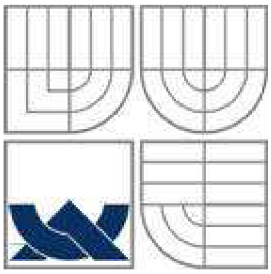
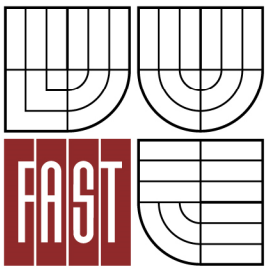


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV VODNÍCH STAVEB

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

NÁVRH ČERPADLA A POTRUBIA HYDRAULICKÉHO OKRUHU

DESIGN OF PUMP AND PIPES OF HYDRAULIC CIRCUIT

BAKALÁRSKA PRÁCA
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — JANA DAXNEROVÁ
AUTHOR

VEDÚCI PRÁCE — Ing. MICHAL ŽOUŽELA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
Pracoviště	Ústav vodních staveb

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Jana Daxnerová
Název	Návrh čerpadla a potrubí hydraulického okruhu
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Datum zadání bakalářské práce	10. 3. 2015
Datum odevzdání bakalářské práce	27. 5. 2016

V Brně dne 10. 3. 2015

.....
prof. Ing. Jan Šulc, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

[1] Brada, K., Hlavínek, P. Čerpadla ve vodním hospodářství, NOEL 2000 s.r.o., ISBN 80-86020-43-6,Brno 2004
[2] Jandora, J., Šulc J. Hydraulika. Modul 01. Brno: CERM Brno, 2006
[3]Cichra, R., Šnelerová, M., Žoužela, M. Inovace čerpací stanice Laboratoře vodohospodářského výzkumu. Prováděcí projekt strojně technologické části, LVV – FAST – VUT v Brně, 2008

Zásady pro vypracování

Doprava vody do hydraulických okruhů laboratoří je zpravidla zajišťována prostřednictvím odstředivých čerpadel, která jsou provozována ve velkém regulačním rozsahu průtoků. V rámci bakalářské práce bude navrženo sací a výtlačné potrubí odstředivého čerpadla hydraulického okruhu a určena jeho pracovní oblast při řízení měničem frekvence. Součástí práce bude řada tabelárních a grafických příloh.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Michal Žoužela, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom sacieho a výtlačného potrubia odstredivého čerpadla hydraulického okruhu a určením jeho pracovnej oblasti pri riadení meničom frekvencie. Člení sa na teoretickú časť a prílohy.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Čerpadlo, potrubie, hydraulický okruh, hydraulický merný žľab.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the design of the intake and discharge pipes of the centrifugal pump of the hydraulic circuit and determine the work area of the pump in managing of the frequency converters. The bachelor thesis is divided into theoretical part and annexes.

KEYWORDS

Pump, pipes, hydraulic circuit, hydraulic measuring flume.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA VŠKP

DAXNEROVÁ, Jana. *Návrh čerpadla a potrubia hydraulického okruhu.* Brno, 2016. 37 s., 27 s. príl. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedúci práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D.

PREHLÁSENIE O PÔVODE PRÁCE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu spracovala samostatne a že som uviedla všetky použité informačné zdroje.

V Brne dňa 27. 5. 2016

.....

podpis autora

Jana Daxnerová

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som chcela poďakovať vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Michalovi Žouželovi, Ph.D. za príkladnú metodickú a pedagogickú pomoc, cenné rady a pripomienky, ktoré mi pomohli pri spracovaní mojej bakalárskej práce. Osobitné poďakovanie patrí priateľovi Ing. et Ing. Vladimírovi Hamouzovi za všetky odborné konzultácie, prínosné rady a psychickú podporu.

OBSAH

1 ÚVOD 9

2 POUŽITÉ PODKLADY A PROGRAMY 10

3 POPIS HYDRAULICKÉHO OKRUHU 11

4 POPIS DOPRAVNEJ TRASY 12

5 STROJNÉ ZARIADENIE DOPRAVNEJ TRASY 14

5.1 ČERPADLO 14

5.2 POTRUBIE 17

5.3 ARMATÚRY 17

5.3.1 Indukčný prietokomer 17

5.3.2 Klapkový uzáver 18

5.3.3 Kompenzátor 20

6 CIELE PRÁCE 22

7 POSTUP RIEŠENIA 23

8 VÝPOČET STRÁT TRENÍM PO DĹŽKE 25

9 VÝPOČET MIESTNYCH STRÁT 28

10 VZNIK VTOKOVÝCH VÍROV 29

11 VÝSLEDKY A ICH ZHODNOTENIE 30

12 ZÁVER 32

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY A WEBOVÝCH STRÁNOK 33

ZOZNAM TABULIEK 34

ZOZNAM OBRÁZKOV 35

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV 36

ZOZNAM PRÍLOH 37

1 ÚVOD

Ústav vodného hospodárstva, hydrológie a hydrotechniky Univerzity poľnohospodárskych vied vo Viedni (BOKU Wien) má záujem o vybudovanie hydraulického okruhu.

O vytvorenie projektovej dokumentácie bolo požiadané Laboratórium vodohospodárskeho výskumu (LVV) Ústavu vodných stavieb Fakulty stavebnej VUT v Brne, ktoré zaisťuje vedeckovýskumnú a pedagogickú činnosť v oblasti hydrotechniky už od začiatku 20. storočia, kedy bolo postavené.

Objednávateľ požaduje vybudovanie hydraulického okruhu za účelom hydrotechnického výskumu. Hydraulický okruh pozostáva z plastových nadzemných nádrží, z odstredivého čerpadla, nerezového potrubia, preskleného merného hydraulického žľabu, ktorý umožňuje pozorovanie transportu sedimentov. Ďalšími požiadavkami sú účinné rozmery žľabu Š x V x D (1,0 x 1,0 x 12,5) m, minimalizácia objemu nádrží, možnosť, v prípade potreby, premiestniť hydraulický okruh a rozpätie prietokov (1-200) l/s. Takéto rozpätie možno zabezpečiť dvomi čerpadlami, v prípade použitia jedného čerpadla je nutné vybudovať na potrubí bypass pre malé prietoky. Nakoľko dosahujú indukčné prietokomery najlepšiu presnosť v rozmedzí rýchlostí (1-10) m/s je potrebné inštalovať indukčný prietokomer aj na bypasse, kvôli možnosti merania malých prietokov. Presné rozhranie prietokov, kedy voda potečie hlavnou traťou a kedy bypassom bude určené po zostavení hydraulického okruhu.

Cieľom bakalárskej práce je posúdenie návrhu sacieho a výtlačného potrubia odstredivého čerpadla hydraulického okruhu a určenie jeho pracovnej oblasti pri riadení meničom frekvencie. Tento návrh bude súčasťou komplexného projektu návrhu hydraulického okruhu pre univerzitu BOKU Wien.

