

Návrh experimentálního zařízení pro měření modulu pružnosti oleje a hadice

Michal Huňa

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal Huňa**

Osobní číslo: **T11239**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

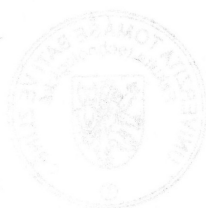
Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh experimentálního zařízení pro měření modulu pružnosti oleje a hadice**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši v dané problematice
2. Navrhňte experimentální zařízení pro měření modulu pružnosti oleje a hadice
3. Změřte modul pružnosti oleje a hadice na experimentálním zařízení
4. Zpracujte a vyhodnoťte naměřené závislosti modulů pružnosti
5. Citujte použitou literaturu



Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Peňáz, V., Benža, D.: Tekutinové mechanizmy, VUT v Brně, (1990).
2. Sívák, V.: Projektování hydraulických systémů, VŠB v Ostravě, (1990).
3. Janalík, J., Štáva, P.: Mechanika tekutin, VŠB v Ostravě, (2002).
4. Hružík, L.: Experimentální úlohy v tekutinových mechanizmech, VŠB v Ostravě, (2008).
5. Mannesmann Rextoth: Příručka hydrauliky, svazek 2, (1986).

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Martin Vašina, Ph.D.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

10. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Häusnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: HUŇA MICHAL


TECHNOLOGICKÁ
Obor: ZAŘÍZENÍ

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 21. 5. 2014


.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací;

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) *Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.*

(3) *Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.*

²⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:*

(3) *Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).*

³⁾ *zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:*

(1) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Dápirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.*

(2) *Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.*

(3) *Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.*

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem experimentálního zařízení pro měření modulu pružnosti oleje a materiálů hadic. V teoretické části jsou popsány základní vlastnosti kapalin, hydraulická vedení a metody měření modulu pružnosti kapalin. V experimentální části je popsána metodika měření modulu pružnosti oleje a Youngova modulu pružnosti materiálu hadice. Jsou navrženy dva hydraulické systémy pro měření těchto veličin. Dále byly změněny tlakové závislosti modulu pružnosti oleje a hadice.

Klíčová slova: modul pružnosti, hadice, olej, stlačitelnost kapalin, hydraulický systém

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with a design of experimental equipment for measurement of oil bulk modulus and modulus of elasticity of hose materials. The theoretical part describes basic properties of liquids, hydraulic lines and measuring methods of liquid bulk modulus. The experimental part describes a methodology of measurement of oil bulk modulus and Young's modulus of a hose material. There are designed two hydraulic systems for measurement of these quantities in this work. Pressure dependencies of oil bulk modulus and hose Young's modulus were measured too.

Keywords: bulk modulus, hose, oil, liquid compressibility, hydraulic system

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Martinu Vašinovi, Ph.D. za vedení, ochotu a čas věnovanému při zhotovení práce. A v neposlední řadě také mé rodině, za podporu při studiu a zhotovení téhle práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KAPALINY	12
1.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI KAPALIN	12
1.1.1 Hustota	12
1.1.2 Viskozita	13
1.1.3 Stlačitelnost kapalin	13
1.1.4 Teplotní objemová roztažnost	15
1.2 HYDRAULICKÉ OLEJE.....	15
1.2.1 Minerální oleje	15
2 VEDENÍ TEKUTIN	17
2.1 VEDENÍ.....	17
2.1.1 Vlastnosti hadic	18
2.1.2 Modul pružnosti	19
2.2 SPOJOVACÍ ČÁSTI.....	20
3 VLASTNÍ FREKVENCE	22
3.1 VLASTNÍ FREKVENCE ROTAČNÍHO HYDROMOTORU.....	22
3.2 VLASTNÍ FREKVENCE PŘÍMOČARÉHO HYDROMOTORU	22
4 METODY MĚŘENÍ MODULU PRUŽNOSTI	24
4.1 OBJEMOVÁ METODA	24
4.2 AKUSTICKÁ METODA	24
4.3 PIEZOELEKTRICKÁ METODA.....	24
4.4 KAPACITNÍ METODA	24
II PRAKTICKÁ ČÁST	26
5 PRVKY TEKUTINOVÝCH MECHANISMŮ	27
5.1 HYDRAULICKÉ PRVKY	27
5.1.1 Hydromotory a hydrogenerátory	27
5.1.2 Řídící prvky	28
5.1.3 Pomocné prvky.....	30
5.1.4 Speciální prvky.....	31
6 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ	32
6.1 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ PRO TLAK 10 MPA	34
6.2 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO TLAK 30 MPA	38
6.3 ZAPOJENÍ.....	42
7 MĚŘENÍ	45

