

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
Katedra energetických zařízení



PETR ŠVARC

Měření charakteristik na odstředivém čerpadle
Measuring of characteristics on the centrifugal pump

Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Petr Novotný, CSc.
Konzultant bakalářské práce:	Petr Jerje
Rozsah práce:	45 stran
Počet stran:	68
Počet obrázků:	8 + 6 v přílohách
Počet tabulek:	0 + 17 v přílohách
Počet grafů:	17 + 3 v přílohách
Počet příloh:	14

Liberec 2005

Anotace

S hydraulickými stroji jakými jsou čerpadla se v dnešní době technik setkává téměř všude. Jejich použití je rozsáhlé a proto je jejich počet velký. Snahou snížit jejich příkon a zvýšit účinnost se tedy zabývá velké množství firem. Jednou z možností jak dosáhnout vyšší účinnosti je řízení a regulace provozu čerpadla.

Cílem práce bylo změřit charakteristiky dvou odlišných čerpadel od firmy Wilo. Jednalo se o čerpadla typu Stratos a Top-S. Čerpadlo Stratos je elektronicky řízené, nastavitelné do několika provozních režimů. Čerpadlo Top-S je běžné čerpadlo bez vnější regulace. Charakteristiky čerpadla Stratos byly měřeny v provozních stavech konstantních otáček, konstantního a variabilního diferenčního tlaku. V režimu konstantního diferenčního tlaku se celé zařízení, při snižování průtoku, rozechvělo. Toto chvění bylo v rámci možností a citlivosti měřících přístrojů také změřeno. Na čerpadle Stratos bylo provedeno celkem patnáct různých měření charakteristik a měření příkonu a účinnosti. Charakteristiky čerpadla Top-S a jeho příkon a účinnost byly změřeny ve třech provozních stavech, do kterých je možné čerpadlo nastavit.

Výsledky měření charakteristik byly vyneseny do grafů a účinnosti obou čerpadel byly porovnány. Vyšší účinnost vykazuje čerpadlo Stratos, které je elektronicky řízené a které využívá nových technologií. Toto čerpadlo je však znatelně dražší.

Annotation

Hydraulic pumps are the part of hydraulic machines family and are commonly used in almost all branches of the industrial engineering. They have various possibilities of usage and therefore there is a huge amount of these machines all over the world. Lots of companies are focused on increasing output power as well as efficiency. One of the solutions how to reach higher efficiency is operating control and regulation of hydraulic pumps.

The intentions of this work were to compare two different hydraulic pumps from the Wilo Company based on measuring of operating parameters. Two types of pumps – Stratos and Top-S – were chosen. The Stratos pump is electronically regulated, with possibility of settings of different operation modes. The Top-S pump is the common type without outer regulation. The operating parameters of the Stratos pump were measured during the different modes of the constant revolution, constant and variable differential pressure. The whole mechanism was vibrating during reducing of the flow's rate in the differential mode. These vibrations were measured as exact as measure equipment allowed. While measuring the power input and efficiency there were taken fifteen different measurements on the Stratos pump. The operating characteristics of the Top-S pump along with power input and efficiency were measured in three operating modes, which are available.

Measured results were pictured into graphs and compared to each other. The Stratos pump shows higher efficiency. This pump is electronically controlled and it uses modern technologies. On the other hand it is more expensive than the Top-S pump.

Místopřísežné prohlášení

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne 24.5.2005

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Dne 24.5.2005

Podpis:

Obsah

ANOTACE	II
ANNOTATION.....	III
MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ	V
PROHLÁŠENÍ.....	VI
OBSAH	1
POUŽITÉ JEDNOTKY A SYMBOLY	4
1 ÚVOD.....	5
2 TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY ČERPACÍ TECHNIKY	7
2.2 MANOMETRICKÁ DOPRAVNÍ VÝŠKA A MĚRNÁ ENERGIE ČERPADLA	8
2.3 KAVITACE ČERPADLA	9
2.4 HYDRAULICKÉ ZTRÁTY A ZTRÁTOVÁ VÝŠKA	11
2.5 TEORETICKÝ VÝKON ČERPADLA A ÚČINNOST	13
2.6 CHARAKTERISTIKA ČERPADLA	13
2.7 ZKOUŠENÍ ČERPACÍ	14
2.8 ČERPADLA WILO.....	15
2.8.1 Zařazení čerpadel	15
2.8.2 Wilo Top-S	17
2.8.3 Wilo Stratos	18
2.9 ÚKOL MĚŘENÍ	19
2.10 POSTUP MĚŘENÍ	19
2.10.1 Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních otáčkách	19
2.10.2 Charakteristika čerpadla Stratos v režimu konstantního diferenčního tlaku	21

2.10.3	<i>Charakteristika čerpadla Stratos v režimu variabilního diferenčního tlaku</i>	21
2.10.4	<i>Charakteristika čerpadla Top-S</i>	21
2.11	VYSVĚTLENÍ POUŽITÉHO OZNAČENÍ	21
2.12	POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE	22
2.13	POSTUP UŽITÝ PRO VÝPOČTY A ZPRACOVÁVÁNÍ NAMĚŘENÝCH HODNOT:	22
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	23
3.1	MĚŘENÍ NA ČERPADLE WILO STRATOS	23
3.1.1	<i>Režim konstantních otáček čerpadla Stratos</i>	23
3.1.1.1	Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 4800$ ot/min	24
3.1.1.2	Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 4500$ ot/min	25
3.1.1.3	Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 4000$ ot/min	26
3.1.1.4	Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 3300$ ot/min	27
3.1.1.5	Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 2500$ ot/min	28
3.1.1.6	Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 2000$ ot/min	29
3.1.2	<i>Režim konstantního diferenčního tlaku čerpadla Stratos</i>	30
3.1.2.1	Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 11$ [m]	30
3.1.2.2	Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 10$ [m]	31
3.1.2.3	Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 7$ [m]	32
3.1.2.4	Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 4,5$ [m]	33
3.1.2.5	Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 2,5$ [m]	34
3.1.3	<i>Režim variabilního diferenčního tlaku čerpadla Stratos</i>	35
3.1.3.1	Nastavení variabilního diferenčního tlaku v podobě horní hranice požadované dopravní výšky $H = 10$ [m]	35
3.1.3.2	Nastavení variabilního diferenčního tlaku v podobě horní hranice požadované dopravní výšky $H = 7$ [m]	36

3.1.3.3	Nastavení variabilního diferenčního tlaku v podobě horní hranice požadované dopravní výšky $H = 4$ [m].....	37
3.2	MĚŘENÍ NA ČERPADLE WILO TOP-S	38
3.3	ROZBOR VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	40
3.3.1	<i>Čerpadlo Stratos, režim konstantních otáček</i>	40
3.3.2	<i>Čerpadlo Stratos, režim konstantního diferenčního tlaku</i>	40
3.3.3	<i>Čerpadlo Stratos, režim variabilního diferenčního tlaku</i>	41
3.3.4	<i>Čerpadlo Top-S.....</i>	42
3.4	POROVNÁNÍ OBOU ČERPADEL	42
4	ZÁVĚR	43
5	SEZNAM LITERATURY.....	44
6	SEZNAM PŘÍLOH	45

Použité jednotky a symboly

	označení	zákonné SI jednotky		další jednotky	poznámky
délka	l	m	metr	mm	základní jednotka
hmotnost	m	kg	kilogram	g	základní jednotka
čas	t	s	sekunda	min	základní jednotka
objem	V	m ³		l	1l = 10 ⁻³ m ³
hustota	ρ	kg/m ³			
svislá odlehlost hladin	h	m	metr	mm	
dopravní výška	H	m	metr	mm	
průměr	d	m	metr	mm	
tíhové zrychlení	g	m/s ²			
měrná energie	Y	J/kg			energie vztažená na 1kg kapaliny
příkon	P	W	Watt		
účinnost	η	-			hodnoty zjištěné převážně empiricky
poměrná ztráta	ζ	-			
odporový součinitel	λ	-			
rychlost proudění	c	m/s			
kinematická viskozita	ν	m ² /s		mm2/s	
tlak	p	Pa	Pascal	bar	1bar = 10 ⁵ Pa
teplota	T	K	Kelvin	°C	základní jednotka
otáčky	n	min ⁻¹			
hmotnostní průtok	m[•]	kg/s			
objemový průtok	Q	m ³ /s			

1 Úvod

Nad rychlým rozvojem techniky se dnes již ani nepozastavujeme. Mnohé principy strojů a zařízení jsou nám dobře známy již delší dobu, avšak mění se technologie, používají se nové materiály a v neposlední řadě se rychle vyvíjí elektronika a číslicové řízení. Výměnou starého zařízení získáme mnohdy nejen více požadované vlastnosti, snížení hluku, spotřeby, zastavěného místa apod., ale také další funkce navíc, které by se doposud jen stěží realizovaly. Proto se s elektronikou a číslicovým řízením setkáváme již u mnoha strojů. V případě hydraulických strojů, jakými jsou čerpadla můžeme např. využít elektroniky k jejich řízení a regulaci otáček. Tato práce by mohla být ukázkou, jak správné využití elektroniky umožní efektivnější využití energie pro dopravu kapalin. Použití elektroniky k řízení je však mnohem širší. Zajisté pod sebe nezahrnuje jen hydraulické stroje, jejichž význam i v dnešní době dosti velký. S čerpadly se setkáváme ve všech oborech techniky, od drobných čerpadel používaných v automatizaci a u obráběcích strojů, přes střední čerpadla pro dopravu tekutin ve vodárnách, v přečerpacích stanicích ropovodů, v chemických továrnách a odkalovacích a čistících stanicích, až k velkým čerpadlům zavlažovacím a výkonným čerpadlům v elektrárnách. V tepelných elektrárnách jsou důležitá čerpadla napájící vody pracující při vysokých tlacích i čerpadla kondenzační a oběhová pracující při vysokých teplotách. Velké rozměry a výkony mají akumulární čerpadla ve vodních přečerpávacích elektrárnách a jiné další, jejichž vyjmenování by zabralo mnoho času i místa. Mnohdy si stačí jen uvědomit, že čerpadlům přivádíme energii pro dopravování kapalin všeho druhu nebo za tím účelem, abychom jimi dodali kapalině potřebný tlak, na to, aby se před námi otevřel celý komplex problémů a úkolů, které je nutné řešit. K tomu je však nutné něco o čerpadlech vědět a znát principy přeměny z energie elektrické na energii potenciální kapaliny, již dopravujeme. A nestačí-li konvenční metody řešení, nabízí se použití již zmiňovaného elektronického řízení. Vhodnou formou regulace pak můžeme hlídat dopravované množství, nebo potřebný tlak. Touto problematikou se zabývá dnes mnohé z firem, které dodávají na náš trh rozličnou škálu výrobků a to nejen z oblasti hydraulických strojů. Takovou firmou je i německá firma WILO, která poskytl Technické univerzitě v Liberci dvě ze svých čerpadel. Avšak ani české podniky nezůstávají pozadu. Výroba čerpadel má u nás dlouhou tradici, i když po pádu minulého režimu došlo ke znatelnému útlumu v jejich výrobě a některé

podniky zcela přestaly existovat. I přesto je stále v provozu mnohé z čerpadel, které bylo v té době uvedeno do provozu. Celkový příkon všech čerpadel v České republice se pohybuje ve stovkách tisíc kilowatů. To dává představu o ekonomickém významu kvalitní konstrukce čerpadel, který býval v minulosti mnohdy přehlížen. Kdyby se u všech čerpadel jejich zdokonalením podařilo zvýšit účinnost jen o dvě procenta, ať už s pomocí elektroniky, nebo nových technologií, přineslo by to každý rok nemalé úspory. Zkvalitňování čerpadel a zvyšování jejich účinnosti je proto trendem všech firem zabývajících se hydraulickými stroji. Není tedy nemístné se této problematice věnovat. Kombinací elektronického řízení chodu čerpadel s využitím nových materiálů, hlavně kompozitních pro výrobu oběžných kol, a technologie tzv. EC-motorů, získáváme vyšší účinnost a s tím i větší úspory energie. Je zajímavé konfrontovat tyto nové, složitější a dražší, i když úspornější, technologie s konvenčními. Od firmy WILO má katedra Energetických strojů a zařízení k dispozici dvě čerpadla dnes běžně používaná v teplovodních systémech, klimatizačních zařízeních a uzavřených chladících okruzích. Každé z nich splňuje jednu z předcházejících podmínek. Jedno je běžné čerpadlo s asynchronním motorem, druhé je elektronicky řízené s technologií EC-motorů. Podrobnější popis obou čerpadel je v následující části této práce. Často se zastavujeme u otázky zda pořídit dražší avšak úspornější systém, nebo zda volit podstatně levnější, ale s dlouhodobě vyššími provozními náklady. V takových případech postupujeme velmi opatrně. Je nutné abychom byli dobře seznámeni jak se samotnými čerpadly, tak s vlastnostmi celého systému, do kterého čerpadla instalujeme. Z tohoto důvodu se provádí zkoušení čerpadel na čerpadlové trati. Trati rozumíme komplex potrubí, šoupátek, škrťících ventilů a měřících přístrojů. Takováto trať ve zkušebnách výrobních závodů většinou simuluje konkrétní, reálný druh již existující hydraulické tratě z praxe. Zde získáme důležité informace o tom jak se čerpadlo chová a jaké má další vlastnosti a můžeme jej lépe dimenzovat. Zkoušení se provádí podle ČSN 11 0033 „Předpisy pro zkoušení a dodávku odstředivých a axiálních rotačních čerpadel“, případně ČSN 11 0036 „Předpisy pro zkoušení a dodávání strojních objemových rotačních čerpadel“. Tyto normy jsou dnes samozřejmě i ve formě ISO. Je nutné si také uvědomit, že každé čerpadlo se chová na různých tratích jinak. Proto je vhodné, porovnáváme-li dvě a více čerpadel, provádět zkoušení na hydraulicky shodných tratích, tedy na tratích se

stejnými hydraulickými odpory. Nejlépe je však využít jen jedné tratě, na které postupně čerpadla vystřídáme. Tím se nejvíce přiblížíme shodným podmínkám panujícím na takovéto trati. Výsledkem jsou nám informace díky nimž můžeme zvolit nejvhodnější hydraulické zařízení ať už ze strany technické, nebo ekonomické. Dnes však již tyto zkoušky nejsou tak časté, neboť čerpadla dodávaná na náš trh mají přesně stanovené pracovní rozsahy od výrobce a v jejich technické dokumentaci se dovíme vše potřebné. Všechna čerpadla by pak měla splňovat předpisy o shodě a měla by odpovídat modulu ověření systému řízení jakosti ISO 9001.

2 Teoretická část

2.1 Základní pojmy čerpací techniky

Jako v každém technickém odvětví se i v případě hydraulických strojů používají technické termíny pro zachování jednoznačnosti. S takovými pojmy se člověk musí nejdříve seznámit aby lépe a hlavně přesně porozuměl danému problému.

Hlavními parametry čerpadla jsou průtok Q , kterým je označováno objemové množství čerpané za jednotku času, v metrech krychlových za sekundu [m^3/s], nebo litrech za sekundu [l/s], resp. u horkovodních čerpadel hmotové množství v tunách za hodinu [t/h]. Dále je důležité přesně stanovit pracovní výšku, nebo manometrickou dopravní výšku H_{man} , jež se udává v metrech kapalinového sloupce [m]. Čerpadlo pracuje s určitým počtem otáček n [ot/min] (nebo dvojzdvihů u čerpadel hydrostatických), které jsou dány konstrukcí hnacího stroje. Kromě těchto hlavních parametrů je nutno udat fyzikální hodnoty čerpaného média, jako teplotu $t[^\circ\text{C}]$, měrnou hmotnost $\rho[\text{kg/m}^3]$, nebo měrnou tíhu $\rho.g [\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-2}]$. Další potřebnou jednotkou je kinematická viskozita $\nu [\text{m}^2/\text{s}]$ ¹. Při čerpání agresivních látek umožní znalost složení čerpaného média správnou volbu odolného materiálu podle korozivních tabulek. Při čerpání hydrosměsí je pro správnou volbu materiálu čerpadla i potrubí nutno znát podíl pevných částí k čerpané kapalině, granulometrické složení a tvrdost granulí. K hlavním parametrům čerpadla patří též účinnost čerpadla η . Tu lze získat z tzv. Erhartova² diagramu (příloha1), v němž jsou informativně udány dosažitelné

¹ Mayer, J.: *Energetické stroje*. 1.vydání. SNTL. Praha 1969. strana 343.

² Nechleba, M., Hušek, J.: *Hydraulické stroje*. 1.vydání. Praha. SNTL. 1966. strana 85.

účinnosti čerpadla v závislosti na měrných otáčkách čerpadla. S účinností je nutno počítat již při navrhování stroje. Pro danou trať a neznámé čerpadlo se odhadne podle již zmíněného Erhartova diagramu. Pokud však známe potřebné parametry tratě i čerpadla, můžeme ji jednoduše spočítat, jak je provedeno v této práci.

2.2 Manometrická dopravní výška a měrná energie čerpadla

Celé čerpací zařízení se skládá ze sacího a výtlačného potrubí s armaturami a z čerpacího stroje – čerpadla. Pro toto čerpací zařízení je nutno stanovit manometrickou dopravní výšku H_{man} , při které musí čerpadlo pracovat s normálním průtokem Q_n (objemovým množstvím za vteřinu). Rozdíl mezi nejnižší hladinou v sací nádrži a hladinou v horní nádrži se nazývá statická, čili geodetická, resp. dopravní výška čerpadla H_g . Ta se dělí na geodetickou výšku sací H_{sg} a výtlačnou H_{vg} (obr.2); dělící rovinou je u čerpadel odstředivých nivelační kóta nejvyššího bodu na vstupní hraně lopatky, takže

$$H_g = H_{sg} + H_{vg} \quad [\text{m}] \quad (1)$$

Čerpadlo v chodu musí přemáhat dopravní výšku H čili dopravní výšku dynamickou, krátce pracovní výšku. Ta je větší proti výšce statické o dynamické odpory v potrubí, kolenech, armaturách a o rychlostní výšku mezi výtlačným a sacím hrdlem čerpadla

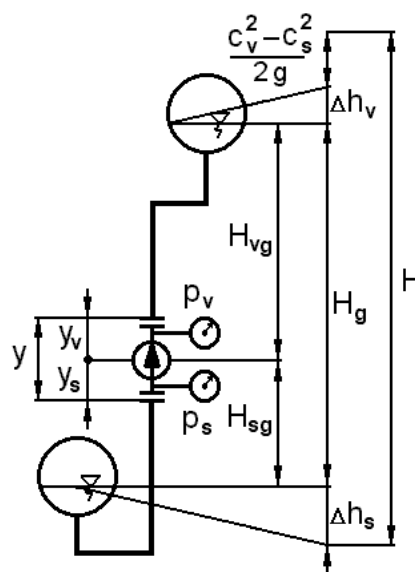
$$\frac{c_v^2 - c_s^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (2)$$

Jestliže se rychlostní výška zanedbá, zbývá výška manometrická H_{man} . Je-li součet hydraulických odporů v sacím potrubí Δh_s a ve výtlačném Δh_v , je

$$H_{man} = H_s + H_v = H_{sg} + \Delta h_s + H_{vg} + \Delta h_v \quad [\text{m}] \quad (3)$$

a jejich součet je manometrická výška čerpadla, jak ji zjistíme z údajů manometrů na přírubách čerpadla. Dopravní výška je potom³

Obr.1. Uspořádání čerpacího zařízení



Zdroj: Vlastní zpracování

³ Nechleba, M., Hušek, J.: *Hydraulické stroje*. 1.vydání. Praha. SNTL. 1966. strana 24.

$$H = H_{man} + \frac{c_v^2 - c_s^2}{2g} = H_{sg} + \Delta h_s + H_{vg} + \Delta h_v + \frac{c_v^2 - c_s^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (4)$$

Jak už bylo řečeno dříve, dodávají čerpadla kapalině potřebnou energii na její dopravu. Vyjdeme z Bernoulliho rovnice hydrostatiky (energetického tvaru), která říká, že součet kinetické, potenciální a tlakové energie kapaliny je konstantní. Nyní neuvažujeme ztráty v kapalině. Zavedme změnu měrné energie kapaliny⁴ v oběžném kole čerpadla [J/kg ; m^2/s^2] jako

$$\Delta Y_C = Y_2 - Y_1 = \frac{c_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gy - \left(\frac{c_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} \right) > 0. \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}; \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (5)$$

Změna měrné energie je větší než jedna, neboť měrná energie kapaliny je na výstupu z oběžného kola větší než na vstupu. Ve skutečné kapalině však působí třecí síly, které způsobují ztráty, jež se mění v tepelnou energii. Ta není z hydraulického hlediska energeticky využitelná a je ztracena. Celková měrná energie je tedy navýšena o energii ztrátovou a klesá ve směru toku kapaliny. Ztrátová energie Y_Z se dělí mezi výtlačné potrubí, oběžné kolo a sací potrubí. Po úpravě tedy

$$Y_C = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{p_2 - p_1}{\rho} + gy + Y_Z \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}; \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (6)$$

2.3 Kavitace čerpadla

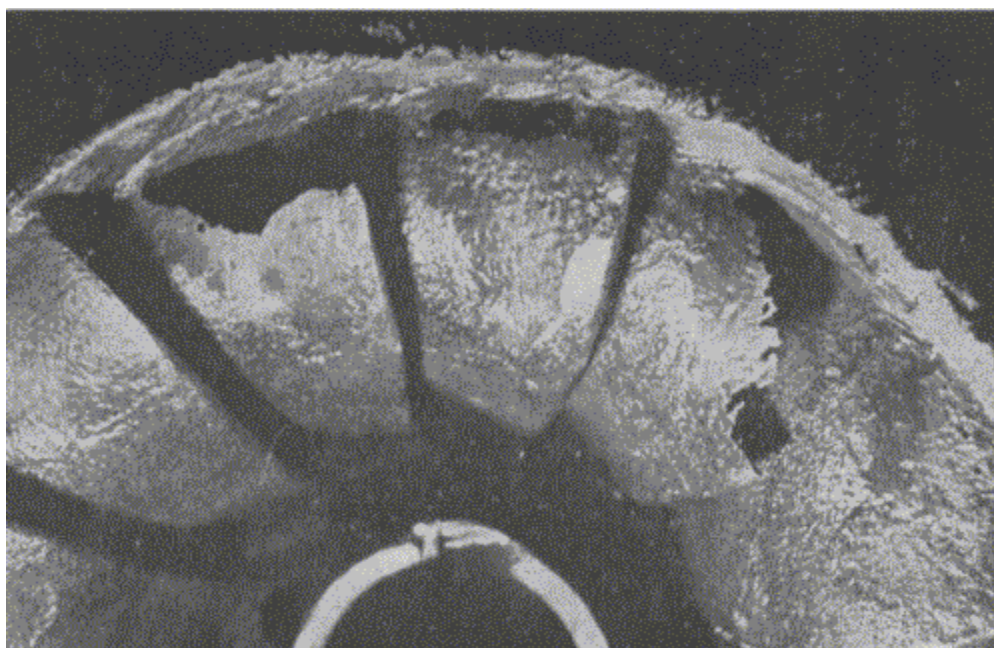
Vznik kavitace v čerpadlech ovlivňují fyzikální vlastnosti kapaliny, jako obsah rozpuštěných plynů, nebo napětí sytých par a hydrodynamické vlastnosti kanálů čerpadla. Pohyb kapaliny od volné hladiny sacím řádem až po vstup do činného prostoru čerpadla se děje na úkor potenciální energie kapaliny, bez energetické účasti pracovního prvku čerpadla. Vnější charakteristikou kavitačních vlastností čerpadla je měrná sací energie Y_S , definovaná vztahem

$$Y_S = \frac{-p_{ms}}{\rho} + gy_s, \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{kg}}; \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] \quad (7)$$

⁴ Bláha, J., Brada, K.: Příručka čerpací techniky, skript ČVUT, Praha 1997. strana 88.

kde p_{ms} je manometrický tlak na sacím hrdle a y_s svislá vzdálenost sacího hrdla od vodorovné osy čerpadla, tedy sací výška. Velikost sací výšky je omezena barometrickým tlakem vzduchu; atmosférický tlak vzduchu musí vytlačit vodu do sacího porubí a přemáhat jak sací výšku statickou, tak všechny ztráty odporové tohoto porubí. Snižováním tlaku v sacím řádu se uvolňují plyny v kapalině rozpuštěné a tvoří se plynové bubliny a kapsy, které snižují průtočné množství a mohou způsobit odtržení vodního sloupce. Pokud bychom tlak na sání stále snižovali až na tlak sytých par, začne se voda v sacím potrubí vařit. Tlak v sacím ústrojí nemusí nutně klesnout až na hodnotu sytých par aby došlo ke kavitaci, naopak pohybuje-li se těsně nad hodnotou tlaku syté páry čerpané kapaliny při její teplotě, dochází na lopatkách oběžného kola k dalšímu snížení tlaku a kapalina se začíná vařit. Vznikají bublinky vodní páry, které jsou proudem unášeny podél lopatek směrem k vytlačnému hrdlu. Dostávají se do oblasti vyššího tlaku, tím pára v bublinkách kondenzuje, vzniklé kavitační dutiny jsou zaplňovány kapalinou z okolí, říkáme že implodují. Kapalina se řítí do prostoru

Obr.2. Oběžné kolo čerpadla poškozené kavitací.



