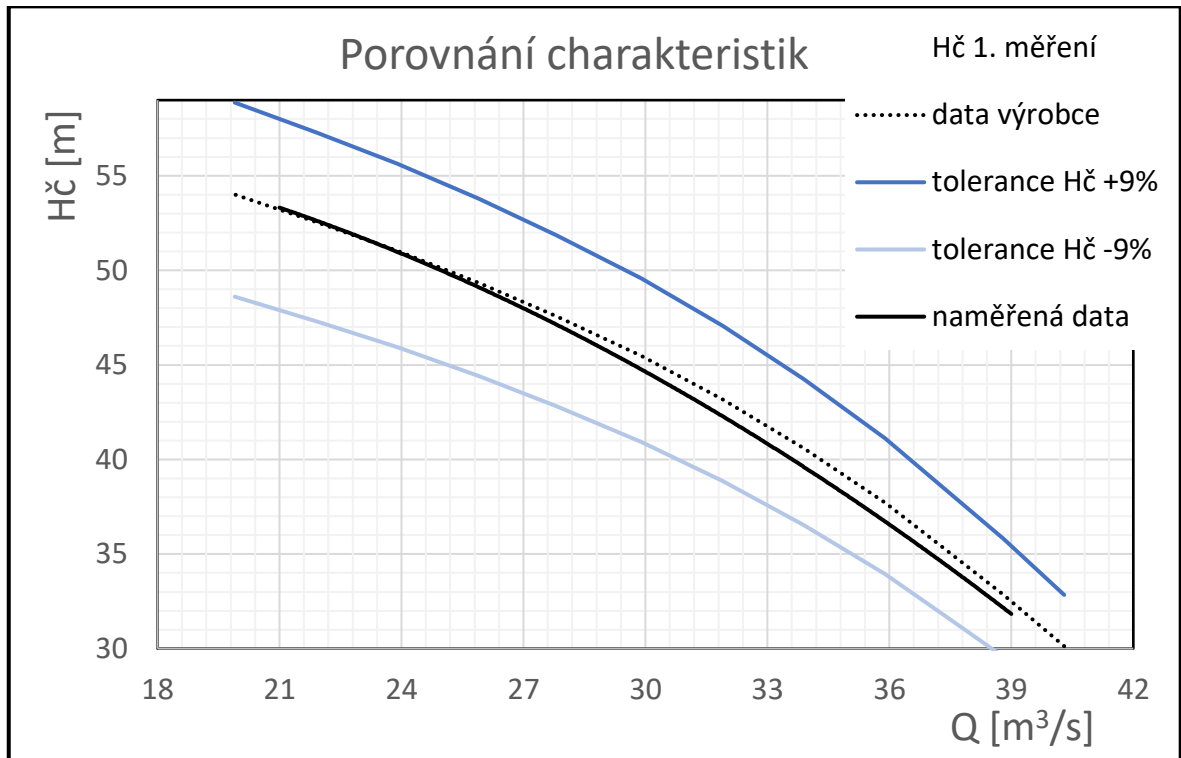
Hlavním cílem této práce je porovnání naměřených a vyhodnocených dat s katalogovými hodnotami výrobce. Barevné body v grafu (obr. 25) prezentují experimentálně získané hodnoty dopravní výšky jednotlivých měření. Tečkovaná černá křivka zobrazuje průběh charakteristiky udávané výrobcem.



Obr.: 25 Porovnání experimentálního měření s údaji výrobce

Na grafu (obr. 25) lze vidět velice podobné výsledky naměřených dat s údaji výrobce.

V grafu (obr. 26) je zaznamenáno porovnání výkonnostních charakteristik včetně tolerančních křivek, které jsou dány normou ISO9906:2012 3B.



Obr.: 26 Porovnání výkonnostních charakteristik

Při jmenovitém průtoku kapaliny 30 m³/h byla experimentálně stanovena hodnota dopravní výšky čerpadla $H_c = 44,27\text{m}$. Deklarovaná hodnota dopravní výšky výrobcem je $H_c = 45,5\text{m}$. Jedná se však o ideální charakteristiku čerpadla. Diference odchylek je odečtena z grafu (obr. 26) a činí 1,23 m. Tato velice malá odchylka může být způsobena více faktory. Uvedme například výpočtovou odchylku při zpracování experimentálního měření (zanedbání třecích ztrát v potrubí).