7.1	MODUL PRUŽNOSTI OLEJE	47
7.2	MODUL PRUŽNOSTI HADICE.....	48
	ZÁVĚR	50
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	51
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ	55
	SEZNAM TABULEK.....	56
	SEZNAM PŘÍLOH.....	57

ÚVOD

Z experimentálních zkušeností je známo, že každé působení vnější síly na skutečné těleso, a tedy obecně i pohyb tělesa, je provázeno větší nebo menší deformací. V mnoha případech jsou deformace tak malé, že k nim nemusíme přihlížet. V takových případech se značně přiblížíme skutečnosti, předpokládáme-li, že se pevné těleso chová jako těleso tuhé. V celé řadě jiných případů se však setkáváme se stavy, jejichž význačnou vlastností je právě deformace. Vlastnosti tělesa, že se působením vnějších sil deformuje, nazýváme pružností nebo elasticitou (v širším smyslu).

V uvedeném smyslu se bakalářská práce zabývá hlavně deformací kapalin a prvky pro vedení kapalin; konkrétně hadicemi. Deformace kapalin se níže uvádí jako modul pružnosti (v širším smyslu - stlačitelnost). Modul pružnosti kapalin je veličinou, jež má při návrhu hydraulického systému vliv zejména na tuhost celé soustavy. Modul pružnosti ovlivňuje hlavně dynamické vlastnosti hydraulického systému.

Na dalších stránkách se tato práce zabývá obecnými vlastnostmi kapalin, hadic, tuhostí hydraulických systémů a v neposlední řadě i samotnému měření a stanovení modulu pružnosti kapalin. V další části jsou poté popsány základní prvky hydraulických systémů, návrh zařízení a stanovení modulu pružnosti pro vybraný typ oleje a hadice.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KAPALINY

Kapaliny se obecně vyznačují dvěma základními znaky, kterými se liší od ostatních:

1. snadná vzájemná posouvateľnost částic
2. značně velký odpor, který kladou proti *zmenšování svého objemu*

První vlastnost říká, že kapaliny kladou velmi malý odpor proti změně svého tvaru. Mezi jejich částicemi vznikají jen velmi malé tečné síly, jež brání pohybu částic, tyhle síly si lze vyložit jako třecí síly. Proto vždy mluvíme o viskózních kapalinách. Pokud předpokládáme, že tečné síly vymizí a že kapalina je absolutně nestlačitelná, mluvíme o tzv. ideálních kapalinách.

1.1 Fyzikální vlastnosti kapalin

Fyzikální vlastnosti kapalin jsou důležité zejména při výpočtech hydraulických mechanismů např. při zjišťování tlakových ztrát. Neméně důležité je ale znát vlastnosti i při volbě pracovní kapaliny. Nevhodně zvolená kapalina může mít vliv na funkci a případně i životnost mechanismů. Mezi nejvýznamnější fyzikální vlastnosti z pohledu uvedených hledisek patří hustota, viskozita a její závislost na teplotě, stlačitelnost a objemová roztažnost.[1]

1.1.1 Hustota

Hustota kapaliny ρ je definována jako její hmotnost m vztažená na objem V

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1.)$$

Hustota kapalin klesá s teplotou a roste s tlakem. Při zahřívání kapalin se její hmotnost nemění a naopak kvůli tepelné roztažnosti se mění nepřímo úměrně její objem. Při zvyšujícím se tlaku se vlivem objemové stlačitelnosti kapalin objem zmenšuje.