Zdroj: Nechleba, M. Hušek, J.: *Hydraulické stroje*. 1.vydání. Praha. SNTL. 1966. strana 104

bublinky velkou rychlostí a silou udeří na lopatku. Tím vzniká velmi nepříznivé namáhání materiálu lopatky na únavu. V místě úderu se též materiál mírně ohřeje, takže mezi ohřátým a ostatním studeným materiálem vzniká termočlánek, který

v dalším průběhu způsobí galvanickou korozi. Tato kavitační koroze naruší povrch materiálu stvrzený opracováním, třebaže v této tzv. inkubační době nenastává ještě znatelné ubývání materiálu. Po porušení povrchu vniká kapalina do materiálu mezi krystaly a uvolňuje je, nastává tzv. kavitační eroze (obr.3). U čerpadel se při vyvinuté kavitaci projevuje „zhroucení“ dopravní výšky čerpadla, která pak nedosahuje žádané hodnoty a chod je provázen značným rachotem a otřesy. Proto se připouští jako informační mez manometrické sací výšky zhruba 7 až 8 m v. sl. pro čerpadla pístová a 6 až 7 m v. sl. pro čerpadla odstředivá.⁵

2.4 Hydraulické ztráty a ztrátová výška

Hydraulické odpory v celém potrubí se musí stanovit pečlivě, zvláště je-li potrubí dlouhé, neboť velmi podstatně zvětšují dopravní výšku čerpadla. Odpor kapaliny (odporová, nebo též ztrátová výška) v potrubí o průměru d a délce L je dán výrazem

$$\Delta h' = \lambda \frac{L}{d} \frac{c^2}{2g}, \quad [\text{m}] \quad (8)$$

kde c je průtoková střední rychlost. Součinitel λ je závislý na Reynoldsově čísle

$$\text{Re} = \frac{cd}{\nu}, \quad [-] \quad (9)$$

kde c je střední rychlost proudění, d průměr potrubí a ν je kinematická viskozita proudící kapaliny. Kinematickou viskozitu proudící kapaliny najdeme nejlépe v tabulkách podle její teploty. Udává se v jednotkách $[\text{m}^2/\text{s}]$, případně $[\text{mm}^2/\text{s}]$ ve starší literatuře.

Výpočet hydraulických odporů je zcela závislý na vlastnostech tratě, na použitém materiálu potrubí, na provedení šoupátek a škrtkových ventilů a samozřejmě na rychlosti proudění kapaliny. Je-li rychlost tak malá, že $\text{Re} \leq 2320$, jedná se proudění laminární a součinitel hydraulického tření (odporový součinitel) λ je zcela závislý na Reynoldsově čísle vztahem

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64\nu}{cd}. \quad [-] \quad (10)$$

⁵ Nechleba, M., Hušek, J.: *Hydraulické stroje*. 1.vydání. Praha. SNTL. 1966. strana 104

Je-li však $2320 \leq Re \leq 10^4$ jedná se přechodovou turbulentní oblast proudění a součinitel λ je závislý na dvou bezrozměrných parametrech⁶

$$\lambda = f(Re, k_r), \quad [-] \quad (11)$$

kde k_r je poměrná drsnost, která ovlivňuje ztráty turbulentního průtoku a je měřítkem jakosti povrchu potrubí. Je dána poměrem střední absolutní výšky nerovností povrchu k [m] (absolutní drsností) k průměru potrubí d [m]

$$k_r = \frac{k}{d}. \quad [-] \quad (12)$$

Takové potrubí, jejichž povrchové nerovnosti jsou tak malé, že jsou překryty laminární vrstvou kapaliny, takže dalším zlepšováním povrchu se ztráty třením již nesnižují, se nazývá hydraulicky hladké. Zde se uvádí pro součinitel λ jednoduchý Blasiusův mocninný vzorec

$$\lambda = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}}. \quad [-] \quad (13)$$

Je-li $Re \geq 10^4$ nacházíme se v plně turbulentní oblasti proudění a součinitel λ je zde závislý pouze na hodnotě poměrné drsnosti. Této oblasti se někdy také říká oblast kvadratického odporu. Všechny tyto oblasti zobrazuje Nikuradseův diagram (příloha 2).

Místní hydraulické odpory vznikají v krátkých úsecích potrubí nebo armatur, kde dochází k výrazné změně vektoru rychlosti, tedy ke změně velikosti nebo směru rychlosti proudění. Počítáme je podle vztahu

$$\Delta h'' = \zeta \frac{c^2}{2g}, \quad [m] \quad (14)$$

kde ζ ztrátový součinitel, který se určuje experimentálně. V místním odporu dochází většinou k víření, proto součinitel ζ závisí jen na typu a provedení místního odporu. Rozděluje se do čtyř základních skupin na místní ztráty změnou průřezu, směru, ztráty v armaturách a tvarovkách.

Celkové ztráty v potrubí jsou poté součtem všech ztrát místních a hydraulických ztrát v přímém potrubí. Pro praxi se často používají různé empiricky zjištěné a

⁶ Pivoňka, J.: *Tekutinové mechanismy*. SNTL, Praha 1987. strana 58.

sestavené tabulky a grafy, jako v příloze 3⁷, kde rychle zjistíme ztrátovou výšku známého potrubí. Jde o diagram pro stanovení dopravovaného množství Q (v l/s, l/min, nebo m³/h) a průměru potrubí v milimetrech. Odporová výška je udána pro 100 m délky rovného potrubí. Spodní čerchovaná čára platí pro sací potrubí a horní pro výtlačné potrubí.

2.5 Teoretický výkon čerpadla a účinnost

Teoretický výkon hnacího stroje se vypočítá ze stanovených parametrů čerpadla; průtoku Q [m³/s], manometrické dopravní výšky H_{man} [m kap.sl.] a měrné hmotnosti čerpané kapaliny ρ [kg/m³]. Teoretický výkon je dán vztahem

$$P_{ef} = Q\rho gH \quad [\text{W}]. \quad (15)$$

Účinnost čerpadla pak jednoduše získáme ze vztahu

$$\eta = P_{ef} / P \quad [-], \quad (16)$$

kde P je příkon čerpadla ve wattech.

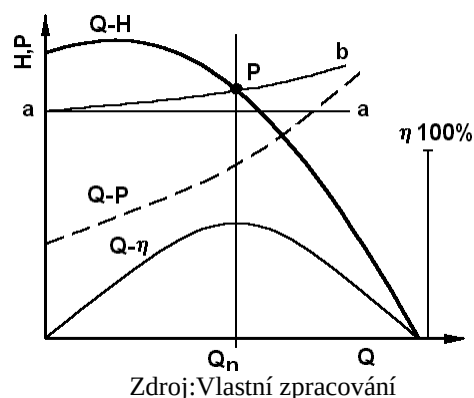
2.6 Charakteristika čerpadla

Charakteristickou křivkou, nebo krátce charakteristikou čerpadla nazýváme vzájemnou závislost hlavních parametrů pracovní výšky H a průtoku Q při stálých otáčkách n čerpadla. Zobrazujeme ji tak, že na osu pořadnic vynášíme průtok Q , na osu souřadnic dopravní výšku H . Skutečná charakteristika čerpadla je na obrázku 6. Stanoví ji zpravidla ve zkušebně výrobce čerpadla, a to proto, aby předem zjistil, zda čerpadlo vyhovuje žádaným parametrům Q, H a η pro předem určené provozní poměry. Dalším pojmem je charakteristika potrubí, nebo také charakteristická křivka ztrát v potrubí, což je křivka hydraulických odporů. Mívá parabolický průběh a postupně narůstá z hodnoty statické dopravní výšky čerpadla při zvyšujícím se průtoku. Na obr.3. je zobrazena charakteristika čerpadla $Q-H$, s příslušnými křivkami příkonu $Q-P$ na hřídeli čerpadla a křivkami účinnosti čerpadla v závislosti na příkonu $Q-\eta$. Za předpokladu,

⁷ Nechleba, M., Hušek, J.: *Hydraulické stroje*. 1.vydání. Praha. SNTL. 1966. příloha.

že jde o způsoby čerpání, při nichž statické výšky (buď geodetická, nebo tlaková, nebo oboje) jsou vyznačeny přímkami aa , kdežto hydraulické odpory potrubí jsou představovány parabolickými průběhy ab , je v daném případě provozní stav čerpadla dán bodem P . Čerpání je hospodárné, je-li provozní bod čerpadla v průsečíku charakteristiky tohoto čerpadla s charakteristikou ab .

Obr.3. Charakteristika čerpadla



2.7 Zkoušení čerpadel⁸

Jen zkouškou čerpadla ve zkušebně se můžeme přesvědčit, zda jsou splněny požadavky na čerpadlo kladené a získat další podklady pro výpočty a konstrukci. Při zkoušce čerpadla zjišťujeme, zda je dosaženo žádané dopravní výšky, průtoku a žádané účinnosti. Někdy je prováděna zkouška odolnosti proti kavitaci, která se provádí na odlišném zařízení. Při měření dopravní výšky používáme manometry připojené na přírubách čerpadla. Na sání použijeme manovakuometr, nebo jen vakuometr, neboť na sání vzniká v sacím hrdle podtlak. S opakem se setkáme na výtlačném hrdle čerpadla. Zde naměříme přetlak. Má-li výtlačné hrdlo menší průměr než sací, musí čerpadlo vyvinout rychlostní výšku dle vztahu (2). Průtok se u menších čerpadel měří objemově, nebo hmotnostně a vyčíslí se ze změřeného času potřebného k naplnění určitého objemu v měřicí nádobě. Tuto nádobu je možné také zvážit a tím získat hmotnostní průtok. Větší průtoky se měří přepady, nebo jinými průtočnými měřidly, jako měřicí clonou, dýzou, Venturiho trubicí apod. Při těchto metodách dochází, při výpočtu, k chybám, které však u velkých průtoků nemají takovou váhu. Příkon čerpadla odečteme snadno z wattmetru, neboť účinnost elektromotoru je nám často známa. Měření otáček bývá oříškem, hlavně u čerpadel jež se dodávají jako kompaktní zařízení bez volného přístupu k hnací hřídeli, na kterou by bylo možné upevnit nějaký měřicí přístroj. Máme-li však tu možnost měření uskutečnit, provádíme

⁸ Nechleba, M., Hušek, J.: *Hydraulické stroje*. 1.vydání. Praha. SNTL. 1966. strana 106.

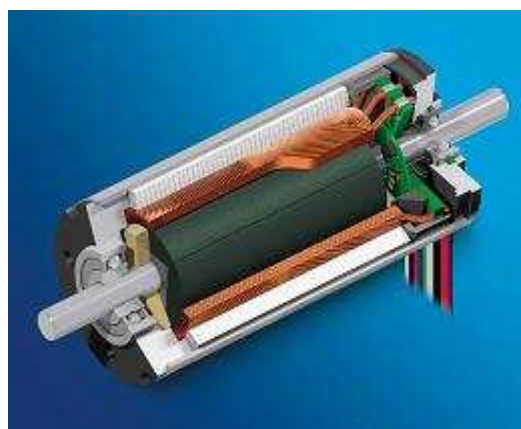
jej např. pomocí tachodynamu, tachometru, mnohem efektivněji pak stroboskopicky, případně sledováním změn elektromagnetického pole vinutí statoru v elektromotoru. U čerpadel firmy WILO, typu TOP-S a STRATOS, které má katedra energetických strojů k dispozici, je možné otáčky nastavit na určitou, známou hodnotu (viz. Čerpadla WILO).

2.8 Čerpadla WILO

2.8.1 Zařazení čerpadel

Chceme-li zařadit čerpadla WILO podle průběhu změny mechanické práce na potenciální energii kapaliny, jedná se o čerpadla hydrodynamická – odstředivá, neboli lopátková. U těchto čerpadel se mechanická práce, dodávaná hnacím motorem, mění v oběžném kole jednak v hydraulickou energii potenciální (tlakovou) a jednak v hydraulickou energii kinetickou (zvyšuje se rychlost proudění kapaliny). Kinetický podíl hydraulické energie se musí v čerpadle rovněž přeměnit na potenciální, takže ve výtlacném hrdle čerpadla odchází kapalina jen s nezbytně nutnou rychlostí a převažuje v něm energie tlaková. Tato dvojí přeměna energie je spojena se značnějšími ztrátami (difuzorové ztráty), a proto celková účinnost těchto čerpadel je poněkud menší než u čerpadel hydrostatických, tj. pístových

Obr.4. Elektromotor s EC-technologií

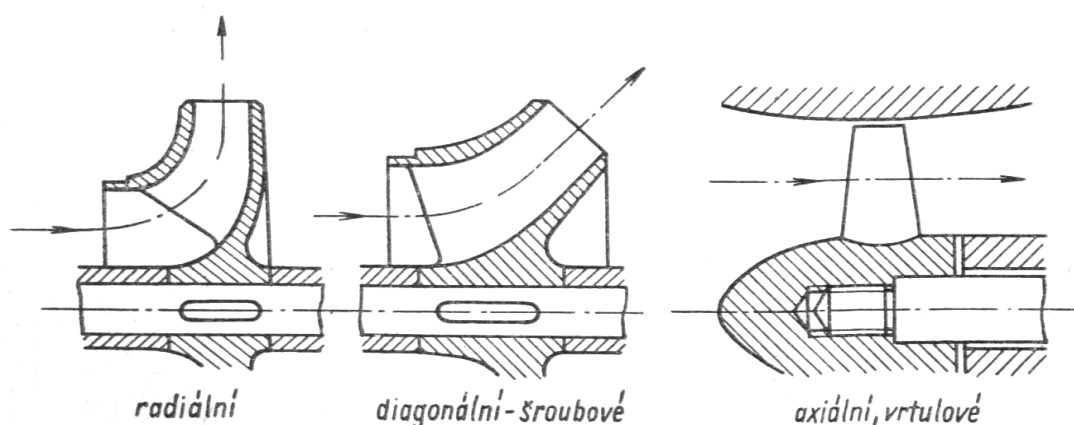


Zdroj: Vlastní zpracování

s klikovým mechanismem nebo s rotujícími písty. Na druhou stranu mají čerpadla odstředivá stejný průtok kapaliny v nepřetržitém proudu. Hydrodynamická čerpadla pracují s mnohem větším počtem otáček než klasická čerpadla pístová, proto mohou být poháněna přímo elektromotorem bez převodů. Čerpadlo s větším počtem otáček vyjde menší, spotřeba materiálu na jeho výrobu je rovněž menší, a proto čerpadlo je levnější a zaujímá ve strojovně malou půdorysnou plochu. Opravdu velké průtoky kapalin s viskozitou, jakou má voda, se dají zvládnout jen čerpadly

lopatkovými. Další úsporu pro čerpadla WILO přinesly nové technologie tzv. EC – motorů s elektronickou komutací⁹ (obr.4.). Tyto elektromotory mají rotor z feromagnetického jádra a využívají samonosné vinutí statoru, které vytváří zdánlivé točivé elektromagnetické pole. Tento druh elektromotorů je znám již od počátku jejich vzniku, avšak až s nástupem elektroniky našla tato technologie své uplatnění. Je to právě elektronika, která umožnila střídavé buzení jednotlivých vinutí statoru. Rotorem je jen permanentní magnet malého průměru a hmotnosti, což přináší další výhody v rychlosti odezvy na změnu otáček. Řízení velikosti otáček probíhá pomocí elektroniky, jenž je v případě čerpadla STRATOS jeho součástí. Odpadá tím používání frekvenčních měničů pro změnu otáček, jak tomu bývá u asynchronních motorů. Další hledisko, podle kterého lze čerpadla WILO rozdělit je podle směru proudění kapaliny v kanále oběžného kola. Obecně dělíme čerpadla na radiální, axiální a

Obr.5. Oběžná kola čerpadel podle směru proudění kanálem



Zdroj: Nechleba, M. Hušek, J.: *Hydraulické stroje*. 1.vydání. Praha. SNTL, 1966. strana 67

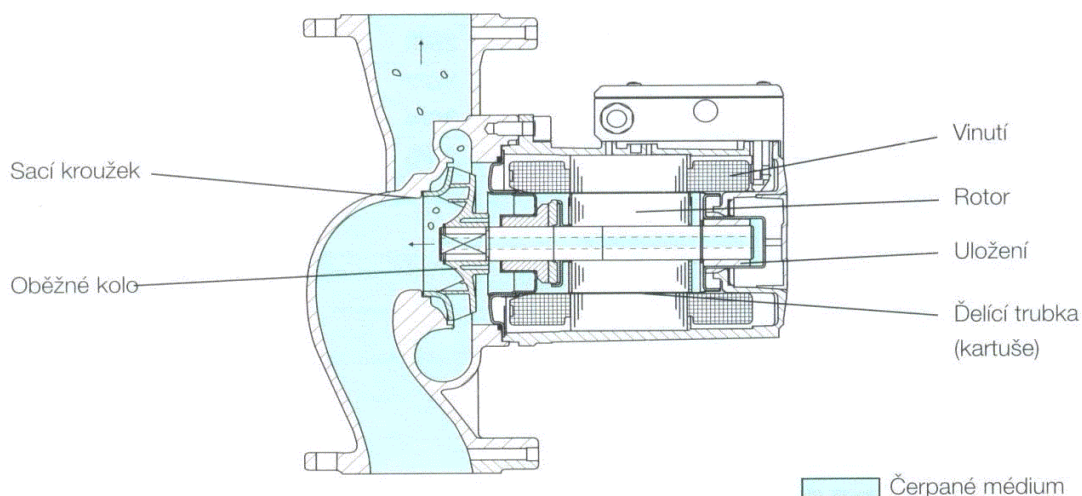
diagonální-šroubové (obr.5.). Čerpadla WILO jsou tedy radiální, neboť kapalina vstupuje do oběžného kola axiálně a vystupuje radiálně.

Podle konstrukce dané výrobcem jsou řazena jako čerpadla mokroběžná¹⁰, což znamená, že všechny rotující části čerpadla běhají v čerpaném médiu (obr.6.). Tím odpadá utěšňování hřídele ucpávkou nebo kluznými kroužky. Mazání ložisek, hřídele i chlazení součástí elektromotoru zajišťuje čerpané médium, které může mít teplotu od – 10 do +110 °C.

⁹ Technický týdeník. č.vydání 6. ročník 53. 22.3.2005.

¹⁰ Technická dokumentace firmy Wilo

Obr.6. Řez mokroběžným čerpadlem



Zdroj: Technická dokumentace firmy Wilo. www.Wilo.cz

Posledním dělením rozdělení podle druhu čerpaného média a použití. Obě čerpadla, STRATOS i TOP-S, jsou teplovodní čerpadla pro vytápění a klimatizaci.

2.8.2 Wilo Top-S

Čerpadlo Top-S je hydrodynamické radiální čerpadlo pro teplovodní systémy a klimatizované systémy, pro malé a střední průtoky. Má tři stupně ručně nastavitelných otáček v rozmezí od 1650 ot/min do 2550 ot/min. Jejich nastavení se provede sundáním plastového krytu svorkovnice a pootočením uzpůsobeného modulu. Čerpadlo Top-S je ve třífázovém provedení. Prostřední hodnota otáček je tedy 2000 ot/min. Oběžné kolo čerpadla je z kompozitního materiálu. Elektromotor je asynchronní konvenčního provedení s několika pólovými nastavci pro změnu otáček.

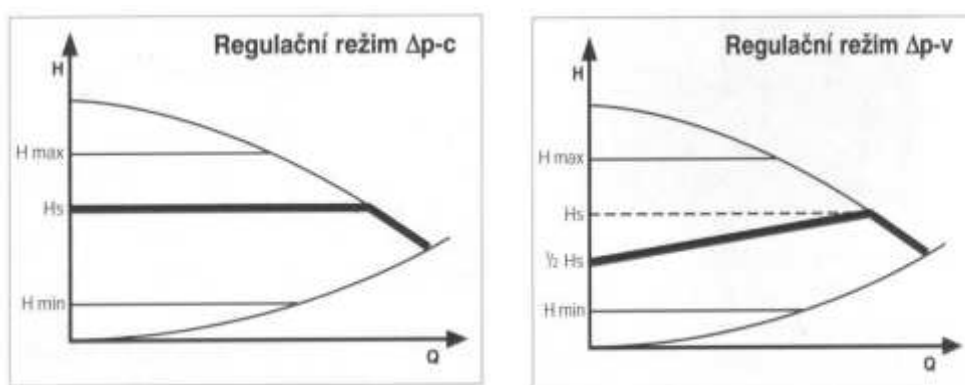


2.8.3 Wilo Stratos

Čerpadlo Stratos je elektronicky řízené čerpadlo nové generace tzv. inteligentních čerpadel. Má několik volitelných režimů a možnosti dalšího rozšíření funkcí při připojení externích čidel teploty a tlaku, či programovatelného modulu, se kterým je čerpadlo v kontaktu přes infračervený port. Manuální regulační režim umožní plynule nastavit otáčky na konstantní hodnotu po desítkách otáček za minutu z minimální hodnoty 1600 ot/min do maximální 4800ot/min. Další jsou automatické regulační režimy. V režimu Δp -c (obr.7.) lze nastavit konstantní diferenční tlak na čerpadle. Tento tlak se, se zvyšováním průtočného množství, nemění až po vlastní charakteristiku čerpadla. V režimu Δp -v (obr.7.) hlídá elektronika lineární změnu tohoto diferenčního tlaku v závislosti na průtočném množství. S růstem průtoku roste i diferenční tlak a to z poloviny požadované hodnoty do hodnoty námi nastavené, tedy požadované.