Predložená bakalárska práca sa člení na teoretickú časť, v ktorej je popísaný hydraulický okruh, dopravná trasa a strojné zariadenie inštalované po dĺžke dopravnej trasy, ciele práce, postup riešenia a zhodnotenie práce. Prílohovú časť tvorí schéma čerpadla a potrubia a hydrotechnické výpočty. Súčasťou prílohovej časti je aj výkres hydraulického okruhu, ktorý slúžil ako podklad a charakteristika čerpadla ako výstup programu Xylect.

2 POUŽITÉ PODKLADY A PROGRAMY

Hydrotechnické výpočty boli spracované v programe Microsoft Office Excel. Podkladom pre výpočet bol výkres hydraulického okruhu a z neho vytvorená schéma, ktorá poskytla podklad pre prehľadné a jednoduché určenie miestnych strát na jednotlivých singularitách a strát trením po dĺžke. Vo výkrese je jasne viditeľné umiestnenie jednotlivých singularít a potrebné dĺžky jednotlivých potrubí. Ďalej boli ako podklad použité katalógové listy jednotlivých armatúr použitých v navrhnutom hydraulickom okruhu

Na vytvorenie schémy čerpadla a potrubia bol použitý program AutoCAD 2016 spoločnosti Autodesk, Inc.

Vhodné čerpadlo bolo vybrané pomocou programu Xylect. Na základe vstupných parametrov, čo sú maximálny prietok 200 l/s a jemu odpovedajúce stratová výška a maximálna statická výška vybral program Xylect niekoľko vyhovujúcich čerpadiel.

3 POPIS HYDRAULICKÉHO OKRUHU

Objednávateľ požaduje vybudovanie hydraulického okruhu spĺňajúceho mnohé kritéria, predovšetkým možnosť čerpať prietoky v rozsahu (1-200) l/s.

Hydraulický okruh je navrhnutý ako rozoberateľný s vlastnými nadzemnými polypropylénovými nádržami. Tri nádrže majú výšku 1,68 m potrebnú pre zabezpečenie minimálnej hladiny a sú položené priamo na podlahe. V snahe minimalizovať objem nádrží sú zvyšné tri nádrže navrhnuté s nižšou výškou 0,88 m a položené na pozinkovanej oceľovej nosnej konštrukcii. Rovnako tak nosná konštrukcia merného hydraulického žľabu, nosná konštrukcia galérie, samotná galéria nachádzajúca sa nad nádržami a schody vedúce na galériu sú z pozinkovanej konštrukčnej oceli. Celý hydraulický okruh má rozmery Š x V x D (3,7 x 4,1 x 18,0) m.

Účinné rozmery merného hydraulického žľabu sú Š x V x D (1,0 x 1,0 x 12,5) m. Dno žľabu je vyrobené z nerezovej oceli a steny z číreho lepeného skla hrúbky 19 mm, čo umožňuje pozorovanie transportu sedimentov. Prítok vody do žľabu a rovnako aj odtok zo žľabu do nádrže sú z nerezovej oceli a vybavené usmerňovačom prúdu.

Hydraulický okruh doplňuje niekoľko meracích zariadení, ktoré poskytujú informácie o základných fyzikálnych parametroch. Na meranie prietokov potrubím slúžia dva indukčné prietokomery značky Krohne, jeden umiestnený na hlavnej trase výtlačného potrubia a druhý na bypasse. Nad merným žľabom sú nainštalované 2 ultrazvukové hladinomery rovnako značky Krohne. Okrem toho je meraná teplota vody a okolitého prostredia. Úroveň hladiny vody v žľabe sa nastavuje na odtoku pomocou regulačnej armatúry, ktorou je prelievané stavidlo s elektronickým ovládaním. Ovládanie hydraulického okruhu je buď manuálne alebo automatické – ovládanie prietoku a úrovne hladiny s pomocou PID[1] regulácie.

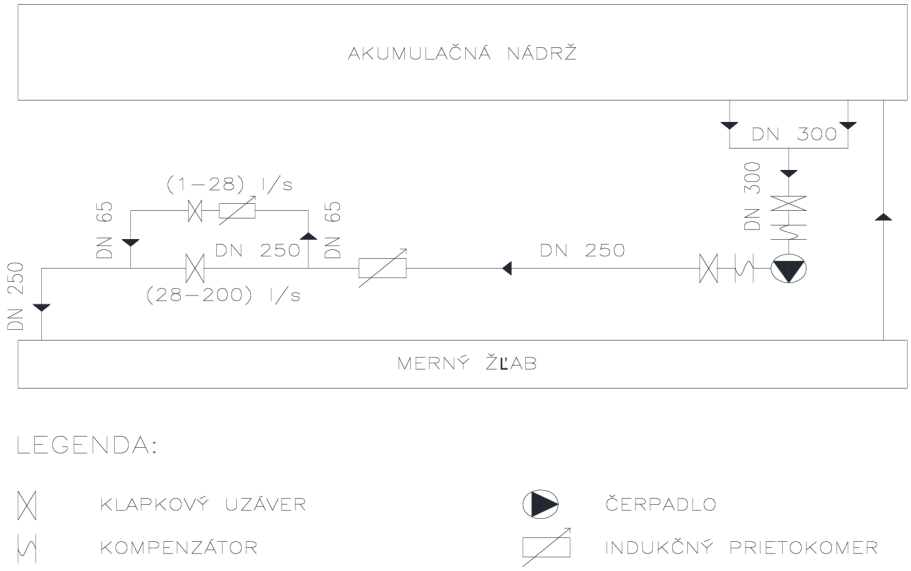
Výkres hydraulického okruhu je súčasťou tejto bakalárskej práce a možno ho nájsť v prílohovej časti pod označením **Príloha č. 1** Výkres hydraulického okruhu. Odstredivé čerpadlo, potrubie aj všetky použité armatúry sú podrobne popísané v kapitole 5 Strojné zariadenie dopravnej trasy.

[1] PID regulácia je softwarová aplikácia skladajúca sa z proporcionálnej, integračnej a derivačnej zložky a jej účelom je minimalizovať regulačnú odchýlku medzi žiadanou a aktuálnou hodnotou.