Hustota vybraných kapalin při 20°C :

Voda – 998 $[kg \cdot m^{-3}]$

Minerální oleje – 800 - 950 $[kg \cdot m^{-3}]$

1.1.2 Viskozita

Viskozita je mírou vnitřního tření kapalin, neboli obecně, udává odpor kapaliny proti tečení. Mezi vrstvami kapalin vzniká při pohybu dvou vrstev různých rychlostí tečné napětí τ . Podle Newtonova zákona je toto napětí úměrné gradientu rychlosti v kolmém směru na pohyb kapaliny.

$$\tau = \eta \cdot \frac{du}{dy} \quad (1.2.)$$

du/dy je zde gradient rychlosti

Z Newtonova zákona tedy můžeme vyjádřit dynamickou viskozitu.

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1.3.)$$

V hydraulických výpočtech se můžeme setkat s podílem dynamické viskozity a hustoty, její označení je kinematická viskozita.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.4.)$$

Viskozita kapaliny je silně závislá na teplotě. Při zahřívání viskozita kapaliny značně klesá. To může mít za následek klesající tlakové ztráty či rostoucí průtokové ztráty. Výrobci olejů většinou udávají viskozitu při 40°C a 100°C. Z těchto hodnot lze poté zjistit viskozitu v žádaném teplotním rozsahu.

Viskozita je rovněž závislá i na tlaku (výrazná hlavně u nižších teplot). U většiny kapalin viskozita roste s tlakem, nicméně se výrazněji zvyšuje až při vyšších tlacích (100MPa) a proto se většinou neuvažuje.

Pozn. výše uvedený text se týká pouze newtonských kapalin.

1.1.3 Stlačitelnost kapalin

Stlačitelnost kapaliny je schopnost kapaliny zmenšovat svůj objem při zvyšování tlaku. Jedná se o významnou vlastnost se kterou je třeba při návrhu počítat. Stlačitelnost kapalin je termodynamický děj, podle rychlosti rozlišujeme buď pomalé stlačování (izotermický

děj) nebo rychlé stlačování (adiabatický děj). Stlačitelnost kapalin může být vyjádřena modulem objemové pružnosti K .

$$K = \frac{V_0 \cdot \Delta p}{V_0 - V} = \frac{V_0 \cdot \Delta p}{\Delta V} \quad (1.5.)$$

Přibližné hodnoty modulů objemové pružnosti u vybraných kapalin:

Voda – $2 \cdot 10^9$ Pa

Minerální oleje – $1,4-1,8 \cdot 10^9$ Pa

Stlačitelnost lze vyjádřit i součinitelem stlačitelnosti, který je převrácenou hodnotou modulu objemové pružnosti.

$$\beta_p = \frac{1}{K} \quad (1.6.)$$

Modul objemové pružnosti se mění s tlakem a teplotou. Se zvyšujícím se tlakem stoupá, se zvyšující se teplotou klesá. Na modul objemové pružnosti má také významný vliv obsah nerozpuštěného (volného) vzduchu v kapalině (většinou ve formě bublinek). Kapalina s obsahem vzduchu již není homogenní, ale jedná se o suspenzi vzduchu v kapalině. Vzduch v kapalině výrazně snižuje modul objemové pružnosti, neboť u vzduchu je o tři řády menší než u kapalin (cca. $1,4 \cdot 10^6$ Pa). Modul pružnosti následně klesá v závislosti na objemu volného vzduchu v kapalině. Volný vzduch má největší vliv hlavně při nižších tlacích, z toho důvodu je lepší navrhovat hydraulické zařízení na vyšší pracovní tlaky (v případě nízkotlaké hydrauliky jsou mechanismy méně tuhé).

Obsah volného vzduchu není jednoduché zjistit, avšak je třeba s ním počítat.

Modul objemové pružnosti pro kapaliny s volným vzduchem se stanoví:

$$K_s = \frac{K_k \cdot n \cdot p}{n \cdot p + \alpha_v \cdot (K_k - n \cdot p)} \quad (1.7.)$$

Objemová koncentrace vzduchu ve směsi kapaliny a volného vzduchu je dána vztahem:

$$\alpha_v = \frac{V_v}{V_v + V_k} = \frac{V_v}{V_s} \quad (1.8.)$$

Přítomnost vzduchu v oleji má i jiné nepříznivé účinky, např. oxidace a tím i stárnutí oleje či pění.