Obr.7. Regulační režimy Δp -c a Δp -v



Zdroj: Technická dokumentace firmy Wilo. www.Wilo.cz

Režim Δp -T je pro zachování konstantního diferenčního tlaku v závislosti na teplotě. K tomu je však za potřebí infračerveného monitoru, který není součástí standardní

výbavy čerpadla a Katedra energetických strojů jej nemá k dispozici. Režim DDC obstará celkovou regulaci pomocí externího regulátoru IF- modul (infračervený modul), jenž také není součástí standardní výbavy. Velkou výhodou je tzv. útlumový režim. V době snížení výkonu, jako např. v nočním provozu, elektronika automaticky sníží velikost otáček a pomocí fuzzy regulace udržuje teplotu na výtlaku čerpadla na nižší úrovni. To vše přináší značné úspory energie, neboť chod čerpadla se vždy přizpůsobí požadavkům celého systému. Výrobce uvádí, že ve spojení této regulace s novými druhy elektromotorů typu EC, můžeme dosáhnout až osmdesátiprocentní úspory energie.

2.9 Úkol měření

Hlavním úkolem bylo naměření charakteristik a objemového průtoku, příkonu a celkové účinnosti na objemovém průtoku čerpadel Wilo. Dále zjistit tlakové difference v různých provozních stavech obou čerpadel a nastavit na nich stejné, nebo podobné podmínky, aby bylo možné jejich porovnání. Na závěr navrhnout postup laboratorního měření do předmětu Energetické stroje pro obě čerpadla. Na čerpadle Stratos v režimech konstantního diferenčního tlaku a variabilního diferenčního tlaku i s návodem na ovládání.

Čerpadlo Stratos bylo po úvaze instalováno do tratě jako první, aby bylo možné vyzkoušet, které režimy jsou použitelné bez externích modulů, jenž nejsou součástí standardní dodávky. Z firemní technické dokumentace není zcela jednoznačné se kterými režimy lze pracovat. Dalším důvodem bylo vyzkoušet jemnost nastavovaných otáček, abychom se mohli dostatečně přiblížit otáčkám čerpadla Top-S. Ty jsou pevně stanovené již z výroby.

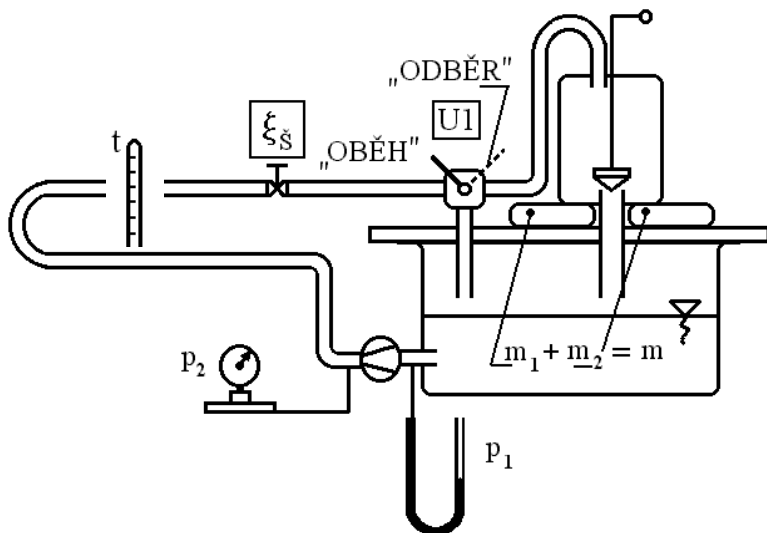
2.10 Postup měření

2.10.1 Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních otáčkách

Na u-manometru (obr.8, příloha 4., foto.1.), který je zapojen tak, že v klidu ukazuje výšku hladiny v nádrži, odečteme potřebnou hodnotu. Ta nám bude později sloužit pro

výpočet odlehlosti hladin. Šoupátko ξ_s (obr.8, příloha 4., foto.2.) úplně otevřeme a dvoucestný ventil U1

Obr.8. Schéma uspořádání čerpadlové tratě



Zdroj: Vlastní zpracování

(obr.8, příloha 4., foto.3) necháme přepnutý na „OBĚH“, tedy tak, aby voda netekla do vážící nádoby (sudu) (obr.8., příloha 4., foto.4). Připojené čerpadlo Wilo Stratos zapojíme přes elektronický multimetr (příloha 5., foto.5.) a nastavíme do režimu konstantních otáček na ty nejvyšší. Vážící nádobu nyní uzavřeme a připravíme si stopky. Přepneme dvoucestný ventil U1 na „ODBĚR“ a počkáme až začne voda vtékat do vážící nádoby. V tom okamžiku zapneme stopky. Nyní odečítáme z měřících přístrojů v tomto pořadí: odlehlost hladin na u-manometru, tlak výtlačného řádu čerpadla p_2 (příloha 5., foto.6.) na ručkovém manometru a příkon čerpadla ve wattech. Pořadí je voleno zcela záměrně. Vážící nádoba má objem cca 100 litrů a po jejím zaplnění znatelně klesne hladina v zásobníku s vodu, což vyvolá chybu na u-manometru. Vše je nutné provést velmi pozorně, avšak rychle, neboť vážící nádoba se brzy naplní. Ideální je přepnout zpět na „OBĚH“ až v okamžiku, kdy je nádoba ze tří čtvrtin plná. Vypneme stopky až přestane voda vytékat z potrubí a zaznamenáme čas. Dalším údajem je pro nás hmotnost vody, kterou odečteme na dvou vahách, na kterých je vážící nádoba postavena. Po zaznamenání všech hodnot vyprázdníme nádobu a opět ji uzavřeme. Šoupátko ξ_s přivřeme podle u-manometru tak, aby se odlehlost hladin snížila. Přivřením šoupátka se zvýší hydraulické odpory tratě a průtok se sníží, tím i podtlak na sání vzniklý prouděním vody v sacím řádu. Nyní celý postup zopakujeme a

budeme tak pokračovat až do úplného uzavření šoupátka. Je dobré provést nejméně deset měření, vhodné je dvanáct až třináct. Nesmíme zapomenout odečíst i hodnoty při zcela uzavřeném šoupátku, tedy při nulovém průtoku a teplotu vody t [°C] na teploměru umístěném na potrubí dle obr.8. Zde je označen jako t . Po dokončení měření nastavíme čerpadlo na nižší stupeň otáček a opět provedeme celé měření. Jelikož chceme porovnat obě čerpadla je dobré volit otáčky nastavitelné i na čerpadle Top-S, avšak rozložené rovnoměrně po celém jejich rozsahu.

2.10.2 Charakteristika čerpadla Stratos v režimu konstantního diferenčního tlaku

Nastavíme čerpadlo do režimu konstantního diferenčního tlaku. Měření probíhá stejně jako v režimu konstantních otáček. Diferenční tlak se na čerpadle Stratos zobrazuje v podobě dopravní výšky. Tyto měření v různých režimech provedeme nejméně tři.

2.10.3 Charakteristika čerpadla Stratos v režimu variabilního diferenčního tlaku

Nastavíme čerpadlo do režimu variabilního diferenčního tlaku. Opět měření probíhá stejně jako v režimu konstantních otáček. Zde provedeme také měření charakteristik nejméně ve třech provozních režimech.

2.10.4 Charakteristika čerpadla Top-S

Zde máme možnost pracovat jen se třemi stupni otáček. Měření na tomto čerpadle provedeme stejným postupem jako u čerpadla Stratos.

Získané charakteristiky vyneseme do grafů a v jednotlivých měřeních zhodnotíme chyby měření. Dále vypočítáme účinnosti čerpadel a porovnáme je z hlediska dopravovaného množství, výtlačné výšky a účinnosti.

2.11 Vysvětlení použitého označení

h.....odlehlost hladin na u-manometru	[m]
p_2tlak na výtlačném řádu čerpadla	[kPa]
m.....hmotnost vody ve vázící nádobě	[kg]

t.....čas potřebný k naplnění vážící nádoby	[s]
P.....příkon čerpadla	[W]

2.12 Použité měřicí přístroje

Ručkový manometr, 0÷250 kPa	DK 2394
U-manometr skleněný	DKP 9642
Váhy (2-krát), 0÷130 kg	Luxa 3
Měřicí kufr, Metra	ZP5 / 736
Elektronický multimetr	
Stopky	

2.13 Postup užitý pro výpočty a zpracovávání naměřených hodnot:

K výpočtu diferenčního tlaku na čerpadle potřebujeme znát tlak p_1 na sání. Ten se spočítá z odlehlosti hladin na u-manometru

$$p_1 = h \cdot \rho(t) \cdot g \quad [\text{Pa}] \quad (17)$$

kde $\rho(t)$ je hustota vody v závislosti na její teplotě. Vzhledem ke stálosti teploty v místnosti a malému rozdílu ve změně hustoty vody ji bereme za konstantní. Teplotě 19 °C odpovídá hustota vody asi 998,5 kg/m³. Tlak p_2 přímo odečteme na manometru. Diferenční tlak vytvořený čerpadlem

$$\Delta p = p_{\text{abs2}} - p_{\text{abs1}} \quad [\text{Pa}] \quad (18)$$

zde $p_{\text{abs2}} = (p_a + p_2)$ je absolutní hodnota tlaku na výstupu čerpadla a p_a je atmosférický tlak. Obdobně je $p_{\text{abs1}} = (p_a - p_1)$. Pak tedy získáme dosazením do (18)

$$\Delta p = p_2 + p_1 \quad [\text{Pa}] \quad (19)$$

Velikost dopravovaného množství vody získáme buď jako hodnotu hmotnostní, pro horkovodní systémy, nebo oběmového množství. K výpočtu oběmového množství určíme nejprve objem vody ve vážící nádobě (sudu) a po té vyjdeme ze vztahu

$$Q = \frac{V}{t} \quad \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \quad (20)$$

kde t [s] je čas potřebný k naplnění sudu.

Manometrická dopravní výška je vyjádřena dle vztahu (4), přičemž ztráty na sání můžeme vzít jen statické. Na vstupu do potrubí bude ztrátový součinitel $\zeta_v = 1$. Na

výstupu z čerpadla určíme statické ztráty na přímém ventilu ξ_s (obr.8.) $\xi_s = 3$, na dvoucestném ventilu U1 $\zeta_{dv} = 1,5$ a výtoku $\zeta_{vy} = 1^{11}$. Hydraulické ztráty prouděním ve výtlačném řádu se počítají v závislosti na velikosti rychlosti proudící kapaliny. Určíme je dle vztahů použitých v kapitole 2.4. Jsou však velmi malé, neboť celková délka čerpadlové tratě nepřesahuje čtrnáct metrů a vnitřní průměr porubí je 37 mm. Navíc lze porubí považovat za hydraulicky hladké.

Teoretický výkon se počítá dle vztahu (15), účinnost čerpání podle vztahu (16).

3 Experimentální část

3.1 Měření na čerpadle Wilo Stratos

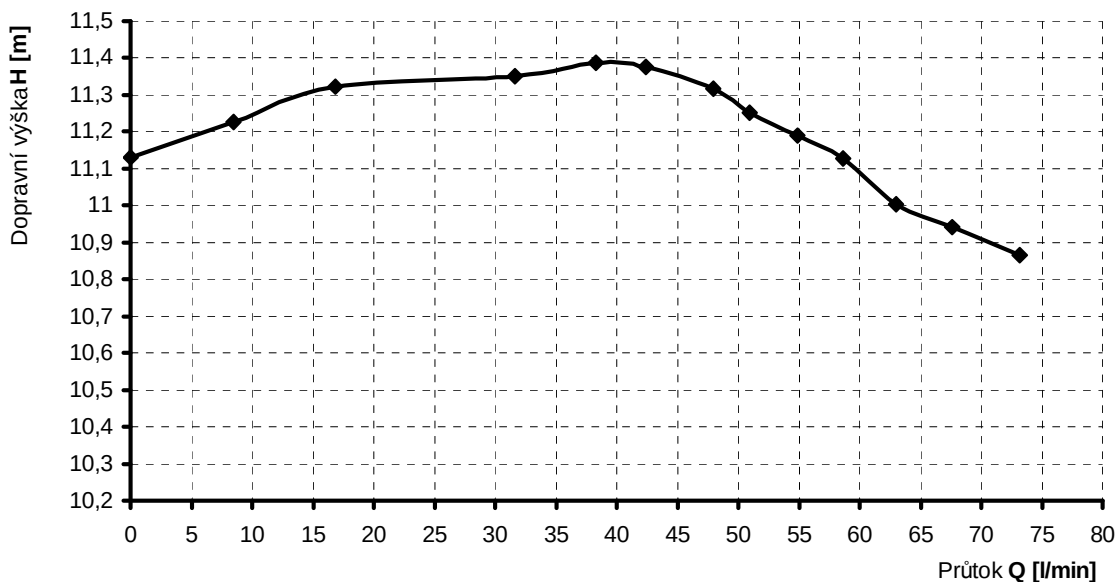
3.1.1 Režim konstantních otáček čerpadla Stratos

Zkoušení čerpadla při konstantních otáčkách probíhalo sestupně od nevyšších možných k nejnižším.

¹¹ Pivoňka, J.: *Tekutinové mechanismy*. SNTL, Praha 1987. strana 58.

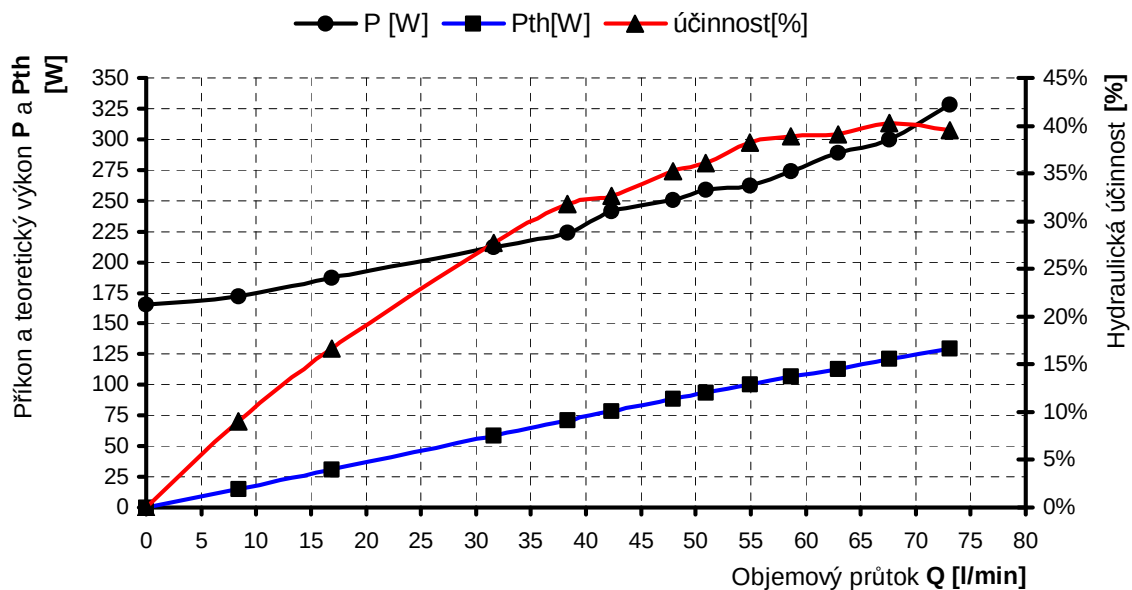
3.1.1.1 Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 4800$ ot/min

Graf 1.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních otáčkách



Zdroj: Vlastní zpracování

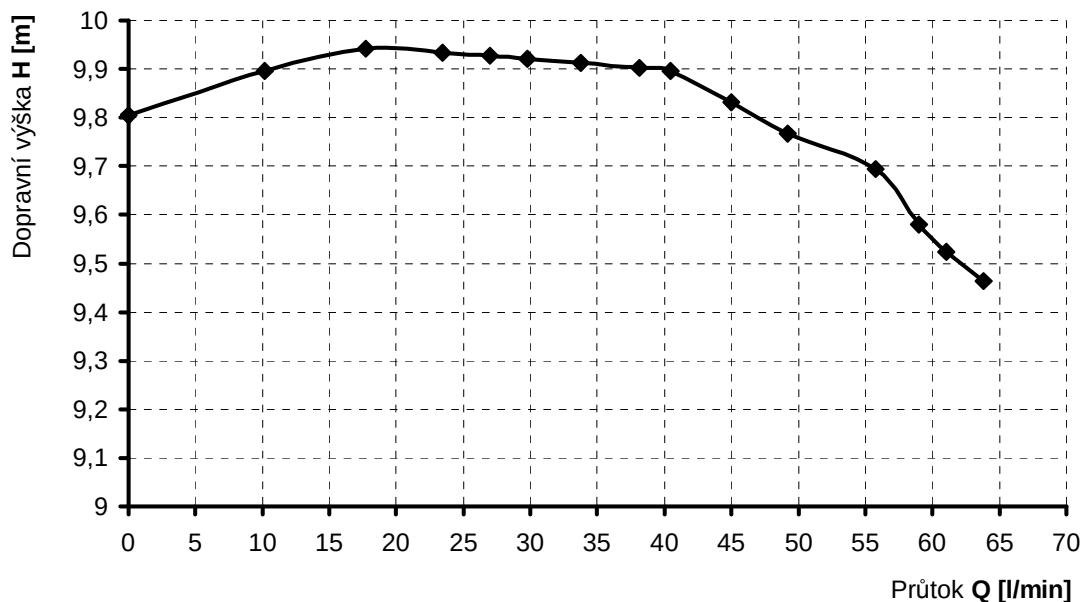
Graf 1.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při otáčkách $n = 4800$ ot/min



Zdroj: Vlastní zpracování

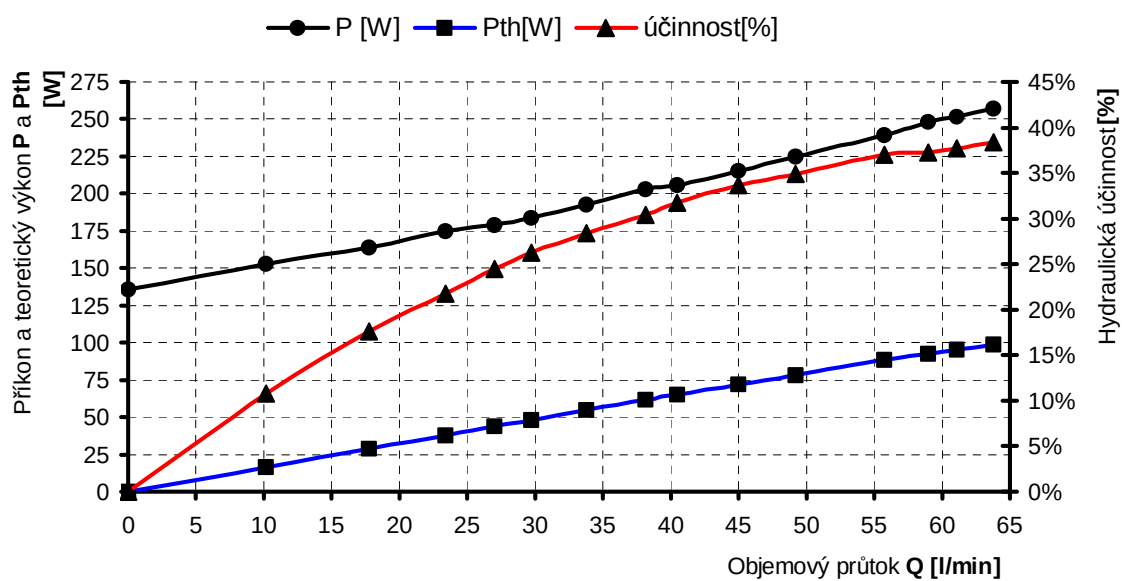
3.1.1.2 Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 4500$ ot/min

Graf 2.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních otáčkách



Zdroj: Vlastní zpracování

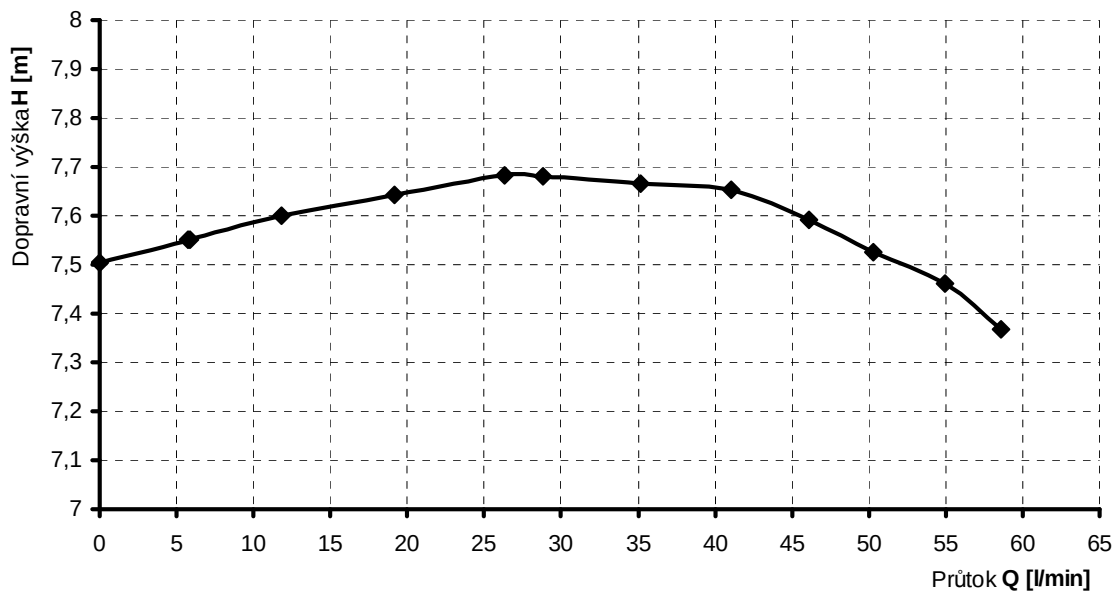
Graf 2.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při otáčkách $n = 4500$ ot/min



Zdroj: Vlastní zpracování

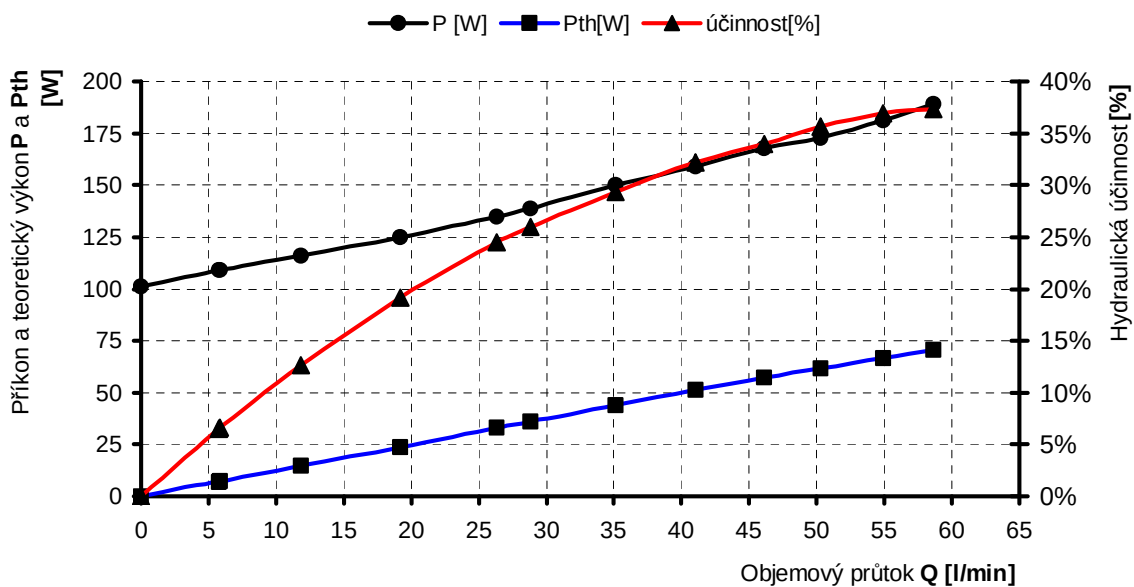
3.1.1.3 Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 4000$ ot/min