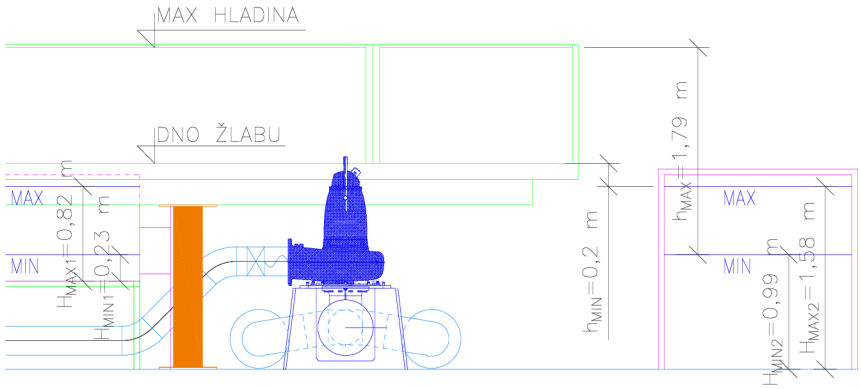
4 POPIS DOPRAVNEJ TRASY

Pre výpočet strát energie bolo nevyhnutné zostaviť schému hydraulického okruhu (**Obr. 4.1**), ktorá zobrazuje dopravnú trasu. Tá začína napojením sacieho potrubia na akumulačnú nádrž. Z dôvodu získania dostatočnej sacej výšku, ktorá zabráni vzniku vtokových vírov je nutné vtokové potrubie rozdeliť do dvoch tratí svetlosti 300 mm. Týmto riešením dôjde k poklesu rýchlosti na vtoku do oboch potrubí a je tak možné znížiť minimálnu hĺbku ponoru vtoku. Tieto potrubia sa už po pomerne krátkom úseku spoja do jedného potrubia priemeru 300 mm, ktoré pokračuje až k čerpadlu. Z dôvodu zabránenia šírenia vibrácií z čerpadla na zvyšok okruhu sú na vtoku do čerpadla a rovnako tak aj na výtoku z neho osadené gumené kompenzátory. Po prechode čerpadlom pokračuje čerpaná voda výtlačným potrubím svetlosti 250 mm. Na základe čerpaného množstva sa rozhodne, či bude pokračovať ďalej hlavnou trasou svetlosti 250 mm priamo do žľabu alebo, v prípade čerpania malého prietoku, prejde bypassom svetlosti 65 mm. Z merného žľabu sa voda vracia naspäť do akumulačnej nádrže.

Pre určenie maximálnej a minimálnej statickej výšky bolo potrebné vytvoriť výškovú schému hydraulického okruhu (**Obr. 4.2**), ktorá názorne zobrazuje úrovne hladín použité pri výpočte.



Obr. 4.1 *Schéma hydraulického okruhu*



Obr. 4.2 *Výšková schéma hydraulického okruhu*

5 STROJNÉ ZARIADENIE DOPRAVNEJ TRASY

V tejto kapitole budú popísané jednotlivé prvky inštalované po celej dĺžke dopravnej trasy, ktorými sú sacie a výtlačné potrubie, odstredivé čerpadlo, klapkové uzávery ovládané servopohonmi, indukčné prietokomery a kompenzátory.

5.1 ČERPADLO

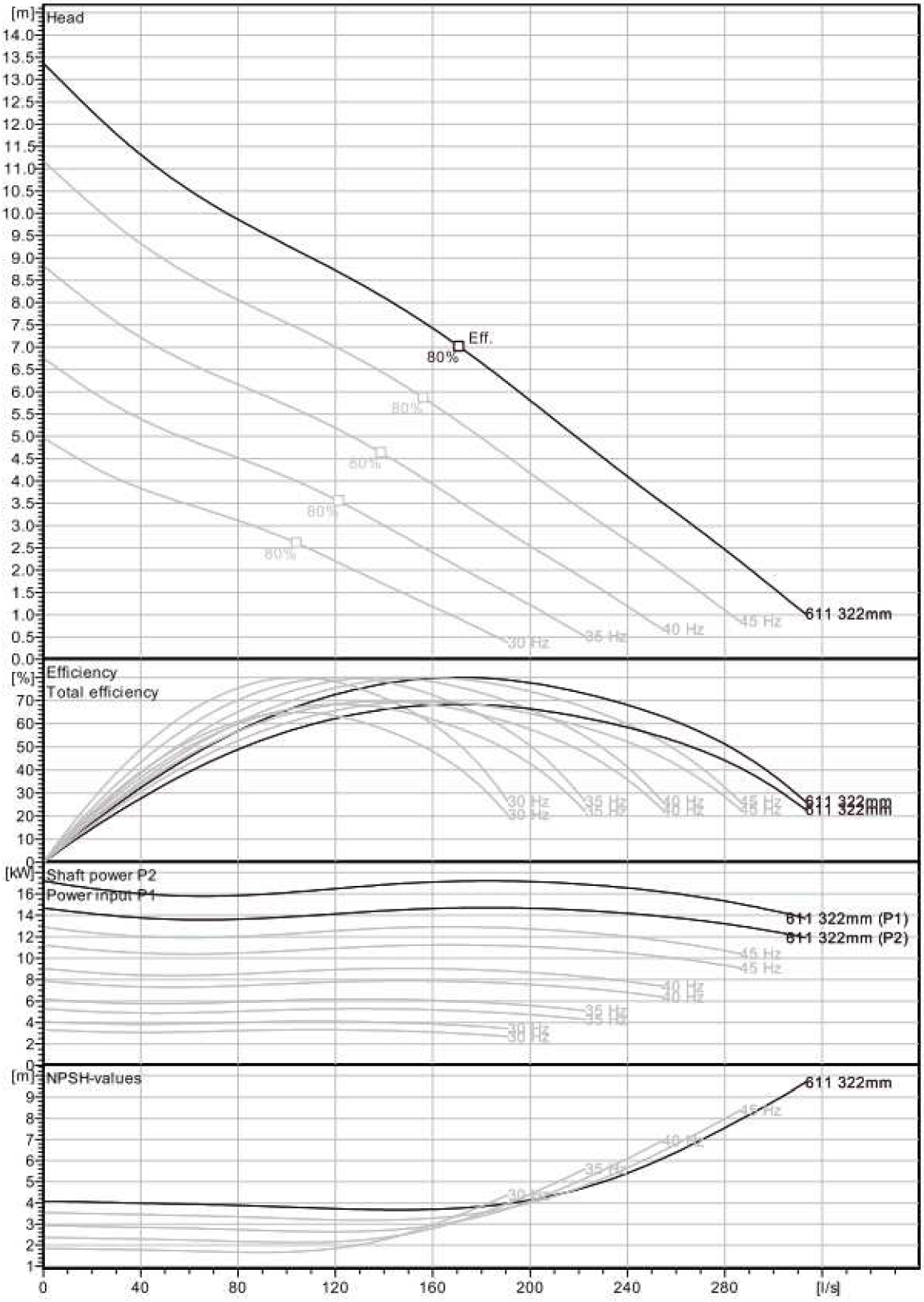
„Srdcom“ hydraulického okruhu bude čerpadlo Flygt NT 3171 LT (**Obr. 5.1**) s dvomi lopatkami a s veľkosťou obežného kola 322 mm. Na čerpadlo bude napojené sacie potrubie svetlosti 300 mm a výtlačné potrubie svetlosti 250 mm. Čerpadlo bude postavené na podstavci výšky 700 mm.