1.1.4 Teplotní objemová roztažnost

Kapaliny, jakožto jiné látky, mohou měnit s teplotou svůj objem. Tuto změnu lze charakterizovat součinitelem objemové roztažnosti β_T .

$$\beta_T = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT} \quad (1.9.)$$

kde: V je původní objem a T teplota.

Součinitel objemové roztažnosti se mírně mění s teplotou a tlakem.

Přibližné hodnoty pro vybrané kapaliny:

Voda – $2 \cdot 10^{-4} [K^{-1}]$

Minerální oleje – $5-7,7 \cdot 10^{-4} [Pa]$

Při každém zvýšení teploty o $10^\circ C$ se objem kapaliny zvětší o cca. 0,7%. S touto vlastností je třeba při navrhování počítat např. u nádrží.

1.2 Hydraulické oleje

Pod pojmem hydraulické oleje se skrývají pracovní kapaliny vyrobené různým způsobem a z různých surovin. Je proto třeba rozlišit, zda se jedná o oleje minerální, polysyntetické, syntetické nebo rostlinné. Každá tato skupina má svá specifika a různé vlastnosti. V našem případě se budeme zabývat oleji minerálními, které jsou v současnosti nejpoužívanější. [1]

1.2.1 Minerální oleje

Výroba minerální se provádí z ropy rafinací. Prvním krokem je destilace, poté následuje vakuová destilace (stejný proces jako v předchozím kroku, pouze za sníženého tlaku). Výsledkem jsou oleje o různé viskozitě (C20-C35 mazací oleje, C35-C80 těžký ropný olej). Oleje jsou dále rafinovány. V tomto kroku se odstraňují nežádoucí příměsi a dochází k úpravě struktury uhlovodíků, čímž dojde ke zlepšení vlastnosti olejů. Čtvrtým krokem je odparafinování (odstranění parafínů), které zhoršují nízkoteplotní vlastnosti.

Podle vlastností a obsahu aditiv se minerální oleje rozdělují do tříd. Oleje různých tříd jsou pak vhodné pro určité aplikace. V Evropě se nejčastěji používají klasifikace podle normy ISO DIS 6743-4.

Použití vybraných tříd:

HH – oleje neobsahující přísady, jsou náchylné k oxidaci a rovněž mají malou mazací schopnost. Použití pro nenáročné mechanismy malých výkonů při nízkých až středních tlacích.

HL – obsahují přísady proti oxidaci a korozi, lze je použít v mechanismech s vyšším vývinem tepla. U těchto olejů je ale omezena mazací schopnost. Použití pro pístové hydromotory do 16 MPa a se zubovými do 25 MPa.

HM – obsahují přísady proti oxidaci, korozi a protioděrové přísady, tím je zlepšena mazací schopnost a to i při vyšších teplotách a vysokém mechanickém namáhání. V oleji mohou být zastoupeny a přísady proti pění, tvorbě emulze apod. Celkový obsah přísad v oleji bývá 1-2%, pro nenáročné mechanismy může být obsah přísad až 20%. Použití pro vysokotlaké mechanismy, pro pístové hydromotory do 45 MPa, s lamelovými do 17,5 MPa a s radiálními pístovými až do 75 MPa.

HV – obsahují stejná aditiva jako oleje HM, ale navíc obsahují i modifikátory viskozity. Díky tomu mohou pracovat ve větším rozmezí teplot a v nechráněném prostředí. Použití např. u mobilních strojů jako celoroční olejová náplň.

Kromě uvedených druhů nabízejí výrobci i celou řadu olejů s vlastnostmi dle přání zákazníka. V současnosti je vývoj hydraulických olejů především na prodloužení životnosti a zlepšení protioděrových vlastností při vysokém namáhání. Toho se dosahuje např. účinnějšími aditivy. Na druhou stranu jsou ovšem na pracovní kapaliny kladeny stále větší nároky na ekologickou nezávadnost, to vede např. k náhradě aditiv obsahujících zinek za aditiva bez něj.

2 VEDENÍ TEKUTIN

2.1 Vedení

Vedení spojuje jednotlivé prvky tekutinových obvodů. Nemění-li se jejich vzájemná poloha, je vedení pevné (z ocelových nebo kovových trubek). Pro spojení částí obvodu, které svou polohu mění, je vedení ohebné pomocí hadic nebo kloubových obvodů.