Graf 3.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních otáčkách



Zdroj: Vlastní zpracování

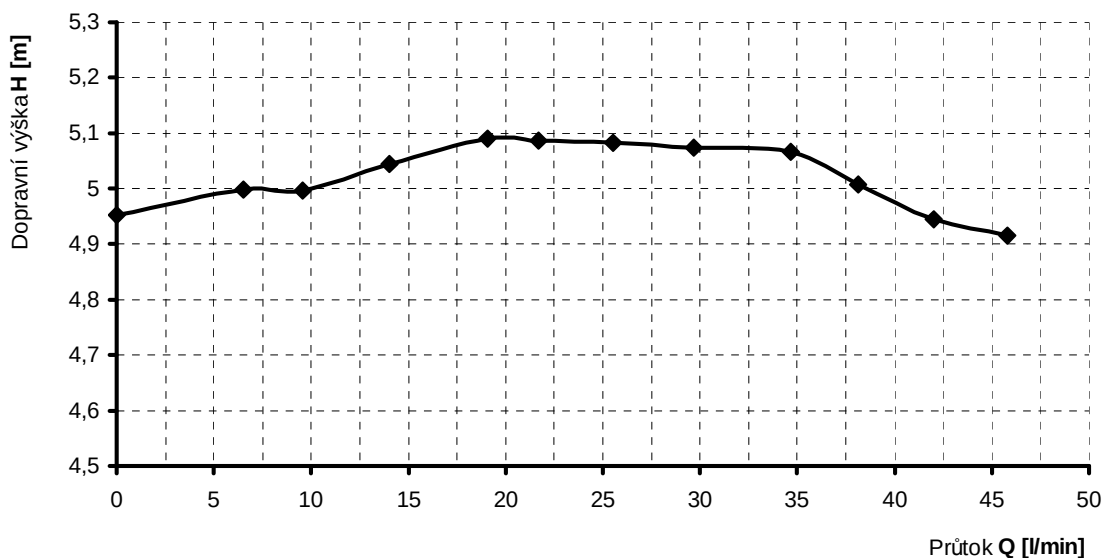
Graf 3.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při otáčkách $n = 4000$ ot/min



Zdroj: Vlastní zpracování

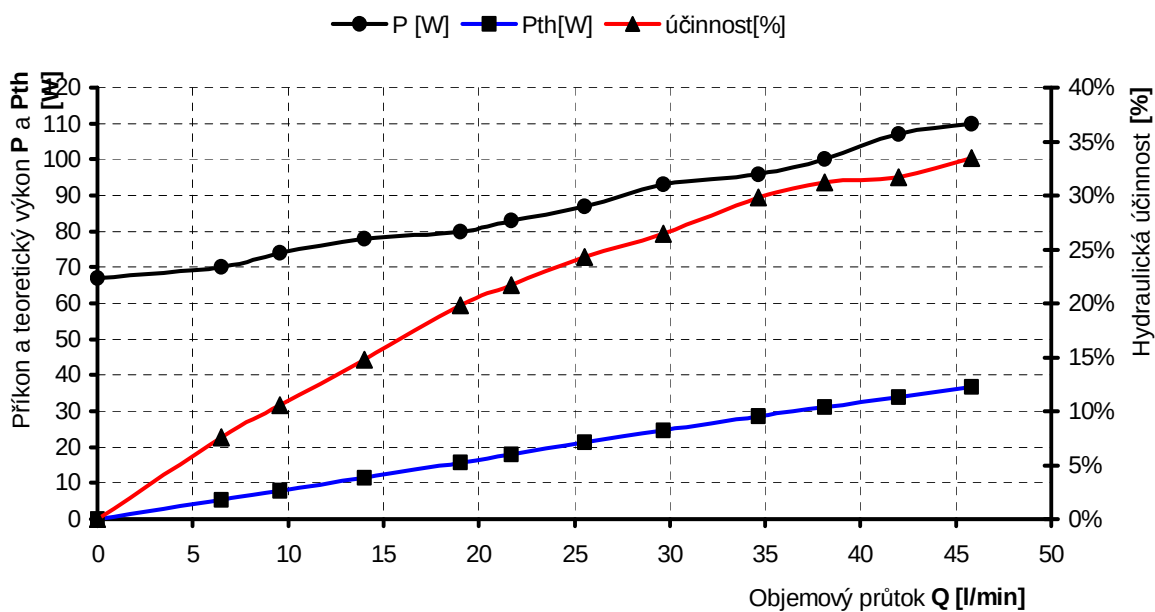
3.1.1.4 Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 3300$ ot/min

Graf 4.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních otáčkách



Zdroj: Vlastní zpracování

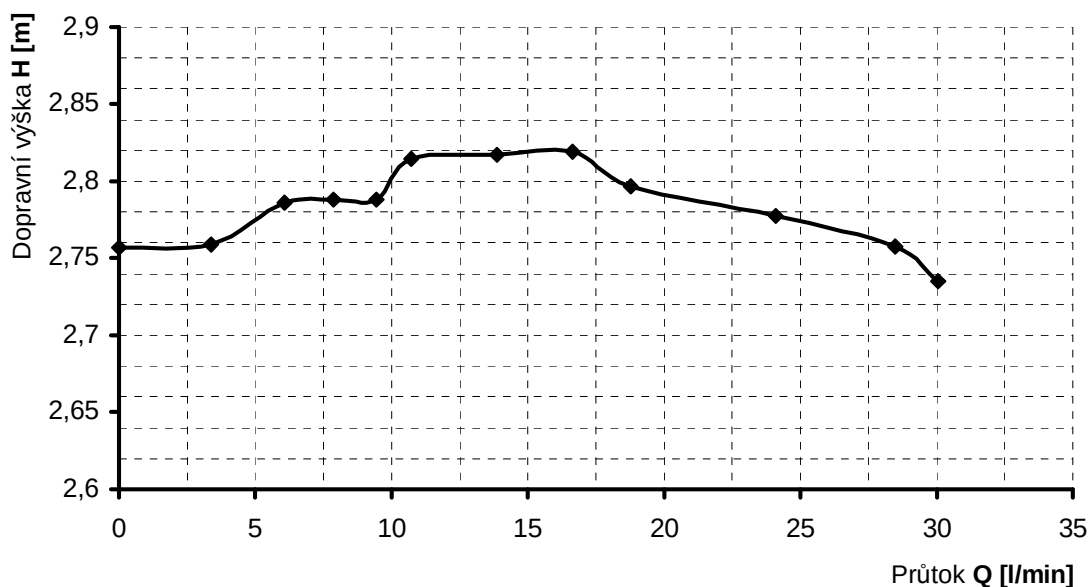
Graf 4.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při otáčkách $n = 3300$ ot/min



Zdroj: Vlastní zpracování

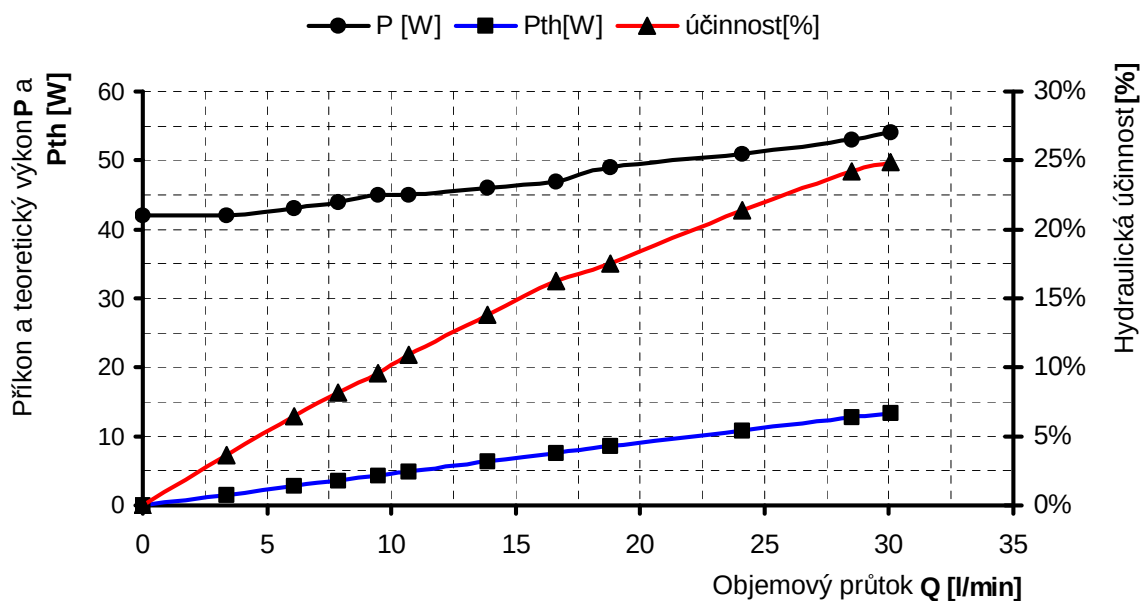
3.1.1.5 Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 2500$ ot/min

Graf 5.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních otáčkách



Zdroj: Vlastní zpracování

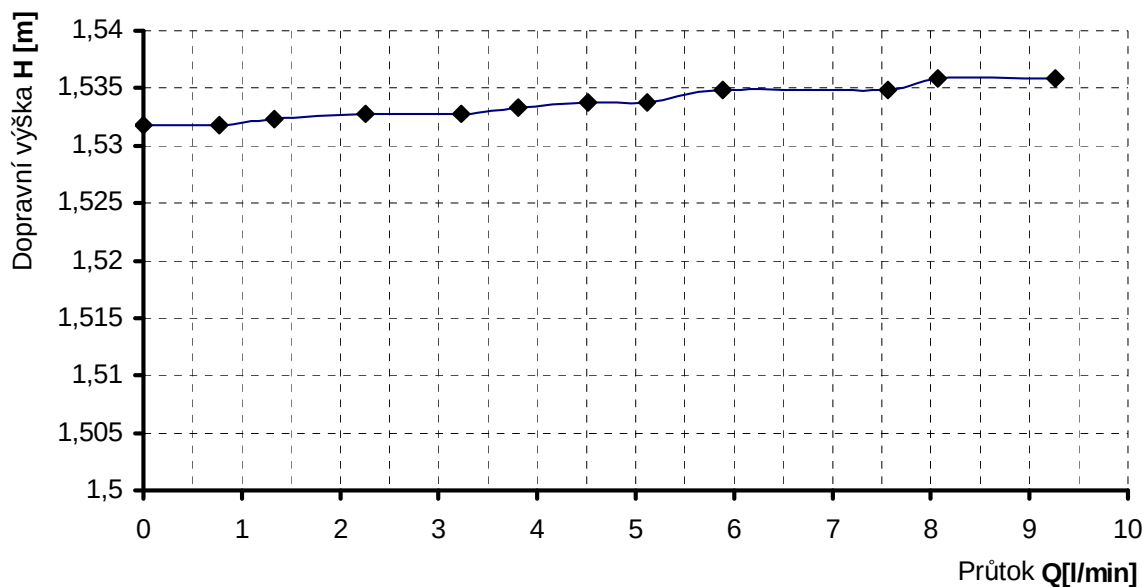
Graf 5.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při otáčkách $n = 2500$ ot/min



Zdroj: Vlastní zpracování

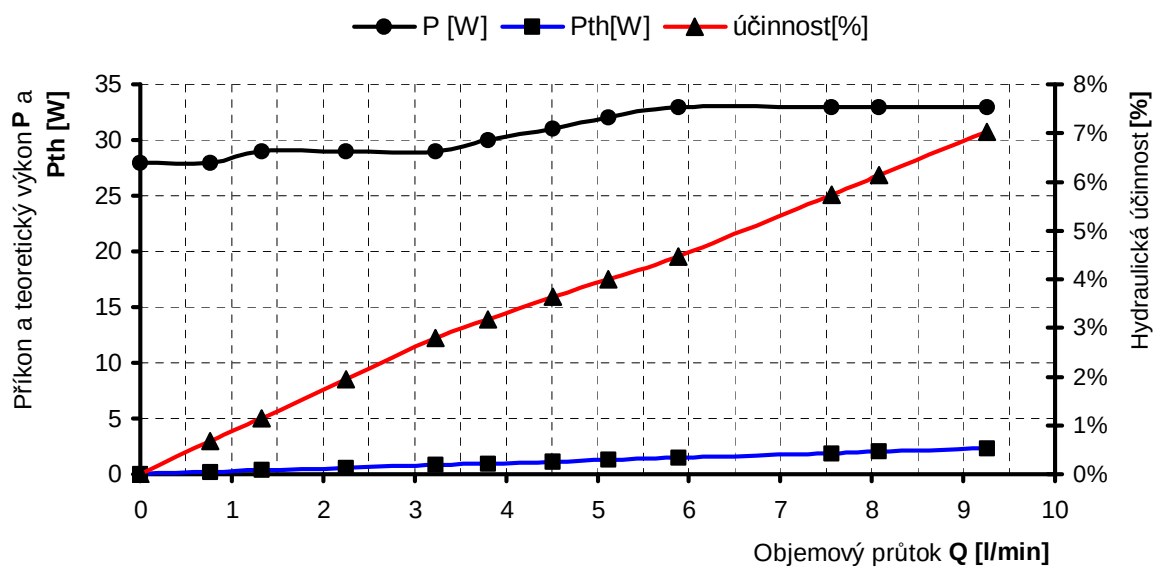
3.1.1.6 Nastavené otáčky na čerpadle Stratos $n = 2000$ ot/min

Graf 6.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních otáčkách



Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 6.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při otáčkách $n = 2500$ ot/min



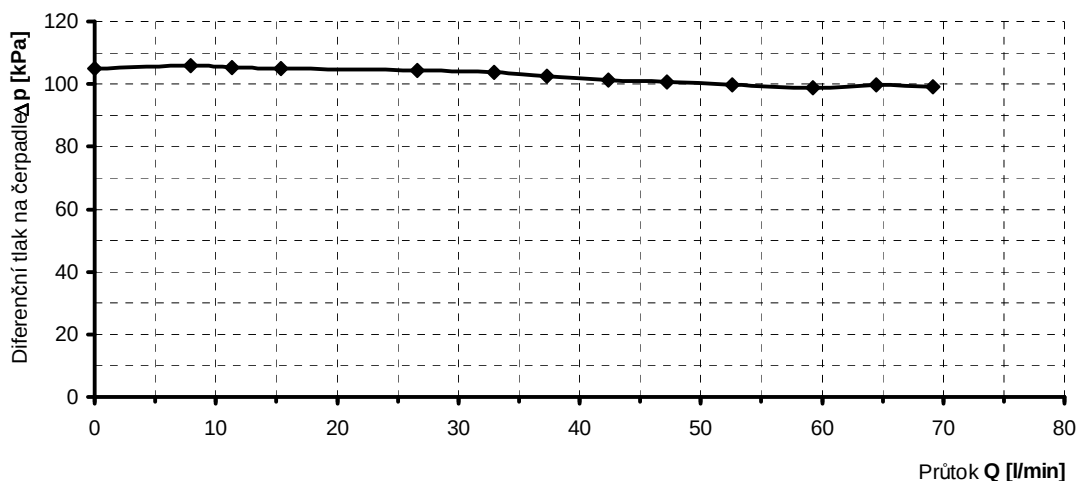
Zdroj: Vlastní zpracování

3.1.2 Režim konstantního diferenčního tlaku čerpadla Stratos

3.1.2.1 Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky

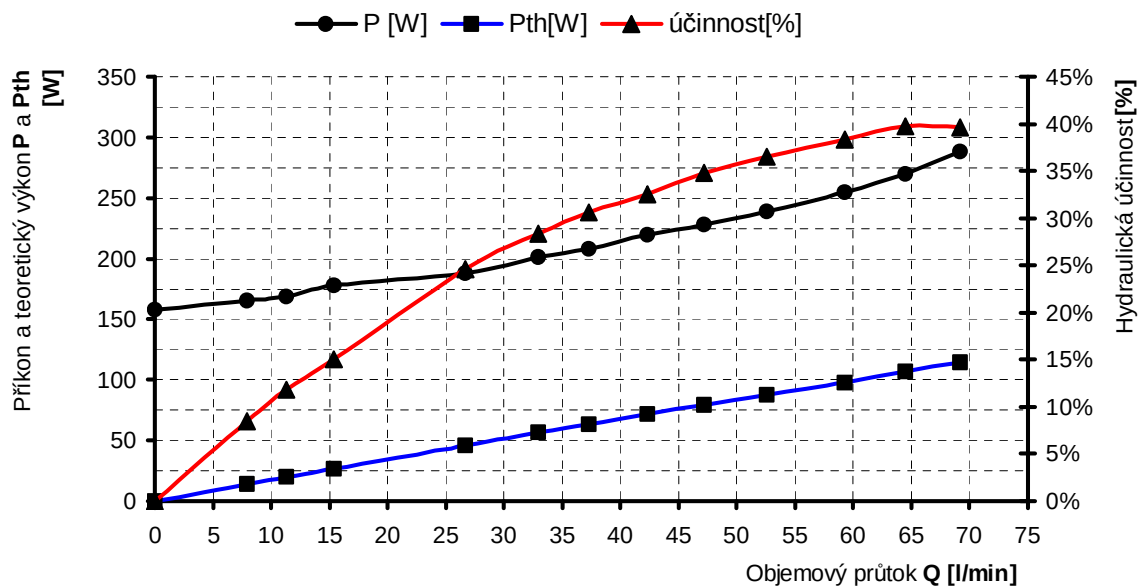
$$H = 11 \text{ [m]}$$

Graf 7.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních diferenčním tlaku



Zdroj: Vlastní zpracování

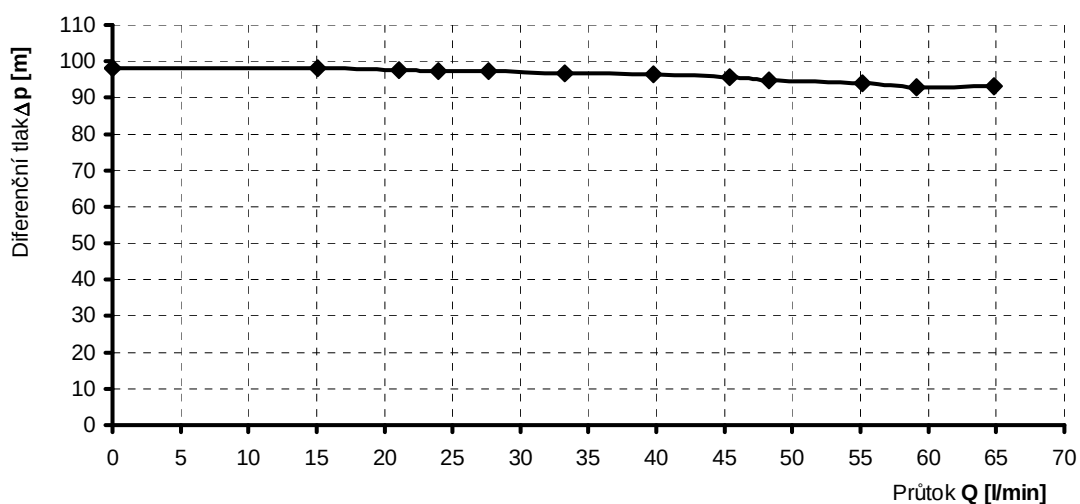
Graf 7.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při nastaveném diferenčním tlaku pro dopravní výšku $H = 11 \text{ [m]}$



Zdroj: Vlastní zpracování

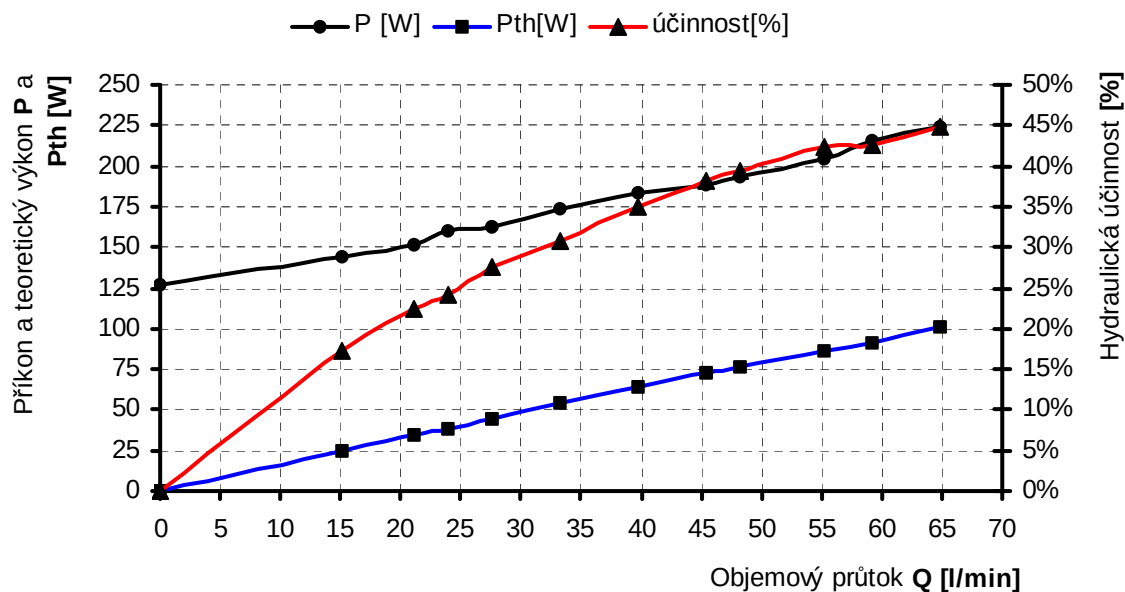
3.1.2.2 Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 10 \text{ [m]}$

Graf 8.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních diferenčním tlaku



Zdroj: Vlastní zpracování

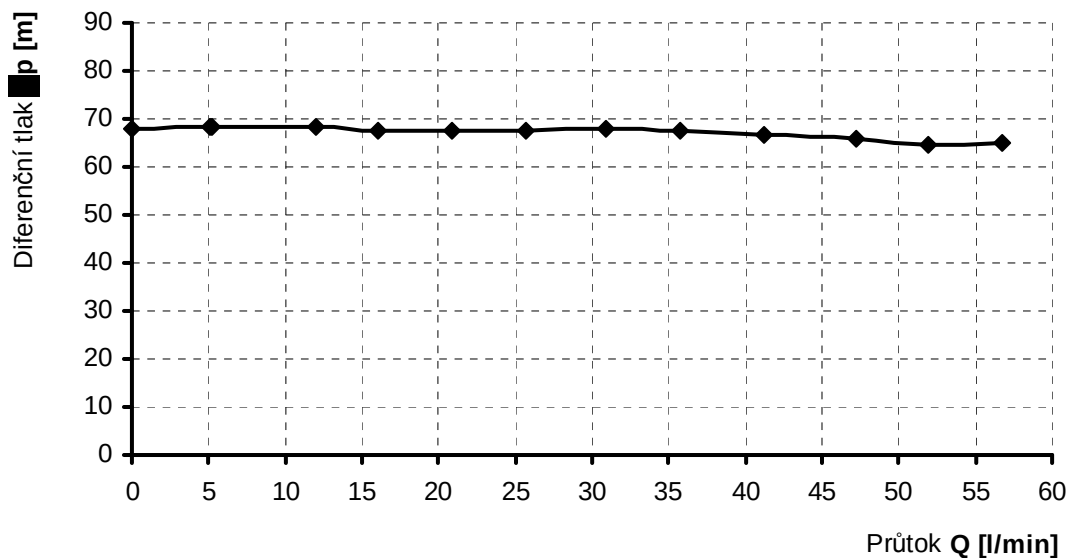
Graf 8.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při nastaveném diferenčním tlaku pro dopravní výšku $H = 10 \text{ [m]}$