Parametre motoru:

Typ:	N 3171.181 25-18-6BB-W
Počet kusov:	1 ks
Frekvencia:	50 Hz
Fázy:	3
Menovité napätie:	400 V
Menovitý výkon:	15 kW
Menovitý prúd:	30 A
Otáčky:	965 ot/min

Obr. 5.1 *Čerpadlo Flygt NT 3171 LT (informatívne zobrazenie, ktoré nemusí úplne presne zodpovedať navrhnutému typu)* [8]

Na nižšie priloženom obrázku (**Obr. 5.2**) je znázornená charakteristika čerpadla ako výstup programu Xylect. Vo všetkých grafoch sú uvedené krivky pre riadiace frekvencie motoru 30, 35, 40, 45 a 50 Hz. Na prvom grafe je zobrazená závislosť čerpaného prietoku na dopravnej výške, ktorá bola hlavným kritériom pri výbere čerpadla. Na ďalšom grafe je znázornená závislosť hydraulickej účinnosti a celkovej účinnosti na čerpanom prietoku. Pri frekvencii 50 Hz dosahuje čerpadlo najvyššiu účinnosť pri čerpaní (160-180) l/s. Graf č. 3 prezentuje príkon (P1) a výkon na hriadeli (P2) v závislosti na čerpanom prietoku. Posledný graf zobrazuje hodnoty NPSH, čo predstavuje pokles tlakovej energie v sacej časti čerpadla daný výškou vodného stĺpca.



Obr. 5.2 *Charakteristika čerpadla* [8]

5.2 POTRUBIE

Hydraulický okruh tvorí bezšvové potrubie z chróm-niklovej nerezovej oceli 1.4301. Výhodou použitia nerezového potrubia je vysoká životnosť a nízke nároky na údržbu. Sú použité 3 svetlosti potrubia, sacie potrubie svetlosti 300 mm s hrúbkou steny 3 mm, výtlačné potrubie svetlosti 250 mm rovnako s hrúbkou steny 3 mm a bypass svetlosti 65 mm s hrúbkou steny 2 mm. Potrubie sa bude spájať prírubami, medzi ktoré sa vkladá gumové tesnenie. Na potrubie sa najskôr nasadí točivá prevlečná príruba a potom sa na koniec potrubia privarí lemový krúžok. Pre výpočet strát trením po dĺžke je uvažovaná drsnosť stien potrubia 0,3 mm, čo odpovedá mierne zhrdzavenému, ľahko inkrustovanému potrubiu. Táto hodnota je uvažovaná s ohľadom na budúce opotrebenie potrubia a tým zabezpečenie požadovanej prietočnej kapacity aj po rokoch používania.

Neodmysliteľnou súčasťou potrubia sú armatúry nutné k plnohodnotnej prevádzke hydraulického okruhu. Jedná sa o indukčné prietokomery slúžiace na stanovenie aktuálneho prietočného množstva, klapkové uzávery ovládané servopohonmi a kompenzátory brániace prenosu vibrácií z čerpadla na zvyšok systému.

5.3 ARMATÚRY

V tejto kapitole sú popísané jednotlivé armatúry inštalované po dĺžke sacieho a výtlačného potrubia. Pri každej z nich sú uvedené prevádzkové charakteristiky – maximálny tlak, rozpätie teplôt prúdiacej kvapaliny, prípadne prevádzková teplota a teplota prostredia.

5.3.1 INDUKČNÝ PRIETOKOMER

Možnosť zmeny hodnoty prietoku závisí na zmene frekvencie otáčania rotoru čerpadla s PID regulačnou spätnou väzbou na skutočné prietočné množstvo pred merným zariadením. Aktuálne množstvo bude merané pomocou indukčných

prietokomerov (**Obr. 5.3**), ktoré budú nainštalované na hlavnej trati a rovnako tak aj na bypasse.

Prevádzkové charakteristiky:

Maximálny tlak:	DN 65:	16 bar
	DN 250:	10 bar
Teplota kvapaliny:	+0,1 až +50°C	
Prevádzková teplota:	-5 až +70°C	
Teplota prostredia:	-40 až+65°C	

Obr. 5.3 *Indukčný prietokomer Krohne (ilustračný obrázok)* [9]

5.3.2 KLAPKOVÝ UZÁVER

V hydraulickom okruhu sú použité celkovo 4 klapkové uzávery. Dva klapkové uzávery sú použité z dôvodu údržby a možnej výmeny alebo revízie čerpadla. Zvyšné dva klapkové uzávery sú použité kvôli možnosti voľby trati, či už hlavným potrubím s rozsahom prietokov (28-200) l/s alebo bypassom s rozsahom prietokov (1-28) l/s. Pre dosiahnutie minimálnych prietokov je nutné využiť klapky na priškrtenie prietoku v zmysle výsledkov, ktoré sú ďalej uvedené.

Prevádzkové charakteristiky:

Maximálny tlak: 10 bar

Maximálna teplota: +130°C

Obr. 5.4 *Klapkový uzáver Proxima L32.5J typ WAFER* [6]

Klapkové uzávery je možné ovládať diaľkovo vďaka nainštalovaným servopohonom Regada. Tieto servopohony sú určené pre prevádzku „Otvor – Zatvor“, kde je od servopohonu požadované poháňať armatúru po celú dobu jej zdvihu z plne otvorenej polohy do plne zatvorenej polohy alebo naopak. V prípade regulácie prietoku klapkami je preto nutné použiť buď ručné ovládanie alebo v automatickom režime nastaviť kratšiu zatváraciu dobu ako je doba potrebná pre plné uzatvorenie.

Prevádzkové charakteristiky:

Teplota prostredia: -25 až+55°C

Obr. 5.5 *Elektrický servopohon jednootáčkový SP 2.4* [10]

5.3.3 KOMPENZÁTOR

Z dôvodu zabránenia prenosu vibrácií z čerpadla na zvyšok systému sú priamo na príruby čerpadla namontované gumové kompenzátory. Okrem eliminácií vibrácií taktiež tlmia hluk, pohlcujú energiu prípadného hydraulického rázu, kompenzujú tepelnú rozťažnosť potrubia a eliminujú všetky druhy posuvov – osové, bočné, uhlové a ich kombinácie. Skladajú sa z mechu, vyrobeného z rôznych typov elastomérov, vystuženého syntetickým kordom a oceľových prírub. Budú použité prírubové kompenzátory BRA.F8.520 s telom z etylén-propylénovej gumy (EPDM) a prírubami z nerezovej oceli AISI 316. Pre prírubové kompenzátory v systémoch s čerpadlami sa odporúča použitie regulačných tyčí BRA.F8.KIT z pozinkovanej uhlíkovej oceli.