8 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo experimentální stanovení výkonnostní charakteristiky odstředivého čerpadla a porovnání výsledků s katalogovými hodnotami výrobce. Za tímto účelem byla navržena a postavena univerzální zkušební hydraulická trať tak, aby sloužila i pro testování jiných typů čerpadel v inline provedení. Stavba byla postavena a uvedena do provozu na základě vědomostí a doporučení výrobců použitých komponent. Na postaveném okruhu proběhlo měření čerpací jednotky. Z provedeného a zpracovaného měření byla vykreslena charakteristika čerpadla, která je následně porovnána s údaji od výrobce. Jako testovací čerpadlo bylo vybráno odstředivé čerpadlo CRN 32-3 od společnosti GRUNDFOS Sales s.r.o.

Začátek práce se věnuje rozdělení čerpadel podle různých kritérií, popisu a rozboru základních parametrů čerpadel a vlastnosti potrubní trasy. Obsahuje rozbor provozního bodu čerpadla a vliv potrubní charakteristiky na provoz čerpadel.

Experimentální část popisuje návrh a stavbu zkušební hydraulické tratě, aby splňovala všechny podmínky pro správné a přesné měření charakteristiky. Tato kapitola uvádí rozbor čerpadla a všech měřících zařízení a armatur nezbytných pro správnou funkci okruhu. Výpočtová část se zabývá fyzikálními vztahy a rovnicemi, které jsou nezbytné pro výpočet důležitých parametrů čerpadla.

Průběh měření je popsán jednotlivými body tak, aby bylo možné měření kdykoliv zopakovat. Všechny naměřené hodnoty jsou zaznamenány v protokolu měření.

Na závěr jsou výsledky z experimentálního měření zpracovány a výsledná výkonnostní charakteristika vykreslena do grafu Hč-Q jako funkce dopravní výšky a průtoku. Následně pak práce předkládá porovnání a vyhodnocení naměřené charakteristiky s výkonnostní křivou udávanou výrobcem čerpadla.

9 Seznam použité literatury

- [1] MELICHAR, Jan. *Úvod do čerpací techniky*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05056-9.
- [2] MELICHAR, Jan, Jaroslav BLÁHA a Karel BRADA. *Hydraulické stroje: konstrukce a provoz*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-010-2657-4.
- [3] BLÁHA, Jaroslav a BRADA Karel. *Příručka čerpací techniky*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01626-9.
- [4] JANALÍK, Jaroslav. *Hydrodynamika a hydrodynamické stroje* [online]. Ostrava: VŠB-TU, 2008 [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.vsbjeniq.euweb.cz/studium9.htm>.
- [5] *Příručka čerpací techniky* [online]. Olomouc: GRUNDFOS s.r.o., 2004 [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: [http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/assets/downloads/gcz/pump handbook_gcz.pdf](http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/assets/downloads/gcz/pump%20handbook_gcz.pdf).
- [6] *The centrifugal pump* [online]. Bjerringbro, Denmark: GRUNDFOS A/S, 2000 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: [http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/assets/downloads/gen/centrifugal pump_gen.pdf](http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/assets/downloads/gen/centrifugal%20pump_gen.pdf).
- [7] *CR, CRN, CRI* [online]. Bjerringbro, Denmark: GRUNDFOS A/S, 2000 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: https://net.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?from_suid=154998015252206244431134547159&pumpsystemid=504254960&qcid=525507312.
- [8] *Technická dokumentace CRN 32-3 A-F-A-E-HQQE* [online]. Olomouc: GRUNDFOS s.r.o., [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?from_suid=154998015252206244431134547159&pumpsystemid=504254960&qcid=545147257.
- [9] *Ruční klapka. Definox.com* [online]. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <https://definox.com/gb/products-EN/vannes-papillons-EN/vanne-papillon-EN.htm>.
- [10] *Průtokoměr* [online]. Praha: Endress+Hauser Czech s.r.o., 2010 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku/Proline-Promass-F300>.

- [11] *Snímač tlaku* [online]. Praha: Endress+Hauser Czech s.r.o., 2010 [cit. 2019-02-22].
Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-tlak/PMP55>.
- [12] *Teploměr* [online]. Praha: Endress+Hauser Czech s.r.o., 2010 [cit. 2019-02-22].
Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-teploty/Hygienicky-RTD-teplomer-iTHERM-TM411>.
- [13] *Technical Information, Proline Promass F 300* [online]. Praha: Endress+Hauser Czech s.r.o., 2010 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku/Proline-Promass-F300>.
- [14] *Technické informace, Cerabar M, PMC51, PMP51, PMP55* [online]. Praha: [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-tlak/PMP55>.
- [15] *Technické informace, iTherm TM411* [online]. Praha: Endress+Hauser Czech s.r.o., 2010 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-teploty/Hygienicky-RTD-teplomer-iTHERM-TM411>.