Zdroj: Vlastní zpracování

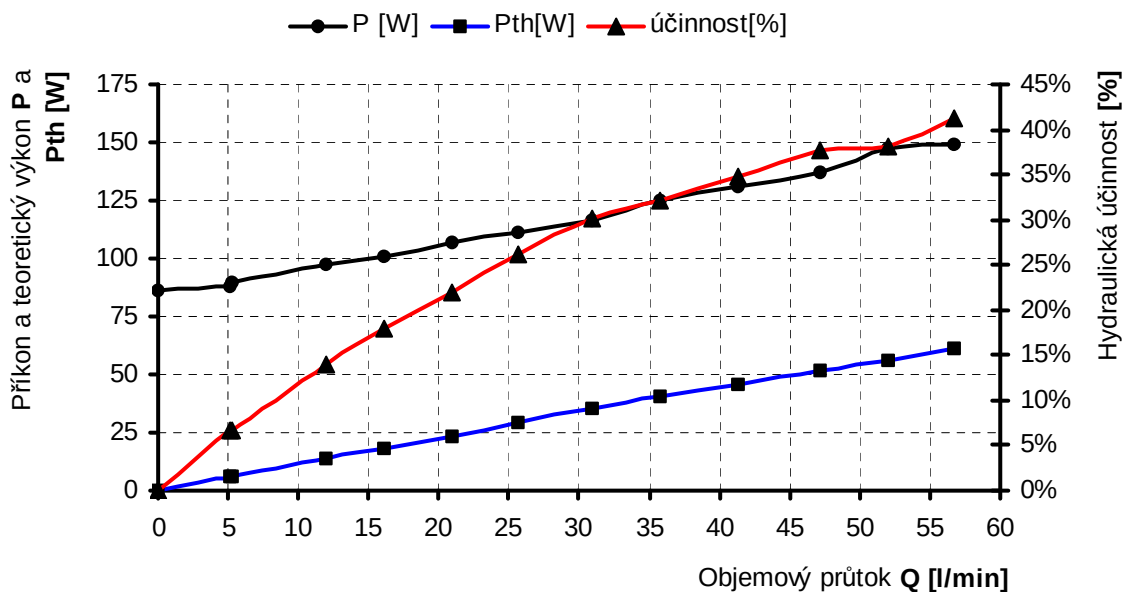
3.1.2.3 Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 7$ [m]

Graf 9.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních diferenčním tlaku



Zdroj: Vlastní zpracování

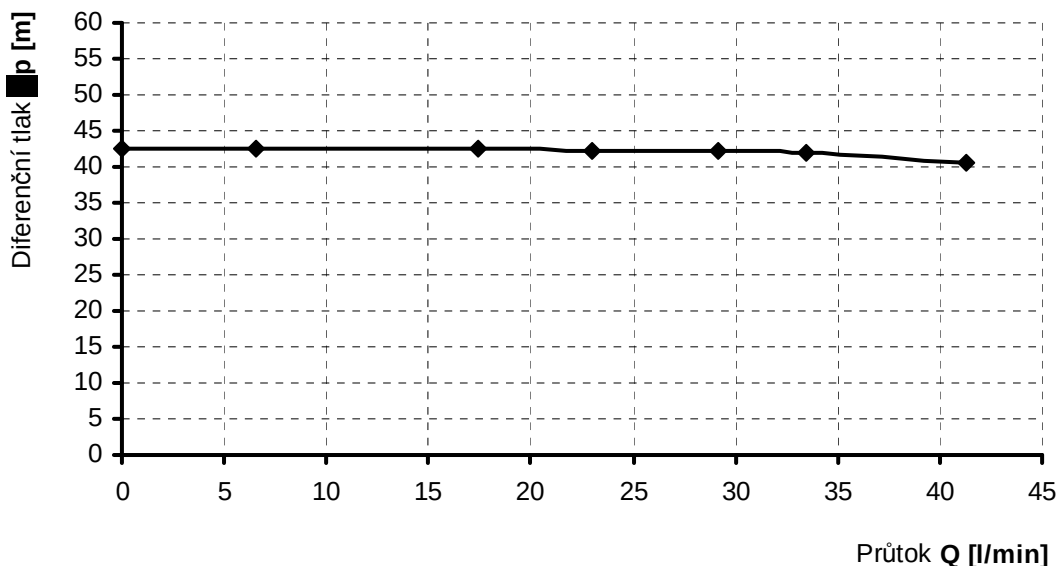
Graf 9.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při nastaveném diferenčním tlaku pro dopravní výšku $H = 7$ [m]



Zdroj: Vlastní zpracování

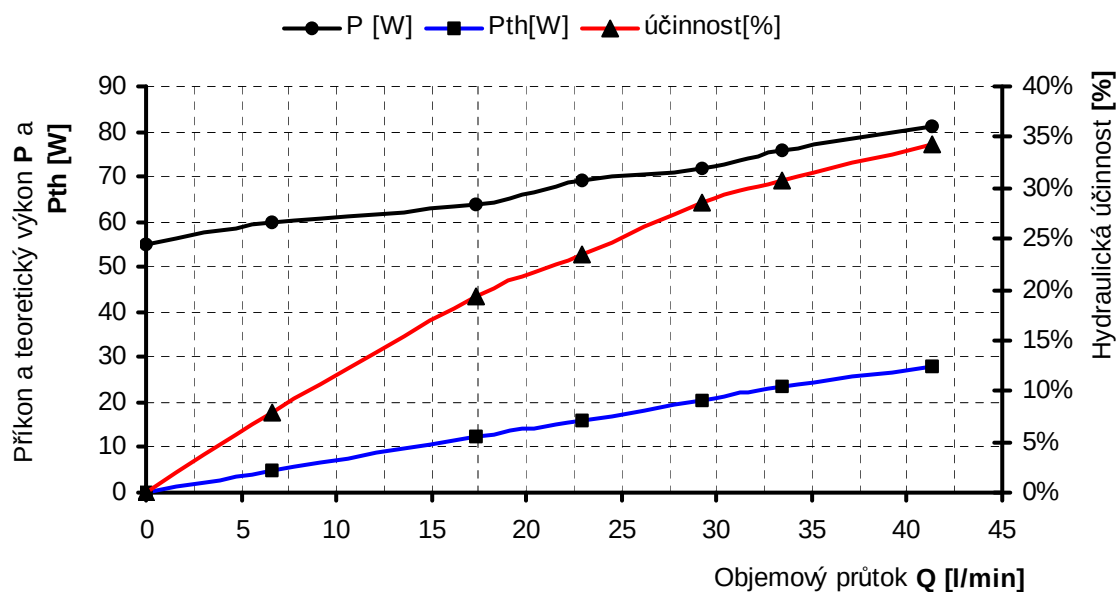
3.1.2.4 Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 4,5 \text{ [m]}$

Graf 10.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních diferenčním tlaku



Zdroj: Vlastní zpracování

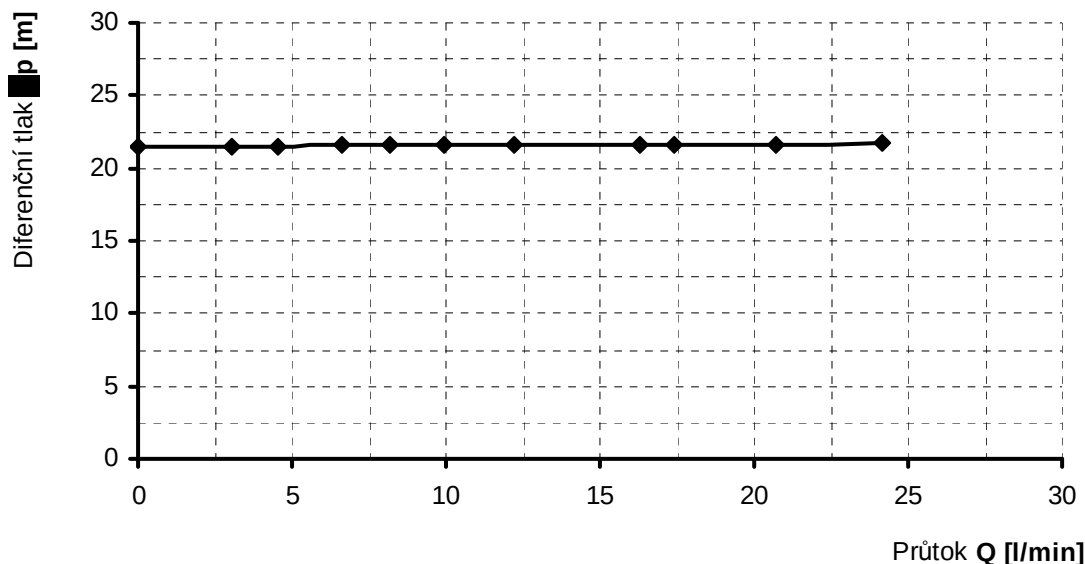
Graf 10.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při nastaveném diferenčním tlaku pro dopravní výšku $H = 4,5 \text{ [m]}$



Zdroj: Vlastní zpracování

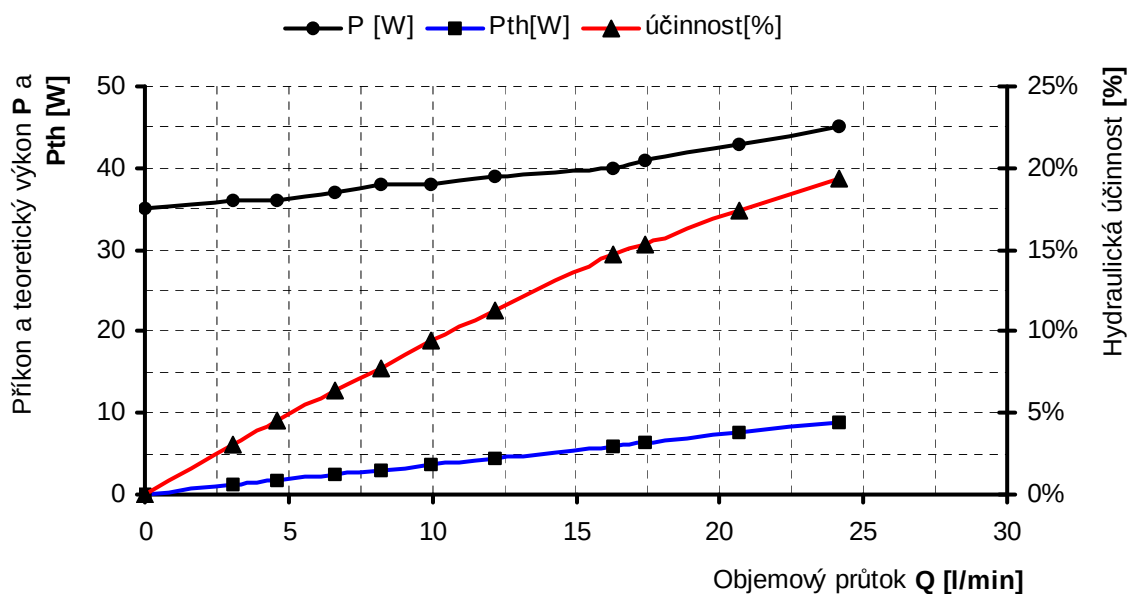
3.1.2.5 Nastavení diferenčního tlaku v podobě konstantní dopravní výšky $H = 2,5 \text{ [m]}$

Graf 11.1. Charakteristika čerpadla Stratos při konstantních diferenčním tlaku



Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 11.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při nastaveném diferenčním tlaku pro dopravní výšku $H = 2,5 \text{ [m]}$

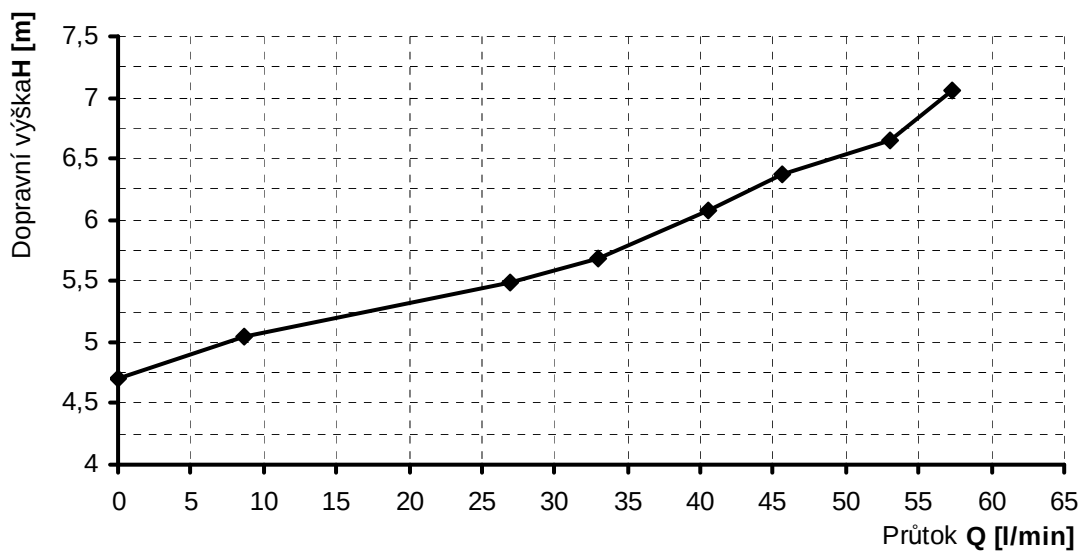


Zdroj: Vlastní zpracování

3.1.3 Režim variabilního diferenčního tlaku čerpadla Stratos

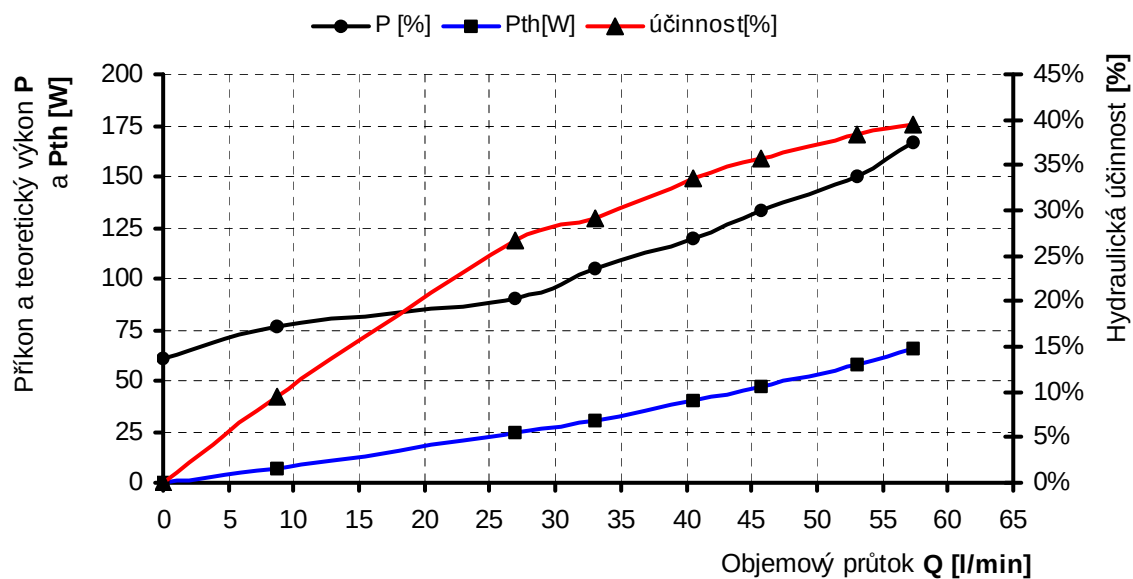
3.1.3.1 Nastavení variabilního diferenčního tlaku v podobě horní hranice požadované dopravní výšky $H = 10$ [m]

Graf 12.1. Charakteristika čerpadla Stratos při variabilním diferenčním tlaku



Zdroj: Vlastní zpracování

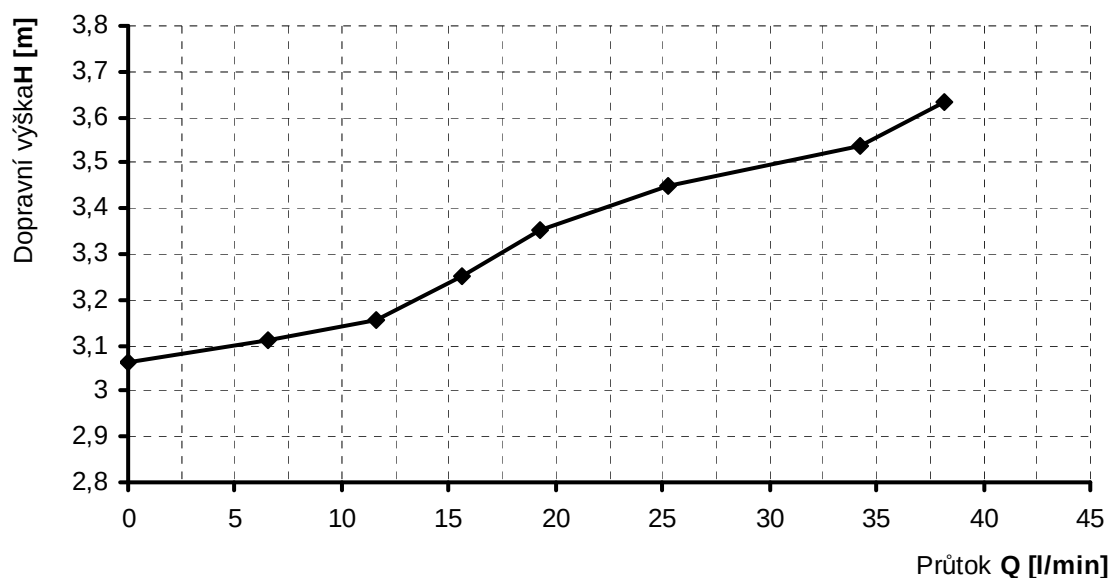
Graf 12.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při nastaveném variabilním diferenčním tlaku pro dopravní výšku $H = 10$ [m]



Zdroj: Vlastní zpracování

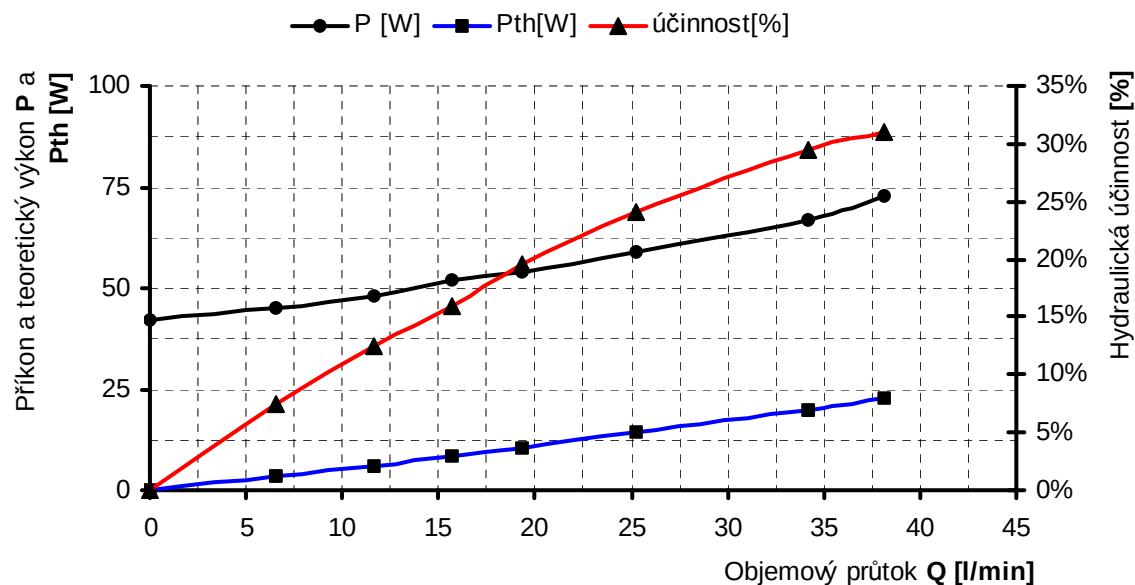
3.1.3.2 Nastavení variabilního diferenčního tlaku v podobě horní hranice požadované dopravní výšky $H = 7$ [m]

Graf 13.1. Charakteristika čerpadla Stratos při variabilním diferenčním tlaku



Zdroj: Vlastní zpracování

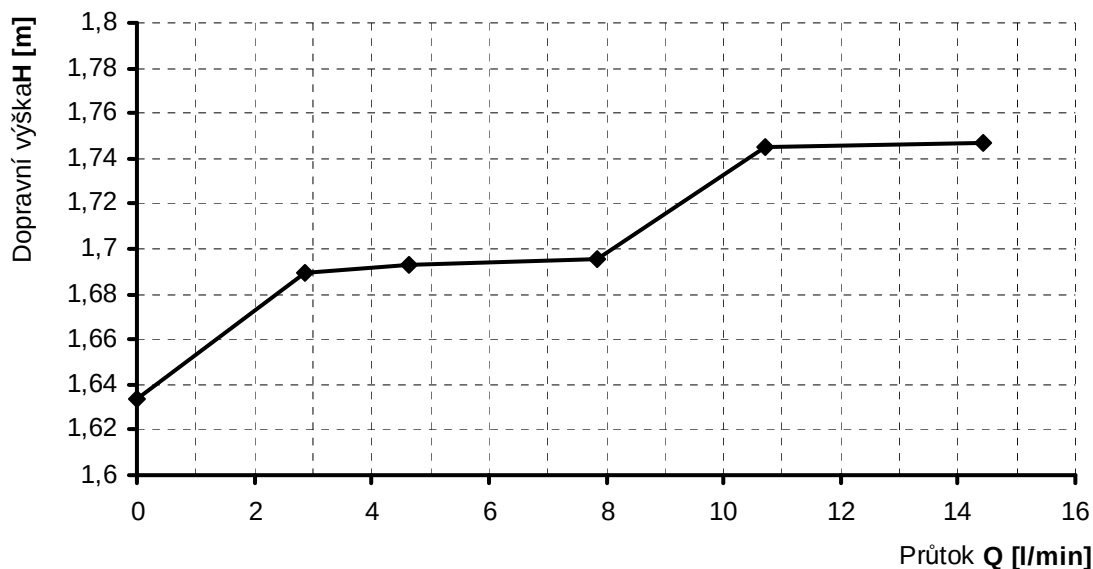
Graf 13.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při nastaveném variabilním diferenčním tlaku pro dopravní výšku $H = 7$ [m]