Prevádzkové charakteristiky:

Maximálny tlak:	16 bar
Minimálny sací tlak:	0,7 bar absolútny
Prevádzková teplota:	-10 až +100°C

Obr. 5.6 *Gumový kompenzátor BRA.F8.500* [7]

6 CIELE PRÁCE

Medzi hlavné ciele práce možno zaradiť:

- Nakreslenie schémy hydraulického okruhu.
- Nakreslenie schémy potrubia a čerpadla.
- Určenie súčiniteľov miestnych strát použitých singularít.
- Výpočet strát miestnych a trením po dĺžke.
- Určenie minimálnej a maximálnej hladiny vody v nádržiach vzhľadom na zabránenie vzniku vtokových výrov.
- Určenie minimálnej a maximálnej statickej výšky.
- Určenie *Q/h* charakteristiky potrubia.
- Určenie *Q/h* charakteristiky čerpadla.
- Určenie pracovnej oblasti čerpadla.

7 POSTUP RIEŠENIA

Na základe podkladov poskytnutých vedúcim práce Ing. Michalom Žouželom, Ph.D., čo boli požiadavky investora a výkres hydraulického okruhu, bola zhotovená schéma hydraulického okruhu, ktorá jasne zobrazuje umiestnenie jednotlivých singularít a potrebné dĺžky jednotlivých potrubí. Na základe týchto informácii bol vytvorený program na výpočet veľkosti strát miestnych a trením po dĺžke, ktorý poskytuje spätnú väzbu na základe zmeny vstupných parametrov. Úpravou údajov v liste „Vstupné parametre“ sa automaticky prepočítajú výsledky. Je možné meniť teplotu vodu v závislosti na vonkajších podmienkach, drsnosť potrubia, prípadne meniť dĺžku a dimenzie jednotlivých úsekov. Toto umožňuje získať čo najpresnejšie výsledky, ktoré budú čo najviac odpovedať realite.

Hydraulický okruh pozostáva z polypropylénových nadzemných nádrží, pri návrhu objemu ktorých bola snaha o minimalizáciu ich objemu pri súčasnom zabezpečení potrebnej minimálnej hladiny v nádrži, z odstredivého čerpadla Flygt, nerezového potrubia a merného hydraulického žľabu. Účinné rozmery hydraulického žľabu sú Š x V x D (1,0 x 1,0 x 12,5) m, pričom žľab je vyrobený z nerezovej oceli so stenami z číreho lepeného skla, čo umožňuje pozorovanie transportu sedimentov. Celý systém sa dá, v prípade potreby, rozobrať a premiestniť. Rozpätie požadovaných prietokov je (1-200) l/s. Z dôvodu veľkého rozpätia prietokov, ktoré pokrýva len jedno čerpadlo, bolo nevyhnutné navrhnúť dve trate potrubia. Hlavná trať svetlosti 250 mm je použitá v prípade čerpania veľkých prietokov (30-200) l/s. Na hlavnej trati je pre možnosť merania prietokov umiestnený indukčný prietokomer svetlosti 250 mm. V prípade čerpania malých prietokov (1-30) l/s je voda čerpaná do žľabu cez bypass svetlosti 65 mm, kde dôjde k vysokým stratám energie, ktoré umožnia prevádzkovať čerpadlo pri minimálnych prevádzkových otáčkach motoru. Kvôli zachovaniu spoľahlivosti a vysokej presnosti merania prietokov je indukčný prietokomer umiestnený aj na bypasse.

Minimálna statická výška h_{MIN} je hodnota určená vzdialenosťou medzi maximálnou hladinou v akumulačnej nádrži a dnom prázdneho žľabu. Maximálna statická výška h_{MAX} je hodnota určená vzdialenosťou medzi minimálnou hladinou

v akumulačnej nádrži a hornou hranou plného žľabu. Maximálna hladina v akumulačnej nádrži bola dohodou stanovená na 10 cm pod hornou hranou akumulačnej nádrže, čomu odpovedá výšková kóta 0,99 m nad úrovňou podlahy. Minimálna hladina v akumulačnej nádrži bola určená z rozdielu objemu plnej akumulačnej nádrže a objemu plného merného hydraulické žľabu vrátane potrubí. Súčasne musel byť splnený minimálny ponor sacieho potrubia, aby sa predišlo vzniku vtokových vírov.

Dĺžky singularít nie sú započítavané do strát trením po dĺžke, pretože straty trením po dĺžke, ktoré vznikajú v priestore singularít sú súčasťou súčiniteľa miestnych strát. Veľkosť energetických strát závisí na veľkosti prietoku. So zvyšujúcim sa prietokom sa zvyšujú aj straty trením po dĺžke i miestne straty.

Na základe vypočítaných strát energie a minimálnej a maximálnej statickej výšky bolo možné zistiť závislosť dopravnej výšky na prietoku. Táto závislosť poslúžila pre výber vhodného čerpadla, ktoré bude schopné dopraviť dané množstvo vody do príslušnej výšky.

8 VÝPOČET STRÁT TRENÍM PO DĹŽKE

Základným vzťahom pre výpočet stratovej výšky trením po dĺžke h_t v potrubí pri rovnomernom prúdení kvapaliny je **Darcy-Weisbachova závislosť**:

$$h_t = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}, \tag{8.1}$$

kde: h_t ..... stratová výška trením po dĺžke [m],

λ .....súčiniteľ straty trením po dĺžke (odporový súčiniteľ) [-],

L ..... dĺžka potrubia [m],

D .....priemer (svetlosť) potrubia [m],

v .....prierezová rýchlosť [m/s],

g ..... gravitačné zrýchlenie [g ≐ 9,81 m/s^2].

Prierezové plochy potrubí sú dané príslušnými svetlosťami potrubí DN65, DN250 a DN300. Prierezová rýchlosť bola stanovená pomocou **rovnice kontinuity** (spojitosti) nestlačiteľnej kvapaliny v jednodimenzionálnom ustálenom prúdení, ktorá má tvar:

$$Q = v \cdot S, \tag{8.2}$$

kde: Q .....prietok [m^3/s],

v ..... prierezová rýchlosť [m/s],

S ..... prierezová plocha príslušného potrubia [m^2].

Pre určenie straty trením po dĺžke je najdôležitejšie zistenie súčiniteľa straty trením λ, ktorý závisí na drsnosti potrubia, jeho priemere a hodnote **Reynoldsovho kritéria**, bezrozmernej veličiny charakterizujúcej rozhranie medzi laminárnym a turbulentným prúdením:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}, \tag{8.3}$$

kde: Re .....Reynoldsovo kritérium [-],

v .....prierezová rýchlosť [m/s],

D .....priemer (svetlosť) potrubia [m],

ν ..... kinematická viskozita [m^2/s].

Kinematická viskozita je závislá na teplote kvapaliny T. Pre výpočet kinematickej viskozity vody je použitý empirický vzorec:

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 + 0{,}0337 \cdot T + 0{,}000221 \cdot T^2}, \tag{8.4}$$

kde: ν ..... kinematická viskozita pri teplote T°C [m^2/s],

ν_0 ..... kinematická viskozita pri teplote 0°C [m^2/s],

T .....teplota kvapaliny [°C].