10 Seznam obrázků

Obr.: 1 Popis odstředivého čerpadla [4]	11 -
Obr.: 2 Schéma rozdělení čerpadel podle průtoku a dopravní výšky [5]	12 -
Obr.: 3 Rozdělení odstředivých čerpadel [5]	12 -
Obr.: 4 Popis řezu vícestupňovým čerpadlem [6].....	13 -
Obr.: 5 Paralelní zapojení čerpadel [5]	14 -
Obr.: 6 Sériové zapojení čerpadel [5]	14 -
Obr.: 7 Charakteristika $H - Q$ [5]	20 -
Obr.: 8 Charakteristika $\eta - Q$ [5]	20 -
Obr.: 9 Charakteristika $P_2 - Q$ [5].....	21 -
Obr.: 10 Charakteristika $\Delta NPSH - Q$ [5].....	21 -
Obr.: 11 Charakteristika potrubního systému [1].....	22 -
Obr.: 12 Charakteristika odstředivého čerpadla s vyznačeným provozním bodem [5] ..	22 -
Obr.: 13 P&ID – Piping and Instrument Diagram.....	23 -
Obr.: 14 CAD model hydraulického okruhu	26 -
Obr.: 15 Fotka hydraulického okruhu	27 -
Obr.: 16 Třístupňové odstředivé čerpadlo s motorem – CRN-32 [7].....	28 -
Obr.: 17 Tlakový snímač Cerabar PMP55 [11]	30 -
Obr.: 18 Měření průtoku Coriolisovým průtokoměrem [10].....	31 -
Obr.: 19 Průtokoměr Proline Promass F300 [10]	31 -
Obr.: 20 Odporový teploměr iTHERM TM41 [12].....	32 -
Obr.: 21 Motýlová klapka DPX [9].....	33 -
Obr.: 22 Charakteristika vykreslená naměřených hodnot.....	41 -
Obr.: 23 Charakteristika z katalogu výrobce [8]	43 -
Obr.: 24 Charakteristiky čerpadla z katalogu.....	44 -
Obr.: 25 Porovnání experimentálního měření s údaji výrobce	45 -
Obr.: 26 Porovnání výkonnostních charakteristik	46 -

11 Seznam tabulek

Tab.: 1 Součinitel místních ztrát – kónické zúžení [2].....	- 25 -
Tab.: 2 Součinitel místních ztrát – koleno 90° [2].....	- 25 -
Tab.: 3 Součinitel místních ztrát – kónické rozšíření [2].....	- 25 -
Tab.: 4 Provozní parametry čerpací jednotky Grundfos CRN-32 [8]	- 29 -
Tab.: 5 Vnitřní geometrie potrubí.....	- 36 -
Tab.: 6 Protokol naměřených hodnot.....	- 37 -
Tab.: 7 Tabulka vypočítaných hodnot jednoho měření.....	- 40 -
Tab.: 8 Toleranční pásmo podle normy ISO:9906:2012 3B [5].....	- 41 -
Tab.: 9 Katalogové hodnoty průtoku a dopravní výšky čerpadla [8].....	- 42 -

12 Seznam příloh

- [1] *Technická dokumentace CRN 32-3 A-F-A-E-HQQE* [online]. Olomouc: GRUNDFOS s.r.o., [cit. 2019-03-13]. Dostupné z: https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product.detail.html?from_suid=154998015252206244431134547159&pumpsystemid=504254960&qcid=545147257.
- [2] *Technical Information, Proline Promass F 300* [online]. Praha: Endress+Hauser Czech s.r.o., 2010 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-prutoku/Proline-Promass-F300>.
- [3] *Technické informace, Cerabar M, PMC51, PMP51, PMP55* [online]. Praha: [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-tlak/PMP55>.
- [4] *Technické informace, iTherm TM411* [online]. Praha: Endress+Hauser Czech s.r.o., 2010 [cit. 2019-02-22]. Dostupné z: <https://www.cz.endress.com/cs/Polni-instrumentace-sita-na-miru/mereni-teploty/Hygienicky-RTD-teplomer-iTHERM-TM411>.
- [5] *Technická dokumentace – výkres hydraulický okruh*