Zdroj: Vlastní zpracování

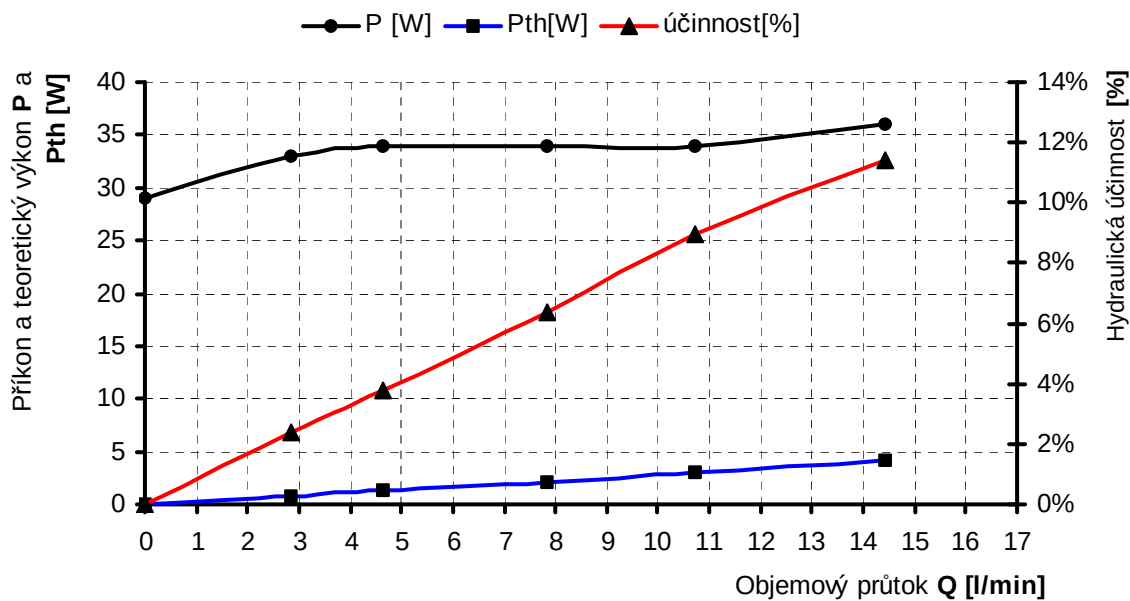
3.1.3.3 Nastavení variabilního diferenčního tlaku v podobě horní hranice požadované dopravní výšky $H = 4$ [m]

Graf 14.1. Charakteristika čerpadla Stratos při variabilním diferenčním tlaku



Zdroj: Vlastní zpracování

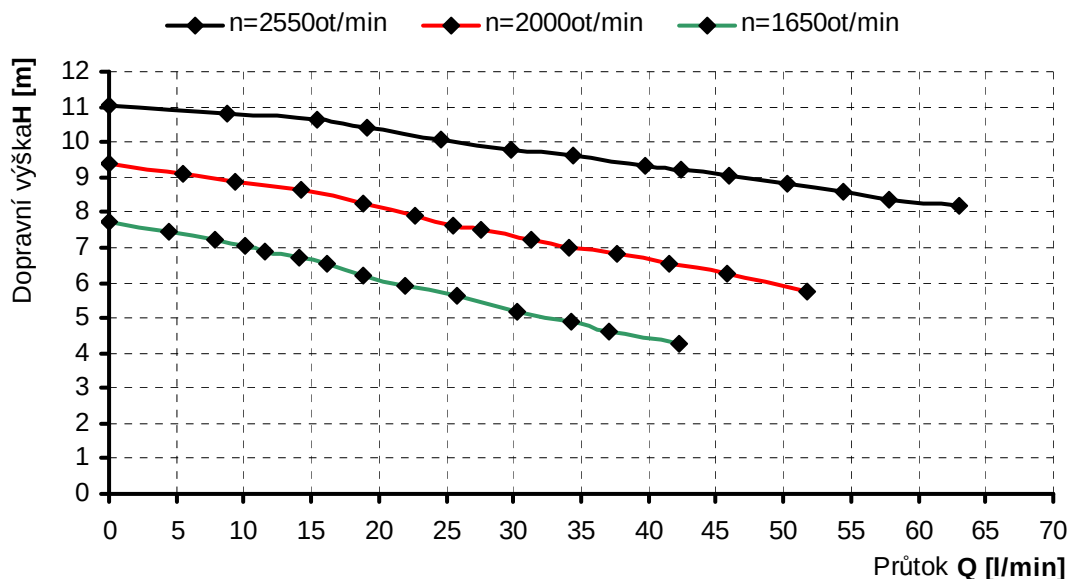
Graf 14.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku při nastaveném variabilním diferenčním tlaku pro dopravní výšku $H = 4$ [m]



Zdroj: Vlastní zpracování

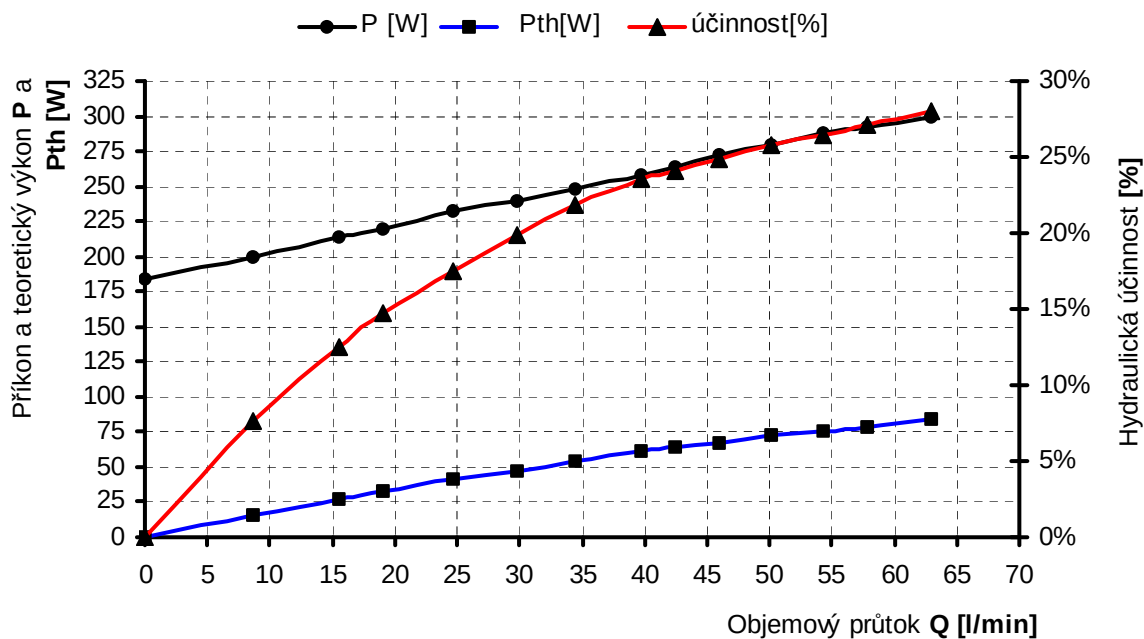
3.2 Měření na čerpadle Wilo Top-S

Graf 15.1. Charakteristiky čerpadla Top-S v různých otáčkách



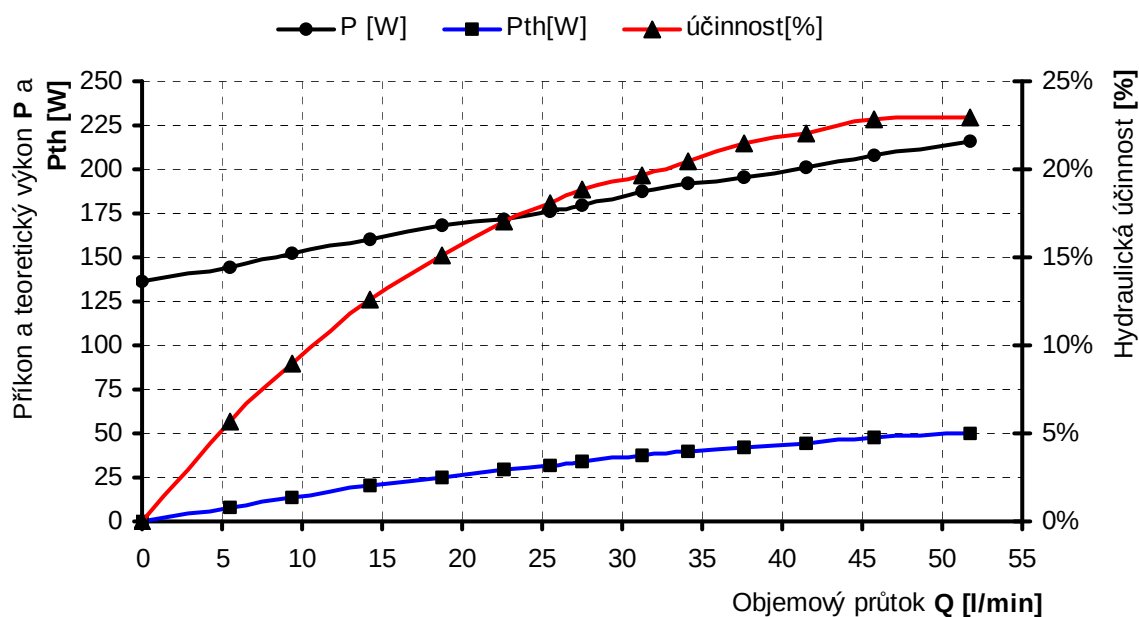
Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 15.2. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku čerpadla Top-S při nastavených otáčkách $n = 2550$ ot/min



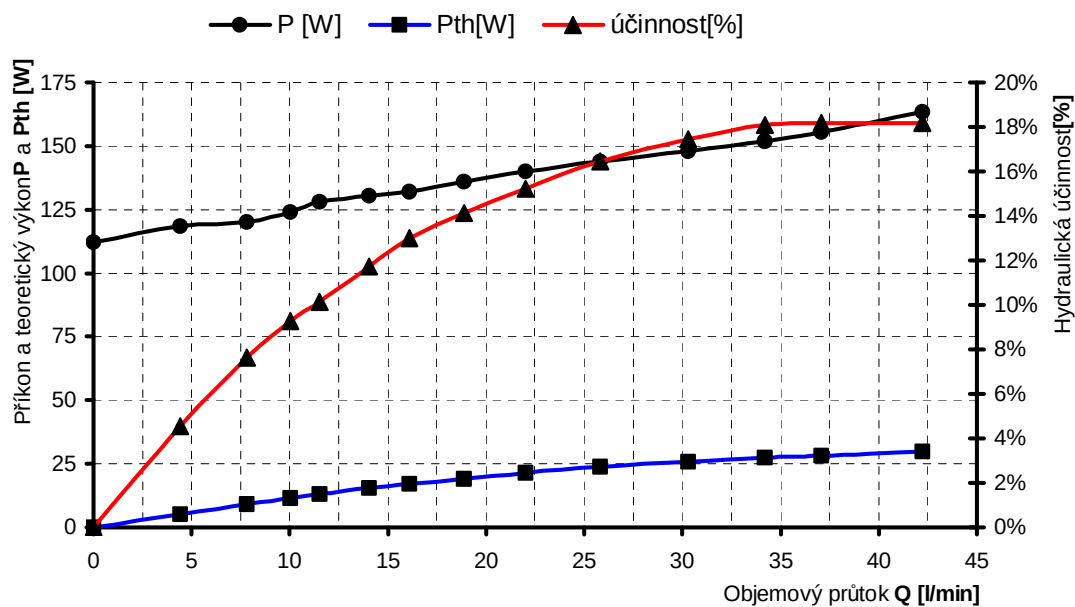
Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 15.3. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku čerpadla Top-S při nastavených otáčkách $n = 2000$ ot/min



Zdroj: Vlastní zpracování

Graf 15.4. Závislost příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku čerpadla Top-S při nastavených otáčkách $n = 1650$ ot/min



Zdroj: Vlastní zpracování

3.3 Rozbor výsledků měření

3.3.1 Čerpadlo Stratos, režim konstantních otáček

Je dobré si povšimnout, že s klesající velikostí otáček, nastavených na čerpadle, se křivka charakteristiky čerpadla postupně zplošťuje, klesá dopravní množství i dopravní výška. Jak už bylo řečeno dříve lze nastavit otáčky v rozmezí $4800 \div 1600$ ot/min. Velikosti těchto otáček odpovídá patřičná dopravní výška, takže jejich nejnižší nastavitelná hodnota byla zjištěna 1930 ot/min. To by odpovídalo dopravní výšce 2,3m, ovšem s tou skutečností, že průtok (dopravované množství vody) je velmi malý. Dále je tu fakt, že hladina v zásobníku s vodou, při plnění sudu, poklesne a zvýší se dopravní výška. U takto malých průtoků se pokles hladiny projeví jako znatelná chyba. Navíc by plnění vázící nádoby trvalo příliš dlouho. Z těchto důvodů bylo měření ukončeno při hodnotách 2000 ot/min. Plochý vzhled křivek charakteristiky čerpadla je při malých otáčkách způsoben málo citlivým manometrem na výtlačném řádu čerpadla. Diferenční tlak při 2000 ot/min činil, něco málo přes 15 kPa což při měření charakteristiky čerpadla manometrem s rozsahem 250 kPa je nedostačující. Dále se na těchto křivkách objevují skoky ve velikosti diferenčního tlaku dané chybou při odečítání z málo jemné stupnice již zmiňovaného manometru.

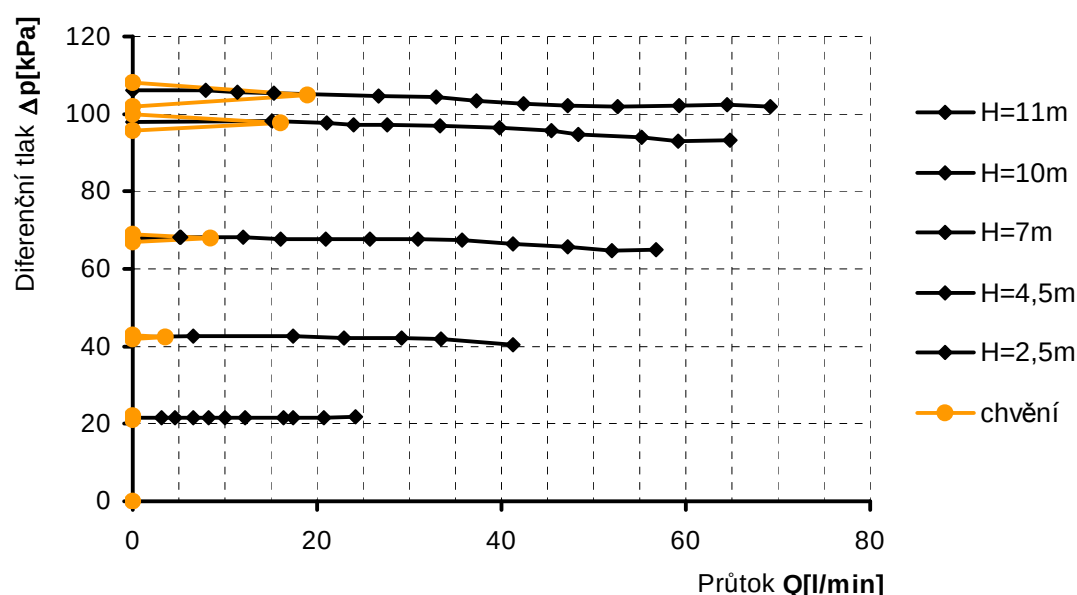
3.3.2 Čerpadlo Stratos, režim konstantního diferenčního tlaku

Nastavení diferenčního tlaku probíhá pomocí volené dopravní výšky. To je výhodné pro praktické užití a pro montážní techniky je srozumitelnější. Jeho rozsah se pohybuje v rozmezí $1,5 \div 11$ [m]. Vzhledem k vlastnostem trati bylo tedy nutné nastavit minimální hodnotu 2,2 [m], s tím, že dopravované množství bylo zanedbatelné a jen těžko měřitelné.

Měření samotné probíhalo opět sestupně, tedy od hodnoty 11[m]. V průběhu škrcení tratě šoupátkem ξ_s diferenční tlak znatelně rostl. Nejvyšší hodnotu měl za zcela uzavřeném šoupátku a jeho hodnota byla asi o deset procent větší než při maximálním průtoku. Je ale možné, že v trati s dopravní výškou těsně pod jedenáct metrů a větší délkou potrubí a tudíž většími ztrátami než na zkušební trati, by se diferenční tlak udržel konstantní. Dalším zvláštním úkazem bylo rozechvění celého systému, jenž se projevilo kolísáním tlaku ve výtlačném řádu. Jelikož neznáme princip elektronického řízení tohoto čerpadla, můžeme se jen domnívat že je to způsobeno

vyhodnocováním nasbíraných informací elektronikou o tlaku na vstupu a výstupu čerpadla. Hydraulické rázy se jeví nepravděpodobné, nejen proto, že nebyly v jiných režimech pozorovány. Chvění se na čerpadle projevovalo přibližně podle hodnot v tabulce 12, příloha 9, což zobrazuje graf 16. Zde jsou společně vyneseny hodnoty nastavených diferenčních tlaků (černě). Oranžové body, ležící na křivkách charakteristik čerpadla, označují místa ve kterých se chvění začalo projevovat a ty jenž leží na souřadnicové ose naznačují velikost kolísání tlaku.

Graf 16. Znázornění počátků a rozsahů chvění v režimu konstantního diferenčního tlaku na čerpadle Stratos



Zdroj: Vlastní zpracování

Při nastavené výšce 2,5 [m], která odpovídala přibližně 22 [kPa] diferenčního tlaku, jsme se samozřejmě potýkali se stejným problémem nedostatečné citlivosti manometru na výtlaku čerpadla, jako v režimu konstantních otáček.

3.3.3 Čerpadlo Stratos, režim variabilního diferenčního tlaku

V režimu variabilního diferenčního tlaku klesá požadovaná hodnota diferenčního tlaku s klesajícím dopravovaným množstvím na polovinu hodnoty obsluhou nastavené. Zadávání hodnot se provádí stejně jako v režimu konstantního diferenčního tlaku pomocí dopravní výšky. Rozsah je stavitelný od 4 [m] do 10[m].

Už z prvního grafu je patrné, že navolíme-li velikost dopravní výšky, nedosáhne hodnota čerpadlem vytvořená na námi zvolenou. V grafu 12.1. velikost diferenčního tlaku způsobí dopravní výšku 7,3 [m] při nastavené maximální hodnotě 10 [m]. To samozřejmě může být způsobeno elektronickou regulací, nebo vlastnostmi tratě. Rychlost odezvy na zvýšení hydraulických odporů tratě (škrcením) byla téměř okamžitá, tzn. během několika vteřin došlo ke změně diferenčního tlaku a opět k jeho ustálení na nové hodnotě. V tomto režimu k chvění nedocházelo.

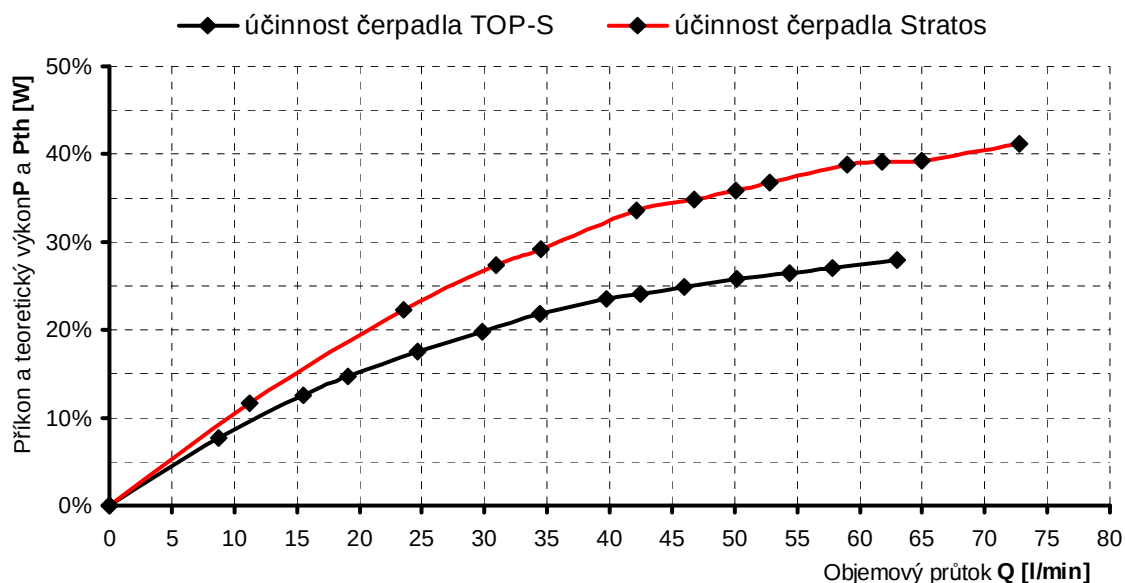
3.3.4 Čerpadlo Top-S

Top-S je čerpadlo s asynchronním motorem bez elektronické regulace. Je nastavitelné do tří stupňů otáček na 1650, 2000, 2550 ot/min. Splňuje očekávané hodnoty dopravní výšky a dopravovaného množství, o kterých informuje výrobce. Charakteristiky čerpadla jednotlivých stupňů otáček jsou vyneseny v grafu v grafu 15.1. Na grafech 15.2. až 15.4 jsou vyneseny závislosti příkonu, teoretického výkonu a účinnosti čerpání.

3.4 Porovnání obou čerpadel

Asi nejdůležitějším porovnáním čerpadel Stratos a Top-S je z hlediska celkové účinnosti dopravování kapaliny. Obě čerpadla jsou hydrodynamická s radiálními oběžnými koly. Obě jsou, jak uvádí výrobce, „mokroběžná“ (viz. kap.2.8.1), konstruovaná na podobné provozní podmínky. Tím však jejich shodnost končí. Čerpadlo Top-S je poháněno asynchronním motorem v základním vybavení zcela bez regulace. Z výroby je stavitelné do tří stupňů otáček. Oproti tomu čerpadlo Stratos je poháněno motorem s elektronickou komutací tzv. EC-motorem, jenž má nižší spotřebu energie při zachování velikosti kroutícího momentu a otáček. Stratos je dále modifikovatelné vnějšími moduly, jimiž je možné pomocí cílené regulace dosáhnout velkých úspor. Tyto moduly však nejsou součástí standardní dodávky, takže měření probíhalo bez nich. I přesto jsou dosti velké rozdíly mezi oběma čerpadly jak je možné vidět z grafu 17., který zobrazuje dvě křivky účinností čerpadel. Obě křivky jsou z měření při maximálním dopravovaném množství.

Graf. 17. Křivky účinností čerpadel Stratos a Top-S



Zdroj: Vlastní zpracování

4 Závěr

Elektronicky řízené čerpadlo Stratos lze bez vnějších modulů nastavit do tří různých regulačních režimů. Ty umožní lépe plnit požadavky na dodávané množství kapaliny a na rychlost odezvy topných a chladících systémů dle přání uživatele. Stratos dosahuje vyšší účinnosti než běžná čerpadla. Má malé rozměry a hmotnost a projevuje se tichým chodem. Patří mezi první elektronicky řízená čerpadla s vysokou účinností, avšak je patrné, že ještě nějaký čas potrvá, než bude dosaženo přesnější regulace. Problém s regulací se pravděpodobně ukázal v režimu konstantního diferenčního v podobě chvění při škrcení. Toto by mohlo být zajímavým tématem dalšího měření. Je třeba však použít citlivější měřicí přístroje, hlavně pak manometry. Bylo by dobré proměřit velikosti amplitud chvění v různých bodech dopravního množství a tlaku. Elektronická čerpadla samozřejmě vyjdou dražší, proto je jejich použití prozatím omezené na větší komplexy topných a chladících systémů. Je tedy na uživateli aby zvážil, zda použít levnější čerpadlo Top-S s celkově vyšší spotřebou a bez možnosti širší regulace, nebo elektronicky řízené čerpadlo, které je dražší.