Rozsah veľkosti Reynoldsovho kritéria sa pohybuje v závislosti na rýchlosti prúdenia vody pre príslušnú svetlosť potrubia rádovo od tisícok až po milióny. Z tohto dôvodu je nutné voliť dvojaký spôsob výpočtu. Pre Reynoldsovo kritérium menšie ako 10^5 je uvažované hydraulicky hladké potrubie v turbulentnom režime a odporový súčiniteľ λ počítaný **podľa Blasia**:

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{Re^{0{,}25}}, \tag{8.5}$$

kde: λ ..... odporový súčiniteľ [-],

Re .....Reynoldsovo kritérium [-].

Pre Reynoldsovo kritérium väčšie ako 10^5 je pre výpočet odporového súčiniteľa λ použitá **Colebrook-Whiteova rovnica**:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\,log\left(\frac{2{,}51}{Re\sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta}{3{,}7D}\right), \tag{8.6}$$

kde: λ .....odporový súčiniteľ [-],

Re ..... Reynoldsovo kritérium [-],

Δ ..... drsnosť potrubia [v našom prípade, pri použití nerezového potrubia bola uvažovaná hodnota $\Delta = 0{,}0003$ m],

D ..... priemer (svetlosť) potrubia [m].

9 VÝPOČET MIESTNYCH STRÁT

Energetické miestne straty vznikajú pri deformácii rýchlostného poľa. Miesta, kde dochádza k deformáciám rýchlostného poľa sú nazývané singularity. V tomto mieste dochádza k zmene rýchlosti prúdu, zmene smeru prúdenia alebo k jeho deleniu, prípadne spájaniu. Veľkosť stratovej výšky h_m závisí na súčiniteli miestnych strát ξ. Pre výpočet stratovej výšky bol použitý **Weisbachov vzťah**:

$$h_m = \xi \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}, \tag{9.1}$$

kde: h_m .....stratová výška [m],

ξ .....súčiniteľ miestnych strát [-],

v ..... prierezová rýchlosť [m/s],

g ..... gravitačné zrýchlenie [g ≐ 9,81 m/s^2].

Hodnoty jednotlivých súčiniteľov miestnych strát ξ boli prevzaté z rôznych zdrojov uvedených v tabuľke:

Tabuľka 9.1 *Hodnoty súčiniteľov miestnych strát ξ*

Singularita	**ξ [-]**	**Zdroj**
vtok	0.50	[1], tab. 7.7
koleno 90°	0.17	[1], tab. 7.8
koleno 45°	0.09	[1], vzorec 7.53
koleno čerpadla	0.23	[1], tab. 7.6 (ξ kolena + ξ zúženia)
T-kus	0.67	[2], fig. 13.16.
indukčný prietokomer DN250	0.055	[7] (guľový ventil)
indukčný prietokomer DN65	0.062	[7] (guľový ventil)
klapka DN300	0.29	[6]
klapka DN250	0.33	[6]
klapka DN65	0.49	[6]
kompenzátor DN300	0.12	[7]
kompenzátor DN250	0.06	[7]
vtok do bypassu	0.50	[1], tab. 7.7
výtok z bypassu	1.10	[1], tab. 7.7
výtok	1.10	[1], tab. 7.7

10 VZNIK VTOKOVÝCH VÍROV

Pre návrh minimálnej hladiny v nádrži je podstatné navrhnúť ju v takej úrovni, aby sa zabránilo vzniku vtokových vírov.

Vodný vír vznikne, ak je prúdenie vody, vďaka zakriveniu prúdových vlákien, uvedené do otáčavého pohybu. Hladinový vír môže mať rozličné formy, vo vodnom staviteľstve a hydroenergetike vyvoláva najväčšie komplikácie lievikovitý vír so vzduchovým jadrom. Dochádza k zvýšeniu náchylnosti niektorých častí hydraulického okruhu k vibráciám a kavitačnej korózii, čo vedie k zníženiu životnosti diela. Aby sa predišlo vzniku vtokových vírov je potrebné sacie potrubie dostatočne zahĺbiť. Najmenšia hĺbka sacieho ústia s_{MIN} je počítaná podľa vzťahu výskumného pracoviska Hydraulic Institute:

$$s_{MIN} = D_E + 2{,}3 \cdot v_s \cdot \sqrt{\frac{D_E}{g}}, \tag{10.1}$$

kde: s_{MIN} ..... najmenší ponor [m],

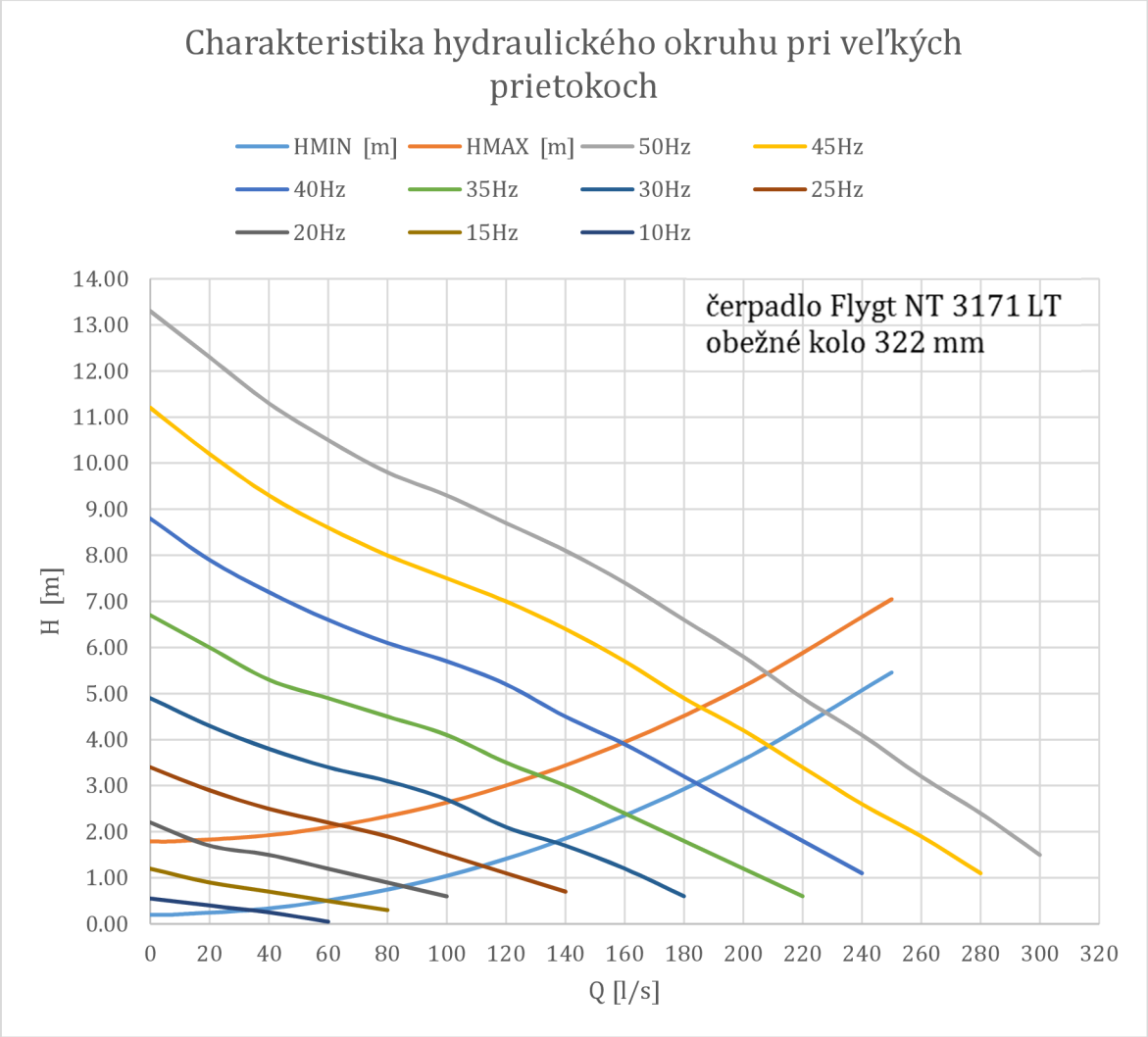
D_E ..... vstupný priemer sacieho potrubia [m],