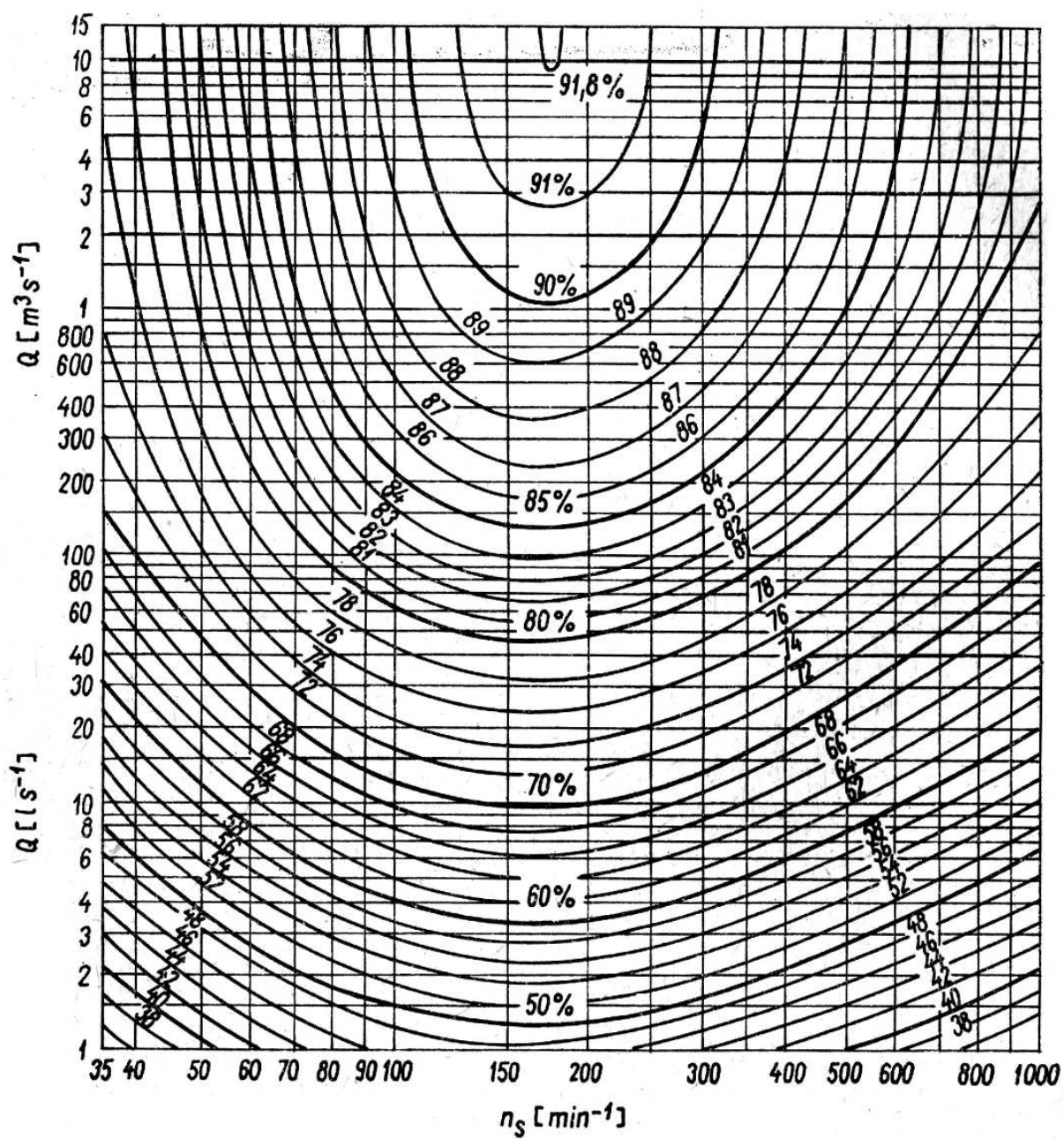
5 Seznam literatury

- [1] Bláha, J., Brada, K.: Příručka čerpací techniky, skripty ČVUT, Praha 1997, ISBN 80-01-01626-9
- [2] Nechleba, M., Hušek, J.: *Hydraulické stroje*. 1.vydání. Praha. SNTL. 1966.
- [3] Mayer, J.: *Energetické stroje*. 1.vydání. SNTL. Praha 1969.
- [4] Pivoňka, J.: *Tekutiny a mechanizmy*. SNTL, Praha 1987.
- [5] Technický týdeník. č.vydání 6. ročník 53. 22.3.2005.
- [6] Šob, F.: *Hydraulické stroje*, VÚT Brno, elektronická skripty, 2003.

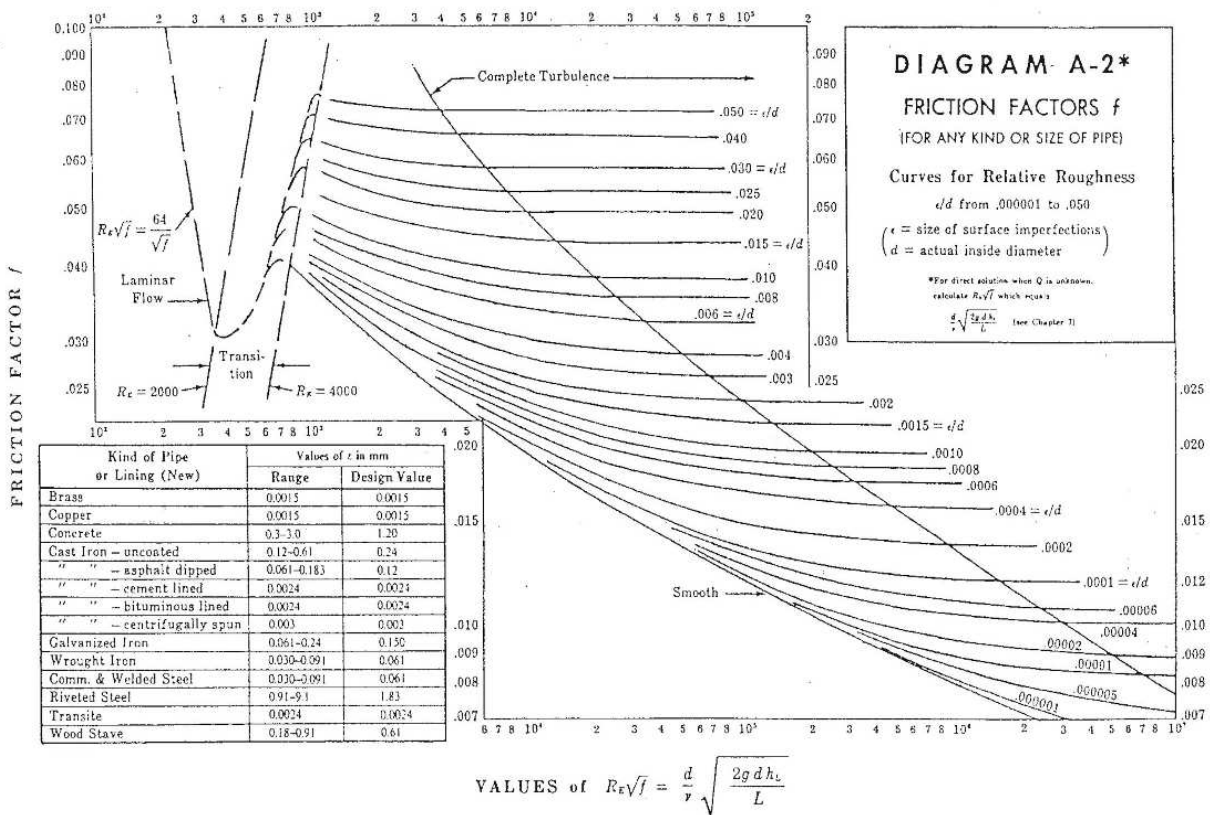
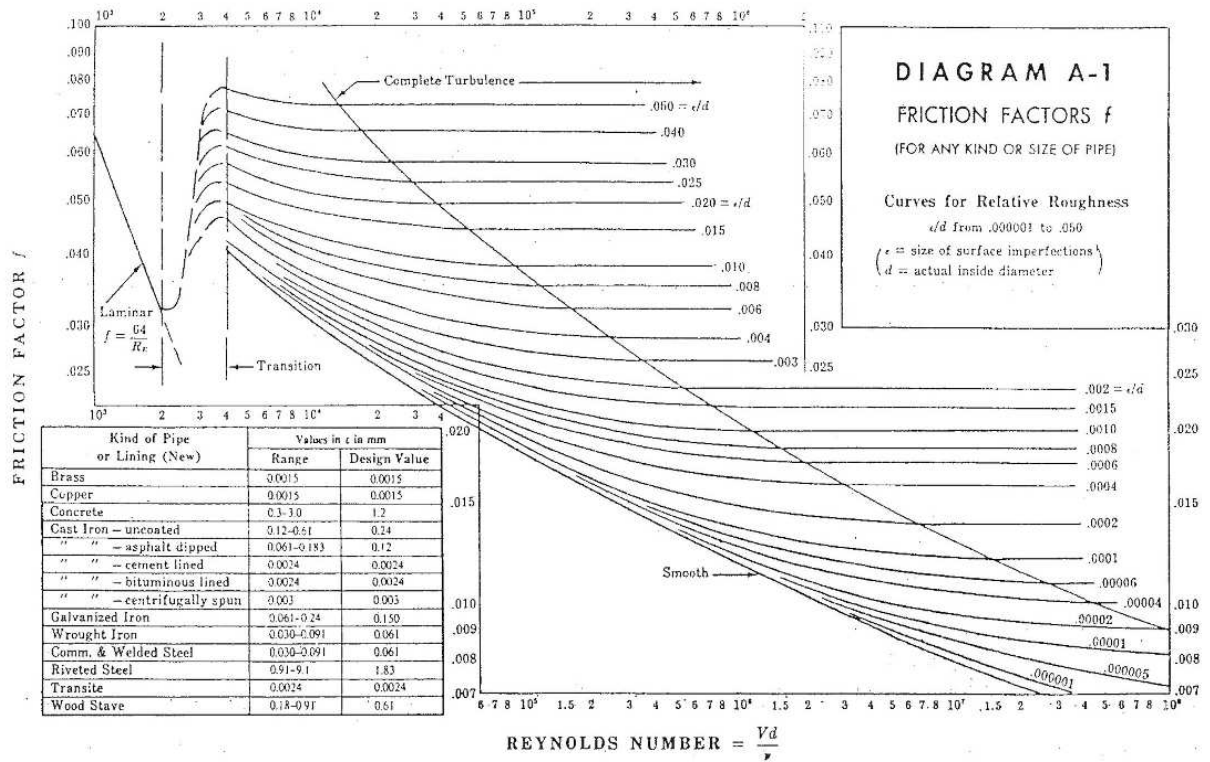
6 Seznam příloh

Příloha č.1	Graf účinností čerpadel podle Erharta
Příloha č.2	Ukázka Nikuradseových diagramů
Příloha č.3	Graf pro zjištění ztrátové výšky známého potrubí
Příloha č.4	Fotografie čerpadlové tratě
Příloha č.5	Fotografie čerpadlové tratě
Příloha č.6	Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu konstantních otáček
Příloha č.7	Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu konstantních otáček
Příloha č.8	Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu konstantního diferenčního tlaku
Příloha č.9	Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu konstantního diferenčního tlaku
Příloha č.10	Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu variabilního diferenčního tlaku
Příloha č.11	Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Top-S
Příloha č.12	Návrh na laboratorní měření na čerpadle Top-S
Příloha č.13	Návrh na laboratorní měření na čerpadle Stratos v režimu konstantního diferenčního tlaku
Příloha č.14	Návrh na laboratorní měření na čerpadle Stratos v režimu variabilního diferenčního tlaku

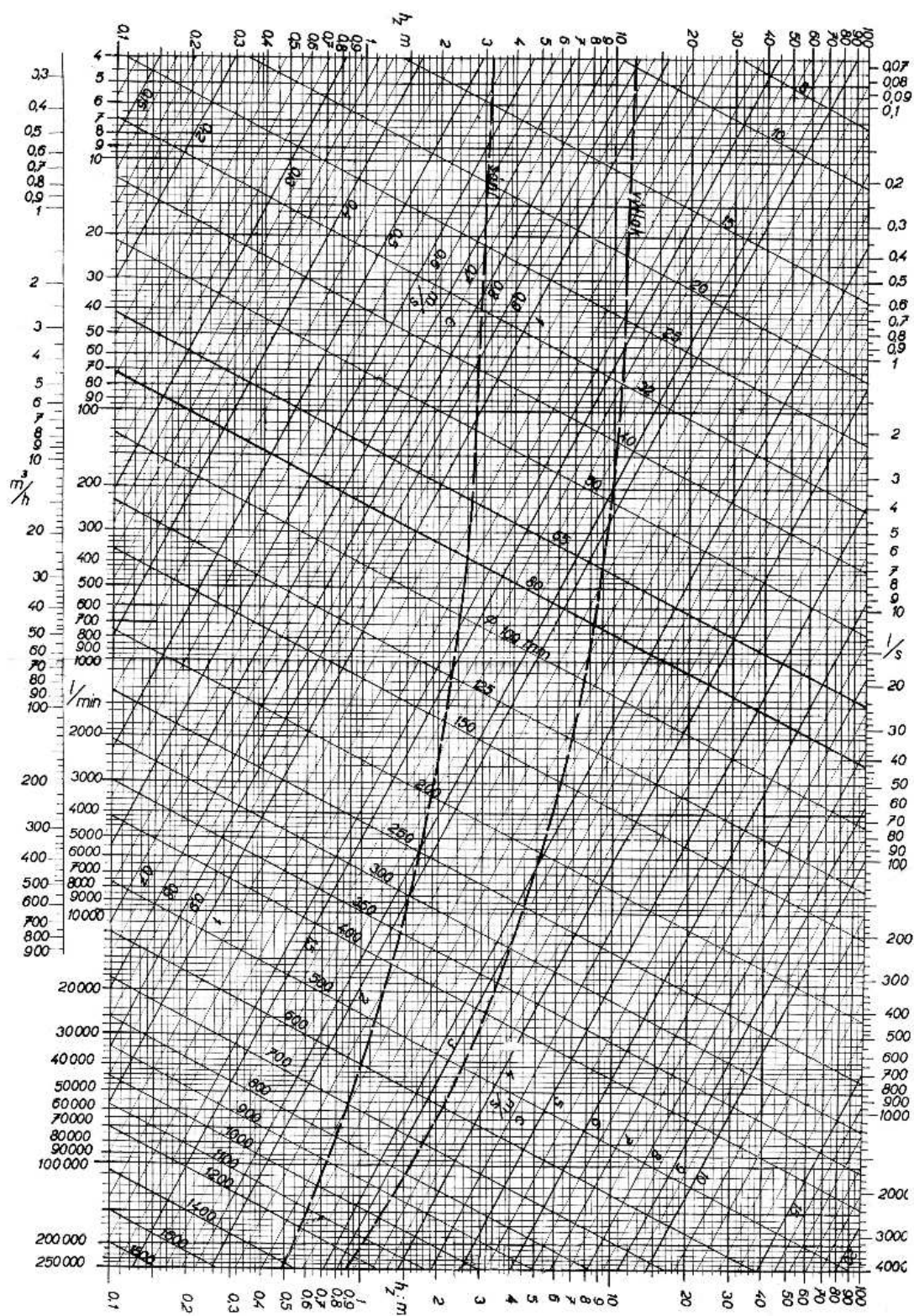
Příloha č.1 Graf účinností čerpadel podle Erharta



Příloha č.2 Ukázka Nikuradseových diagramů



Příloha č.3 Graf pro zjištění ztrátové výšky známého potrubí



Příloha č.4 Fotografie čerpadlové tratě

Foto.1. Vrchní část u-manometru



Foto.2. Šoupátko ξ s sloužící ke seškrcení průtoku



Foto.3. Dvoucestný ventil



Foto.4. Vážící nádoba (sud objemem 100 litrů)



Příloha č.5 Fotografie čerpadlové tratě

Foto.5. Multimetr určený k měření příkonu čerpadla Stratos



Foto.6. Manometr měřící tlak na výstupu čerpadla



Příloha č.6 Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu konstantních otáček

Tab.1. Naměřené hodnoty v režimu konstantních otáček při $n = 4800$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,162	0,138	0,125	0,105	0,094	0,082	0,07
tlak p	p2 [kPa]	108	108,5	109	110	110,5	111	111,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	121,7	121,5	121,5	123,0	121,5	121,2	121,2
naměřený čas plnění	t [s]	100	108	116	126	133	143	152
příkon čerpadla	P[W]	328	300	289	274	262	259	251

číslo měření		8	9	10	11	12	13
odlehlost hladin	h[m]	0,06	0,048	0,034	0,013	0,006	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	112	112	111,5	111	110	109
hmotnost vody v sudu	m [kg]	121,2	121	121,1	121,2	121,6	0
naměřený čas plnění	t [s]	172	190	230	432	867	0
příkon čerpadla	P[W]	241	224	212	187	172	165

Tab.2. Naměřené hodnoty v režimu konstantních otáček při $n = 4500$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,135	0,127	0,122	0,109	0,087	0,075	0,06
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	94	94,5	95	96	96,5	97	97,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	58,5	58,0	58,0	59,5	59,0	58,5	58,0
naměřený čas plnění	t [s]	55	57	59	64	72	78	86
příkon čerpadla	P[W]	257	252	248	239	225	215	206

číslo měření		8	9	10	11	12	13
odlehlost hladin	h[m]	0,055	0,045	0,035	0,03	0,024	0,016
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5	97,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	58,5	58,5	58	58	58,5	58,5
naměřený čas plnění	t [s]	92	104	117	129	150	198
příkon čerpadla	P[W]	203	193	184	179	175	164

Tab.3. Naměřené hodnoty v režimu konstantních otáček při $n = 4000$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,107	0,094	0,081	0,067	0,057	0,043	0,029
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	73,2	74	74,5	75	75,5	75,5	75,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	58,5	65,8	60,2	67,5	58,0	62,0	58,0
naměřený čas plnění	t [s]	60	72	72	88	85	106	121
příkon čerpadla	P[W]	189	181	173	168	159	150	139

číslo měření		8	9	10	11	12	13
odlehlost hladin	h[m]	0,026	0,015	0,008	0,005	0,005	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	75,5	75	74,5	74	74	73,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	68,8	59	64	59	0	0
naměřený čas plnění	t [s]	157	185	326	616	0	0
příkon čerpadla	P[W]	135	125	116	109	109	101

Příloha č.7 Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu konstantních otáček

Tab.4. Naměřené hodnoty v režimu konstantních otáček při $n = 3300$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,067	0,058	0,047	0,039	0,031	0,022	0,018
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	48,8	49	49,5	50	50	50	50
hmotnost vody v sudu	m [kg]	62,5	61,5	66,0	64,0	61,7	62,0	62,4
naměřený čas plnění	t [s]	82	88	104	111	125	146	173
příkon čerpadla	P[W]	110	107	100	96	93	87	83

číslo měření		8	9	10	11	12
odlehlost hladin	h[m]	0,015	0,01	0,007	0,005	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	50	49,5	49	49	48,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	64	61,3	58,7	61,2	0
naměřený čas plnění	t [s]	202	263	369	565	0
příkon čerpadla	P[W]	80	78	74	70	67

Tab.5. Naměřené hodnoty v režimu konstantních otáček při $n = 2550$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,029	0,026	0,02	0,014	0,011	0,009	0,006
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	26,5	26,75	27	27,25	27,5	27,5	27,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	62,0	64,0	61,3	62,2	64,7	62,2	62,7
naměřený čas plnění	t [s]	124	135	153	199	234	270	352
příkon čerpadla	P[W]	54	53	51	49	47	46	45

číslo měření		8	9	10	11	12
odlehlost hladin	h[m]	0,0055	0,005	0,003	0,002	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	27,25	27,25	27,25	27	27
hmotnost vody v sudu	m [kg]	62,7	63,2	0	0	0
naměřený čas plnění	t [s]	399	483	4,19	7,67	0
příkon čerpadla	P[W]	45	44	43	42	42

Tab.6. Naměřené hodnoty v režimu konstantních otáček při $n = 2000$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,004	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,0015
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	15	15	15	15	15	15	15
průtok	Q[l/min]	9,3	8,1	7,6	5,9	5,1	4,5	3,8
příkon čerpadla	P[W]	33	33	33	33	32	31	30

číslo měření		8	9	10	11	12
odlehlost hladin	h[m]	0,001	0,001	0,0005	0	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	15	15	15	15	15
průtok	Q [m3/s]	3,2	2,3	1,3	0,8	0
příkon čerpadla	P[W]	29	29	29	28	28

Příloha č.8 Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu konstantního diferenčního tlaku

Tab.7. Naměřené hodnoty v režimu konstantních diferenčního tlaku pro H = 11 [m]

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,151	0,133	0,11	0,089	0,071	0,059	0,046
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	100,5	101,2	100	100,5	101,5	102	103
hmotnost vody v sudu	m [kg]	63,3	62,2	70,0	63,0	66,0	62,0	64,5
naměřený čas plnění	t [s]	55	58	71	72	84	88	104
příkon čerpadla	P[W]	288	270	255	239	228	220	208

číslo měření		8	9	10	11	12	13
odlehlost hladin	h[m]	0,035	0,025	0,016	0,008	0,005	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	104	104,5	105,2	105,5	105,8	105
hmotnost vody v sudu	m [kg]	64,7	62,5	61	61,6	58,7	0
naměřený čas plnění	t [s]	118	141	239	327	446	0
příkon čerpadla	P[W]	201	188	178	169	165	158

Tab.8. Naměřené hodnoty v režimu konstantních diferenčního tlaku pro H = 10 [m]

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,124	0,102	0,087	0,07	0,061	0,049	0,034
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	92	92	93	94	95	96	96,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	69,0	31,5	61,5	45,0	38,5	41,0	41,0
naměřený čas plnění	t [s]	64	32	67	56	51	62	74
příkon čerpadla	P[W]	224	215	204	193	189	183	174

číslo měření		8	9	10	11	12
odlehlost hladin	h[m]	0,025	0,021	0,012	0,009	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	97	97	97,5	98	98
hmotnost vody v sudu	m [kg]	57	62,5	58,5	52,5	0
naměřený čas plnění	t [s]	124	157	167	209	0
příkon čerpadla	P[W]	163	160	152	144	127

Tab.9. Naměřené hodnoty v režimu konstantních diferenčního tlaku pro H = 7 [m]

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,0869	0,078	0,065	0,05	0,036	0,029	0,021
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	64	64	65	66	67	67,5	67,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	51,0	51,0	56,5	51,5	53,5	52,5	53,5
naměřený čas plnění	t [s]	54	59	72	75	90	102	125
příkon čerpadla	P[W]	149	147	137	131	125	116	111

číslo měření		8	9	10	11	12	13
odlehlost hladin	h[m]	0,013	0,01	0,07	0,03	0,02	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	67,5	67,5	67,5	68	68	68
hmotnost vody v sudu	m [kg]	52,5	54,5	52,5	0	0	0
naměřený čas plnění	t [s]	151	204	264	0	0	0
příkon čerpadla	P[W]	107	101	97	90	88	86

Příloha č.9 Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu konstantního diferenčního tlaku