v_s ..... vtoková rýchlosť [m/s],

g ..... gravitačné zrýchlenie [g ≐ 9,81 m/s^2].

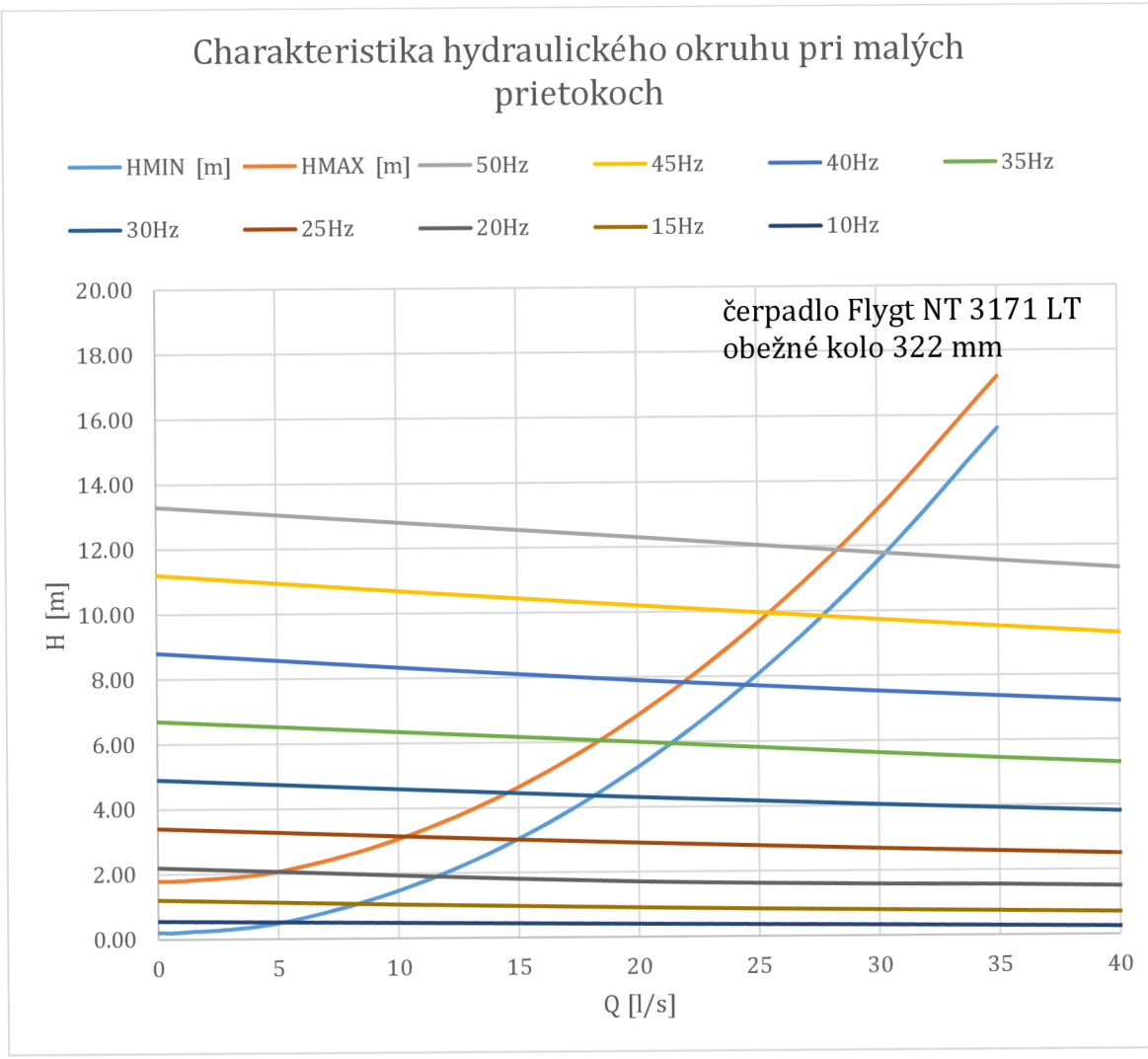
11 VÝSLEDKY A ICH ZHODNOTENIE

Výstupom posúdenia čerpadla a potrubia hydraulického okruhu sú hydraulické výpočty, ktoré sa zaoberajú veľkosťou celkových strát energie v hydraulickom okruhu a tvoria prílohu predloženej bakalárskej práce. Tieto tabuľky sú podkladom pre nižšie uvedené grafy, ktoré zobrazujú pracovnú oblasť čerpadla (**Obr. 11.1**, **Obr. 11.2**).



Obr. 11.1 *Charakteristika hydraulického okruhu pri veľkých prietokoch*

Pri maximálnej statickej výške a frekvencii 50 Hz je čerpadlo schopné čerpať 208 l/s do výšky 5,4 m. Pri minimálnej statickej výške a maximálnej frekvencii je reálne čerpať až 228 l/s do výšky 4,6 m. Pri minimálnej statickej výške a minimálnej frekvencii 10 Hz je realizovateľné čerpať 34 l/s do výšky 0,3 m. Pri maximálnej statickej výške je možné čerpať vodu pri minimálnej frekvencii 20 Hz.



Obr. 11.2 *Charakteristika hydraulického okruhu pri malých prietokoch*

Pri maximálnej statickej výške, maximálnej frekvencii 50 Hz a prietoku vody cez bypass je možne čerpať maximálne 28 l/s do výšky 12 m. Pri zachovaní rovnakých podmienok, ale minimálnej statickej výške je možné čerpať 30,5 l/s do výšky 11,8 m. Pri minimálnej statickej výške a minimálnej frekvencii 10 Hz je dosiahnuteľné čerpať 5 l/s do výšky 0,55 m.