Tab.10. Naměřené hodnoty v režimu konstantních diferenčního tlaku pro $H = 4,5$ [m]

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h [m]	0,049	0,032	0,024	0,016	0,01	0,006	0
tlak na výtlaku	p_2 [kPa]	40	41,5	42	42	42,5	42,5	42,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	51,5	58,5	51,5	48,5	51,5	0,0	0,0
naměřený čas plnění	t [s]	75	105	106	127	178	0	0
příkon čerpadla	P [W]	81	76	72	69	64	60	55

Tab.11. Naměřené hodnoty v režimu konstantních diferenčního tlaku pro $H = 2,5$ [m]

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h [m]	0,022	0,017	0,014	0,01	0,007	0,007	0,006
tlak na výtlaku	p_2 [kPa]	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	47,0	46,5	56,5	47,5	45,0	50,0	51,5
naměřený čas plnění	t [s]	117	135	195	175	222	302	377
příkon čerpadla	P [W]	45	43	41	40	39	38	38

číslo měření		8	9	10	11
odlehlost hladin	h [m]	0,005	0,003	0,002	0
tlak na výtlaku	p_2 [kPa]	21,5	21,5	21,5	21,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	27	0	0	0
naměřený čas plnění	t [s]	246	0	0	0
příkon čerpadla	P [W]	37	36	36	35

Tab.12. Zaznamenané chvění v režimu konstantního diferenčního tlaku
(hodnoty průtoku odpovídají okamžiku kdy se chvění začalo projevovat a hodnoty diferenčního tlaku vytvořené čerpadlem s hodnotami velikostí chvění odpovídají maximální rozkmitu při nulovém průtoku)

nastavená dopravní výška		$H=11$ [m]	$H=10$ [m]	$H=7$ [m]	$H=4,5$ [m]	$H=2,5$ [m]
průtok	Q [l/min]	18,947	16	8,425	3,5	0,05
diferenční tlak	Δp [kPa]	105	97,8	68	42,5	21,5
velikost chvění	[kPa]	± 3	± 2	± 1	$\pm 0,5$	0

Příloha č.10 Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Stratos v režimu variabilního diferenčního tlaku

Tab.12. Naměřené hodnoty v režimu variabilního diferenčního tlaku pro $H = 10$ [m]

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,097	0,086	0,065	0,05	0,039	0,024	0,012
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	70	66	63	60	56	54	49,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	42,0	60,0	58,5	60,0	51,0	60,0	59,0
naměřený čas plnění	t [s]	44	68	77	89	93	134	407
příkon čerpadla	P[W]	167	150	133	120	105	90	76

číslo měření		8
odlehlost hladin	h[m]	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	46
hmotnost vody v sudu	m [kg]	0
naměřený čas plnění	t [s]	0
příkon čerpadla	P[W]	61

Tab.13. Naměřené hodnoty v režimu variabilního diferenčního tlaku pro $H = 7$ [m]

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,044	0,038	0,024	0,017	0,016	0,012	0,004
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	36	35	34	33	32	31	30,5
hmotnost vody v sudu	m [kg]	61,0	61,5	61,0	61,0	62,5	60,0	61,5
naměřený čas plnění	t [s]	96	108	145	190	240	310	563
příkon čerpadla	P[W]	73	67	59	54	52	48	45

číslo měření		8
odlehlost hladin	h[m]	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	30
hmotnost vody v sudu	m [kg]	0
naměřený čas plnění	t [s]	0
příkon čerpadla	P[W]	42

Tab.14. Naměřené hodnoty v režimu variabilního diferenčního tlaku pro $H = 4$ [m]

číslo měření		1	2	3	4	5	6
odlehlost hladin	h[m]	0,011	0,009	0,008	0,008	0,005	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	17	17	17	16,5	16,5	16
hmotnost vody v sudu	m [kg]	48,5	51,0	0,0	0,0	0,0	0,0
naměřený čas plnění	t [s]	202	286	0	0	0	0
příkon čerpadla	P[W]	36	34	34	34	33	29

Příloha č.11 Tabulky naměřených hodnot na čerpadle Top-S

Tab.15. Naměřené hodnoty čerpadla Top-S při otáčkách $n = 2550$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,109	0,098	0,085	0,074	0,063	0,054	0,047
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	81	83	85	87	89	90,5	92
naměřený čas plnění	t [s]	62,0	66,0	68,0	76,0	85,0	87,0	96,0
hmotnost vody v sudu	m [kg]	65	63,5	61,5	63,5	65	61,5	63,5
příkon čerpadla	P[W]	300	292	288	280	272	264	257,5

číslo měření		8	9	10	11	12	13	14
odlehlost hladin	h[m]	0,037	0,029	0,02	0,013	0,01	0,004	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	94,5	96	99	102	104	106	108
naměřený čas plnění	t [s]	109	126	157	198	264	0	0
hmotnost vody v sudu	m [kg]	62,5	62,5	64,5	63	68	0	0
příkon čerpadla	P[W]	248	240	232	220	214	200	184

Tab.16. Naměřené hodnoty čerpadla Top-S při otáčkách $n = 2000$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,053	0,038	0,03	0,02	0,013	0,009	0,003
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	57	62	64	67	69	71	74
hmotnost vody v sudu	m [kg]	64,5	62,5	70,5	64,5	62,5	65,0	65,0
naměřený čas plnění	t [s]	75	82	102	103	110	125	142
příkon čerpadla	P[W]	216	208	201,5	196	192	188	180

číslo měření		8	9	10	11	12	13
odlehlost hladin	h[m]	0	0	0	0	0	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	75	77,5	81	85	87	89
hmotnost vody v sudu	m [kg]	69,5	64,5	66,5	66,5	62	0
naměřený čas plnění	t [s]	164	171	213	280	398	0
příkon čerpadla	P[W]	176	172	168	160	152	144

Tab.17. Naměřené hodnoty čerpadla Top-S při otáčkách $n = 1650$ ot/min

číslo měření		1	2	3	4	5	6	7
odlehlost hladin	h[m]	0,026	0,023	0,019	0,015	0,013	0,01	0,006
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	42	45,5	48	51	55	58	61
hmotnost vody v sudu	m [kg]	66,0	68,5	70,0	68,5	64,0	67,0	63,5
naměřený čas plnění	t [s]	94	111	123	136	149	183	202
příkon čerpadla	P[W]	163,3	155,5	152	148	144	140	136

číslo měření		8	9	10	11	12	13
odlehlost hladin	h[m]	0,003	0	0	0	0	0
tlak na výtlaku	p2 [kPa]	64	65,5	67,5	69	70,5	73
hmotnost vody v sudu	m [kg]	63,5	63,5	63	68,5	63,5	0
naměřený čas plnění	t [s]	237	272	328	411	488	0
příkon čerpadla	P[W]	132	130,4	128	124	120	118,4

MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK NA Odstředivém čerpadle TOP-S

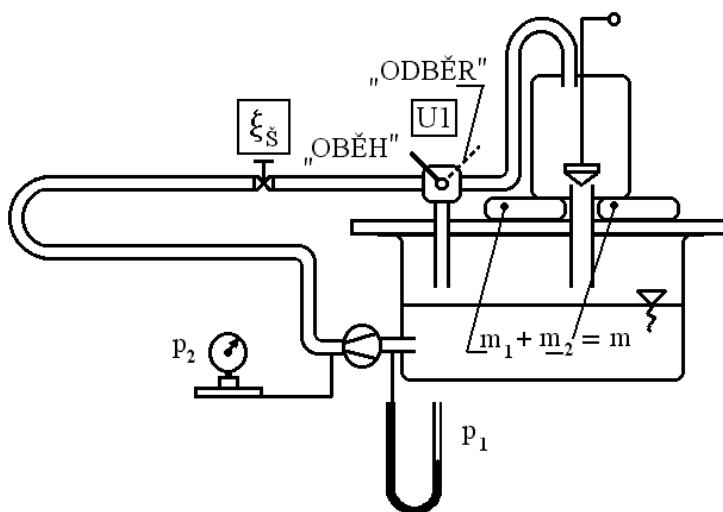
Zadání:

Naměřte tlakové difference v závislosti na velikosti průtoku na odstředivém čerpadle Top-S a změřte příkon čerpadla. Vypočítejte teoretický výkon potřebný k dopravování kapaliny a účinnost čerpání. Vyneste do grafů závislosti diferenčního tlaku na průtoku, příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku.

Popis zařízení:

Čerpadlo Top-S je radiální odstředivé čerpadlo nastavitelné na tři stupně otáček 2550, 2000, 1650 ot/min. Je umístěné na trati o délce okolo 13 metrů a vnitřním průměru hladkého měděného potrubí $d = 37$ [mm]. Na sacím potrubí ve vzdálenosti větší než $5d$ je připojený u-manometr na měření podtlaku. Na výtlačném potrubí je umístěn ručkový manometr pro měření přetlaku. Škrcení systému se provádí šoupátkem ξ_s , přepínání odběru a oběhu dvoucestným ventilem U1. Pro měření průtoku slouží stopky a vážící nádoba (sud) s celkovým objemem $0,1$ [m³], který je postaven na dvou vahách. Příkon čerpadla se odečte na wattmetru měřícího kufru Metra.

Schéma zařízení:



Použité přístroje:	Čerpadlo Top-S 30/10 firmy WILO
	Ručkový manometr, 0÷250 kPa DK2394
	U-manometr skleněný DKP 9642
	Váhy (2-krát), 0÷130kg Luxa 3
	Měřící kufr, Metra ZP5 / 736
	Stopky

Postup měření:

1. Přesvědčte se, že není vážící nádoba uzavřena. Odečtěte výšku hladiny na u-manometru (tato hodnota bude sloužit pro výpočet odlehlosti hladin). Přepněte ventil U1 do polohy „OBĚH“ a šoupátko ξ_s úplně otevřete.

2. Zapněte čerpadlo. Nechte průtok ustálit po dobu asi jedné minuty. Uzavřete vázící nádobu a přepněte ventil U1 na „ODBĚR“. V okamžiku, kdy začne vtékat voda do sudu začněte měřit čas.
3. V průběhu plnění sudu odečtěte hodnoty tlaku p_{2m} , odlehlost hladin u-manometru a příkon čerpadla.
4. Je-li sud alespoň z poloviny naplněn můžete přepnout ventil U1 zpět na „OBĚH“ a stopky zastavte až přestane voda vtékat do sudu. Odečtěte čas a hmotnost vody a sud vyprázdněte.
5. Snižte průtok šoupátkem ξ_s nejlépe podle u-manometru, kde se projeví zmenšováním odlehlosti hladin, tak aby jste mohli provést nejméně deset měření.
6. Celý postup opakujte vždy pro odlišné průtoky až do úplného uzavření šoupátka.
7. Naměřené hodnoty zpracujte do tabulek a vynesete do grafů.

Výpočtové vztahy:

Tlak na sání: $p_{1m} = h \cdot \rho \cdot g$ [Pa]

kde h [m] je odlehlost hladin zjištěná z u-manometru, ρ [kg/m³] hustota vody
při dané teplotě (berte $\rho = 998,3$ kg/m³) a g [m/s²] gravitační zrychlení.

Diferenční tlak na čerpadle:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (p_a + p_{2m}) - (p_a - p_{1m}) = p_{2m} + p_{1m} \quad [\text{Pa}]$$

kde p_1 a p_2 jsou absolutní tlaky a p_a je atmosférický tlak

Teoretický výkon: $P_{th} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H$ [Pa]

Zde je Q [m³/s] průtok a H [m] manometrická dopravní výška (!pro každý průtok je její hodnota jiná).

Účinnost čerpání: $\eta = P_{th}/P$ [-]

kde P [W] jsou odečtené hodnoty příkonu čerpadla

Poznámky:

Hodnotu odlehlosti hladin na u-manometru odečítejte až po přepnutí ventilu U1 do polohy „ODBĚR“ aby nedocházelo k chybám. Zanedbejte hydraulické odpory tratě.

MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK NA Odstředivém ČERPADLE STRATOS

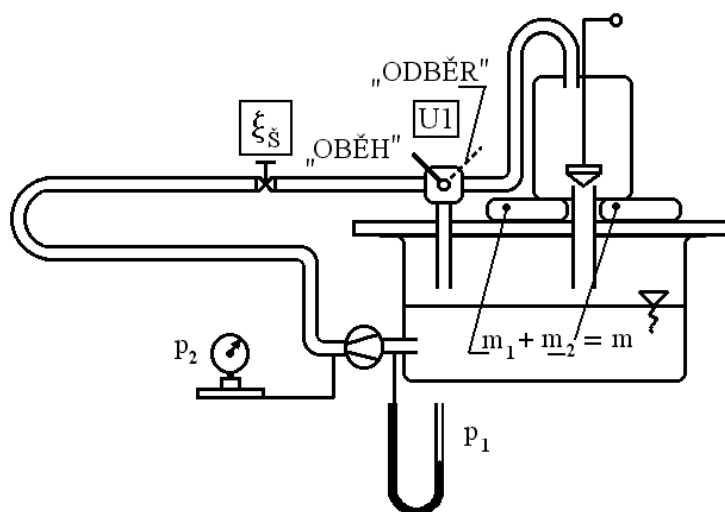
Zadání:

Naměřte tlakové difference v závislosti na velikosti průtoku na odstředivém čerpadle *Stratos* a změřte příkon čerpadla. Vypočítejte teoretický výkon potřebný k dopravování kapaliny a účinnost čerpání. Vyneste do grafů závislosti diferenčního tlaku na průtoku, příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku.

Popis zařízení:

Čerpadlo *Stratos* je radiální odstředivé čerpadlo nastavitelné do tří elektronikou řízených režimů. Je umístěné na trati o délce okolo 13 metrů a vnitřním průměru hladkého měděného potrubí $d = 37$ [mm]. Na sacím potrubí ve vzdálenosti větší než $5d$ je připojený u-manometr na měření podtlaku. Na výtláčném potrubí je umístěn ručkový manometr pro měření přetlaku. Škrcení systému se provádí šoupátkem ξ_s , přepínání odběru a oběhu dvoucestným ventilem U1. Pro měření průtoku slouží stopky a vážící nádoba (sud) s celkovým objemem $0,1$ [m^3], který je postaven na dvou vahách. Příkon čerpadla se odečte na elektronickém multimetru zapojeném přímo do síťové zásuvky.

Schéma zařízení:



Použité přístroje:

Čerpadlo Stratos 30/1-12 firmy WILO	
Ručkový manometr, $0 \div 250$ kPa	DK2394
U-manometr skleněný	DKP 9642
Váhy (2-krát), $0 \div 130$ kg	Luxa 3
Elektronický multimetr	
Stopky	

Postup měření:

1. Přesvědčte se, že není vážící nádoba uzavřena. Odečtěte výšku hladiny na u-manometru (tato hodnota bude sloužit pro výpočet odlehlosti hladin). Přepněte ventil U1 do polohy „OBĚH“ a šoupátko ξ_s úplně otevřete.

2. Zapněte čerpadlo. Dlouhým stiskem ovládacího kolečka se dostanete do modu nastavení polohy displeje. Vyberte pootočením ovládacího kolečka a
3. potvrďte krátkým stiskem. Dále vám zařízení nabídne tři regulační režimy v podobě malého blikajícího symbolu. Vyberte pootočením tento symbol:



4. a potvrďte výběr krátkým stisknutím. Podle instrukcí cvičícího nastavte pootočením ovládacího kolečka velikost diferenčního tlaku (!velikost diferenčního tlaku se zde zobrazuje v podobě dopravní výšky v rozsahu $1\div 11$ [m]). Nechte průtok ustálit po dobu asi jedné minuty.
5. Uzavřete vázící nádobu a přepněte ventil U1 na „ODBĚR“. V okamžiku, kdy začne vtékat voda do sudu začněte měřit čas.
6. V průběhu plnění sudu odečtete hodnoty tlaku p_{2m} na ručkovém manometru výtláčného řádu čerpadla, odlehlost hladin u-manometru a příkon čerpadla.
7. Je-li sud alespoň z poloviny naplněn můžete přepnout ventil U1 zpět na „OBĚH“ a stopky zastavte až přestane voda vtékat do sudu. Odečtete čas a hmotnost vody a sud vyprázdníte.
8. Snižte průtok šoupátkem ξ_s nejlépe podle u-manometru, kde se projeví zmenšováním odlehlosti hladin, tak aby jste mohli provést nejméně deset měření.
9. Celý postup opakujte vždy pro odlišné průtoky až do úplného uzavření šoupátka.
10. Naměřené hodnoty zpracujte do tabulek a vynesete do grafů.

Výpočtové vztahy:

Tlak na sání: $p_{1m} = h \cdot \rho \cdot g$ [Pa]

kde h [m] je odlehlost hladin zjištěná z u-manometru, ρ [kg/m^3] hustota vody

při dané teplotě (berte $\rho = 998,3 \text{ kg/m}^3$) a g [m/s^2] gravitační zrychlení.

Diferenční tlak na čerpadle:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (p_a + p_{2m}) - (p_a - p_{1m}) = p_{2m} + p_{1m} \quad [\text{Pa}]$$

kde p_1 a p_2 jsou absolutní tlaky a p_a je atmosférický tlak

Teoretický výkon: $P_{th} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H$ [Pa]

Zde je Q [m^3/s] průtok a H [m] manometrická dopraví výška (!pro každý průtok je její hodnota jiná).

Účinnost čerpání: $\eta = P_{th}/P$ [-]

kde P [W] jsou odečtené hodnoty příkonu čerpadla

Poznámky:

Hodnotu odlehlosti hladin na u-manometru odečítejte až po přepnutí ventilu U1 do polohy „ODBĚR“ aby nedocházelo k chybám. Zanedbejte hydraulické odpory tratě.

MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK NA ODSTŘEDIVÉM ČERPADLE STRATOS

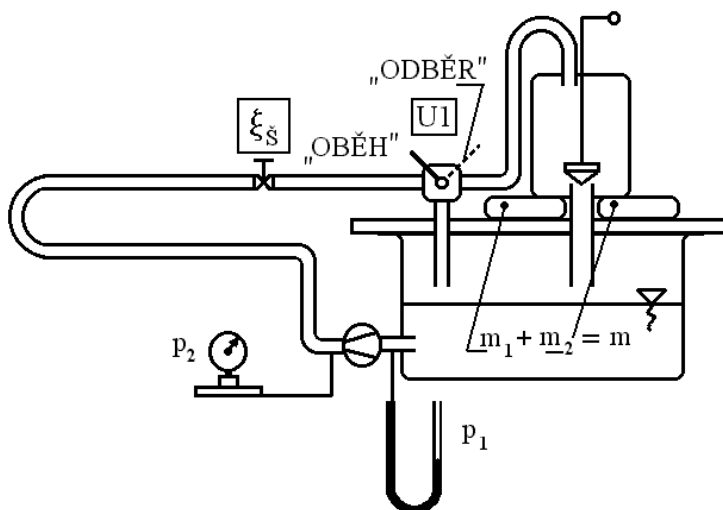
Zadání:

Naměřte tlakové difference v závislosti na velikosti průtoku na odstředivém čerpadle *Stratos* a změřte příkon čerpadla. Vypočítejte teoretický výkon potřebný k dopravování kapaliny a účinnost čerpání. Vyneste do grafů závislosti diferenčního tlaku na průtoku, příkonu, teoretického výkonu a účinnosti na velikosti průtoku.

Popis zařízení:

Čerpadlo *Stratos* je radiální odstředivé čerpadlo nastavitelné do tří elektronikou řízených režimů. Je umístěné na trati o délce okolo 13 metrů a vnitřním průměru hladkého měděného potrubí $d = 37$ [mm]. Na sacím potrubí ve vzdálenosti větší než 5d je připojený u-manometr na měření podtlaku. Na výtláčném potrubí je umístěn ručkový manometr pro měření přetlaku. Škrcení systému se provádí šoupátkem ξ_s , přepínání odběru a oběhu dvoucestným ventilem U1. Pro měření průtoku slouží stopky a vážící nádoba (sud) s celkovým objemem 0,1 [m³], který je postaven na dvou vahách. Příkon čerpadla se odečte na elektronickém multimetru zapojeném přímo do síťové zásuvky.

Schéma zařízení:



Použité přístroje:

Čerpadlo Stratos 30/1-12 firmy WILO	
Ručkový manometr, 0÷250 kPa	DK2394
U-manometr skleněný	DKP 9642
Váhy (2-krát), 0÷130kg	Luxa 3
Elektronický multimetr	
Stopky	

Postup měření:

1. Přesvědčte se, že není vážící nádoba uzavřena. Odečtěte výšku hladiny na u-manometru (tato hodnota bude sloužit pro výpočet odlehlosti hladin). Přepněte ventil U1 do polohy „OBĚH“ a šoupátko ξ_s úplně otevřete.

2. Zapněte čerpadlo. Dlouhým stiskem ovládacího kolečka se dostanete do modu nastavení polohy displeje. Vyberte pootočením ovládacího kolečka a
3. potvrďte krátkým stiskem. Dále vám zařízení nabídne tři regulační režimy v podobě malého blikajícího symbolu. Vyberte pootočením tento symbol:



4. a potvrďte výběr krátkým stisknutím. Podle instrukcí cvičícího nastavte pootočením ovládacího kolečka velikost variabilního diferenčního tlaku (!velikost variabilního diferenčního tlaku se zde zobrazuje v podobě dopravní výšky v rozsahu $4\div 10$ [m], vždy jako její maximální hodnota). Nechte průtok ustálit po dobu asi jedné minuty.
5. Uzavřete vázící nádobu a přepněte ventil U1 na „ODBĚR“. V okamžiku, kdy začne vtékat voda do sudu začněte měřit čas.
6. V průběhu plnění sudu odečtěte hodnoty tlaku p_{2m} na ručkovém manometru výtláčného řádu čerpadla, odlehlost hladin u-manometru a příkon čerpadla.
7. Je-li sud alespoň z poloviny naplněn můžete přepnout ventil U1 zpět na „OBĚH“ a stopky zastavte až přestane voda vtékat do sudu. Odečtěte čas a hmotnost vody a sud vyprázdněte.
8. Snižte průtok šoupátkem ξ_s nejlépe podle u-manometru, kde se projeví zmenšováním odlehlosti hladin, tak aby jste mohli provést nejméně deset měření.
9. Celý postup opakujte vždy pro odlišné průtoky až do úplného uzavření šoupátka.
10. Naměřené hodnoty zpracujte do tabulek a vynesete do grafů.

Výpočtové vztahy:

Tlak na sání: $p_{1m} = h \cdot \rho \cdot g$ [Pa]
 kde h [m] je odlehlost hladin zjištěná z u-manometru, ρ [kg/m³] hustota vody
 při dané teplotě (berte $\rho = 998,3$ kg/m³) a g [m/s²] gravitační zrychlení.

Diferenční tlak na čerpadle:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (p_a + p_{2m}) - (p_a - p_{1m}) = p_{2m} + p_{1m} \quad [\text{Pa}]$$

kde p_1 a p_2 jsou absolutní tlaky a p_a je atmosférický tlak

Teoretický výkon: $P_{th} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H$ [Pa]
 Zde je Q [m³/s] průtok a H [m] manometrická dopravní výška (!pro každý průtok je její hodnota jiná).

Účinnost čerpání: $\eta = P_{th}/P$ [-]
 kde P [W] jsou odečtené hodnoty příkonu čerpadla

Poznámky:

Hodnotu odlehlosti hladin na u-manometru odečítejte až po přepnutí ventilu U1 do polohy „ODBĚR“ aby nedocházelo k chybám. Zanedbejte hydraulické odpory tratě.