Nato, aby sme mohli čerpať hlavnou trasou (28-34) l/s a bypassom (1-5) l/s je nutné prišKrtiť prietok potrubím klapkami.

12 ZÁVER

Cieľom bakalárskej práce bolo posúdiť návrh sacieho a výtlačného potrubia odstredivého čerpadla a určenie pracovnej oblasti pri riadení meničom frekvencie.

Hydrotechnické výpočty sa zaoberajú závislosťou čerpaného množstva na dopravných výškach (**Príloha č. 3**). Slúžili ako podklad pre návrh odstredivého čerpadla a posúdenie návrhu prierezu sacieho a výtlačného potrubia. Boli získané potrebné pracovné oblasti čerpadla pri rôznom výkone čerpadla od 10Hz do 50 Hz.

Hodnoty vypočítaných prietokov neodpovedajú úplne presne skutočnosti. Skutočné hodnoty prietokov sa dajú zistiť až meraním po zostavení hydraulického okruhu. Rozdiel medzi vypočítanými a skutočnými prietokmi môže vzniknúť z dôvodu nepresného stanovenia jednotlivých súčiniteľov strát prípadne ovplyvňovaním sa po sebe idúcich singularít.

Z vyššie menovaných dôvodov sa bude riadiaci systém spolu s hraničnými hodnotami prietokov, pri ktorých voda potečie cez bypass, spresňovať až pri výstavbe.

Výpočty preukázali, že návrh hydraulického okruhu bol prevedený odborne a ekonomicky. Je zabezpečená dostatočná sacia výška zabraňujúca vzniku vtokových vírov, navrhnuté dimenzie potrubí sú dostatočne kapacitné a navrhnuté čerpadlo zabezpečí dopravu vody do žľabu pri akomkoľvek uvažovanom prietoku.

Predložená bakalárska práca ma aplikačný charakter a využitie v praxi.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY A WEBOVÝCH STRÁNOK

[1] JANDORA, J., ŠULC J. *Hydraulika*. Modul 01. Brno: CERM Brno, 2006.

[2] MILLER, D.S. *Internal flow system*. BHRA, 1971.

[3] BRADA, K., HLAVÍNEK, P. *Čerpadla ve vodním hospodářství*. NOEL 2000 s. r. o., ISBN 80-86020-43-6, Brno, 2004.

[4] ŠULC, J., *Experimentální výzkum tvorby vírů před vybranými vtoky hydrotechnických děl.* FAST VUT Brno, 1987.

[5] CICHRA, R., ŠNELEROVÁ, M., ŽOUŽELA, M. *Inovace čerpací stanice Laboratoře vodohospodářského výzkumu*. Prováděcí projekt strojně technologické části. LVV – FAST – VUT v Brně, 2008.

[6] Uzavírací centrická klapka. *ARMATURY Group: Armatury* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: http://www.armaturygroup.cz/soubory/katalogovy-list/L32.5S_FIG_1150-1158,CZ_FINAL.pdf

[7] Pryžový kompenzátor s nerezovými přírubami BRA.F8.520. *IVAR CS: komponenty pro vodu, vytápění a plyn* [online]. [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: http://www.ivarcs.cz/cz/pryzovy-kompenzator-s-nerezovymi-pririubami-bra-f8-520

[8] Pump. *Xylect* [online]. Xylem Inc., 2015 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: http://www.xylect.com/bin/Xylect.dll?RQID=pu_prodsel-4318905201182073

[9] Magneticko-indukční průtokoměry – vodoměr WATERFLUX 3070. *KROHNE Česko* [online]. [cit. 2016-05-05].

Dostupné z: http://cz.krohne.com/cs/vyrobky/mereni-prutoku/magneticko-indukcni-prutokomery/specialni-prutokomery/waterflux-3070/

[10] Elektrický servopohon jednootáčkový SP 2.4. *REGADA s. r. o.* [online]. REGADA, 2010 [cit. 2016-05-21].
Dostupné z: http://www.regada.sk/sk/eshop/product/13/elektricky-servopohon-jednootackovy-sp-2_4/

[11] Co znamená veličina NPSH pro oběhová čerpadla? *TZB-info* [online]. [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: http://www.tzb-info.cz/2607-co-znamena-velicina-npsh-pro-obehova-cerpadla

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 9.1 Hodnoty súčiniteľov miestnych strát ξ 28

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 4.1 Schéma hydraulického okruhu 13

Obr. 4.2 Výšková schéma hydraulického okruhu 13

Obr. 5.1 Čerpadlo Flygt NT 3171 LT (informatívne zobrazenie, ktoré nemusí úplne presne zodpovedať navrhnutému typu) [8] 15

Obr. 5.2 Charakteristika čerpadla [8] 16

Obr. 5.3 Indukčný prietokomer Krohne (ilustračný obrázok) [9] 18

Obr. 5.4 Klapkový uzáver Proxima L32.5J typ WAFER [6] 19

Obr. 5.5 Elektrický servopohon jednootáčkový SP 2.4 [10] 20

Obr. 5.6 Gumový kompenzátor BRA.F8.500 [7] 21

Obr. 11.1 Charakteristika hydraulického okruhu pri veľkých prietokoch 30

Obr. 11.2 Charakteristika hydraulického okruhu pri malých prietokoch 31

ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

SKRATKY:

BOKU Wien	Universität für Bodenkultur Wien
LVV	Laboratórium vodohospodárskeho výskumu
VUT	Vysoké učení technické
PID	proporcionálne integračne derivačný
EPDM	etylén-propylénová guma
NPSH	Net Positive Suction Head

SYMBOLY:

priemer potrubia	DN	[mm]
gravitačné zrýchlenie	g	[m/s²]
straty trením po dĺžke	h_t	[m]
odporový súčiniteľ	λ	[-]
dĺžka potrubia	L	[m]
priemer potrubia	D	[m]
prierezová rýchlosť	v	[m/s]
prietok	Q	[m³/s]
prierezová plocha	S	[m²]
Reynoldsovo kritérium	Re	[-]
kinematická viskozita pri teplote T°C	ν	[m²/s]
kinematická viskozita pri teplote 0°C	ν_0	[m²/s]
teplota kvapaliny	T	[°C]
drsnosť potrubia	Δ	[m]
miestne straty	h_m	[m]
súčiniteľ miestnych strát	ξ	[-]
najmenší ponor	s_{MIN}	[m]
vstupný priemer sacieho potrubia	D_E	[-]
vtoková rýchlosť	v_s	[m/s]

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha č. 1 Výkres hydraulického okruhu, M 1:100 [LVV]

Príloha č. 2 Schéma potrubia a čerpadla, M 1:50

Príloha č. 3 Hydrotechnické výpočty

Príloha č. 4 Charakteristika čerpadla