Při průtoku kapaliny vedením dochází vlivem odporů proti pohybu k přeměně tlakové energie na tepelnou a tím tlakovým ztrátám. U tlakového vedení se úbytek tlaku projeví poklesem účinnosti mechanismu, u zpětného vedení může ovlivnit funkci některých prvků. Z praktických zkušeností výrobců a uživatelů hydraulických zařízení volí následující doporučené rychlosti: zpětné vedení; 2,5 až 4 m/s a tlakové vedení; 3 až 10 m/s. V krátkých spojovacích kanálech lze pracovat s rychlostmi 15 až 25 m/s. [2]

Potrubí

V průmyslových hydraulických mechanismech se nejvíce používají ocelové bezešvé trubky. Měděné trubky jsou vhodné pouze o malých průměrech pro nízkotlaké soustavy, poněvadž během provozu v důsledku dlouhodobých vibrací tvrdnou. Pro letecké aplikace se používají trubky z oceli nebo slitin hliníku. Pro nízké tlaky lze použít i trubky z plastů (např. polyamidové). Tloušťku stěny ocelové trubky zpravidla není třeba počítat, přípustné tlaky jsou uvedeny v normě ČSN 13 1010.

Hadice

Hadice slouží ke spojení vzájemně se pohybujících prvků. Typická pryžová hadice je konstruována jako vytlačovaná (extrudovaná) vnitřní trubka ze syntetické pryže, jejímž základním účelem je udržet dopravovanou kapalinu v hadici. Charakter elastomerové pryže vyžaduje výstužnou vložku obtočenou či opletenou kolem trubky za účelem udržení vnitřního tlaku. Výztuž(e) jsou buď textilní nebo ocelové či obojí. K ochraně těchto vnitřních vložek v hadici proti vlivům okolí jsou překryty pláštěm ze syntetické pryže, který je extrudován kolem výztuže. Normální hadice pro minerální oleje slouží pro provozní teploty - 30 až 80°C. Proti potrubí se hadice liší svou pružností, změnou objemu s tlakem. V provo-

zu hydraulických zařízení to znamená na jedné straně možnost částečného tlumení rázů, na straně druhé zhoršování přesnosti a podporování kmitání. [2], [3]

2.1.1 Vlastnosti hadic

Pracovní tlak

Výběr hadice a koncovky musí být proveden tak, aby uvedený maximální doporučený tlak hadice i koncovky byl rovný nebo větší, než je maximální tlak v systému. Pulzující nebo špičkové přenášené tlaky v systému musí být pod hodnotou maximálního pracovního tlaku kompletované hadice. Obecně je tlak potřebný pro roztržení hadice čtyřnásobně větší než maximální dovolený tlak použití.

Snášlivost kapalin (komptabilita)

Hadice (vnitřní trubka – duše hadice, plášť hadice a koncovky hadice) musí být chemicky kompatibilní – snášet se jak s kapalinou vedenou hadicí, tak i s médiem ji obklopující.

Rozsah teplot

Aby nebyly vlastnosti pryžových hadic negativně ovlivňovány, mělo by být zajištěno, že jak teplota média, tak teplota okolí – trvale ani krátkodobě – nepřekročí meze pro daný typ hadic. Teploty pod nebo nad doporučené limity degradují hadice (urychlují stárnutí) a může se objevit poškození a propustnost hadic. Mechanické vlastnosti hadic jsou také ovlivňovány nízkými nebo vysokými teplotami a měly by být vzaty v úvahu při navrhování systému.

Rozměr hadice

Přenos výkonu se mění s tlakovou energií kapaliny a s průtokem kapaliny. Velikost složek musí být adekvátní, aby udržela tlakovou ztrátu na minimální úrovni a zamezila generování tepla nebo nadměrnému nárůstu rychlosti kapaliny a s ní opět související ztrátu.

Délka hadice musí být určena tak, aby hadicové vedení mělo dostatek vůle a umožnilo prvkům vedení volně se pohybovat nebo kmitat bez vyvození napětí v hadici. Avšak je třeba neumožnit příliš velkou vůli v pohybu, neboť se objeví nebezpečí, že se hadice zaplete do ostatního vybavení, nebo se odírá o komponenty zařízení. [3]

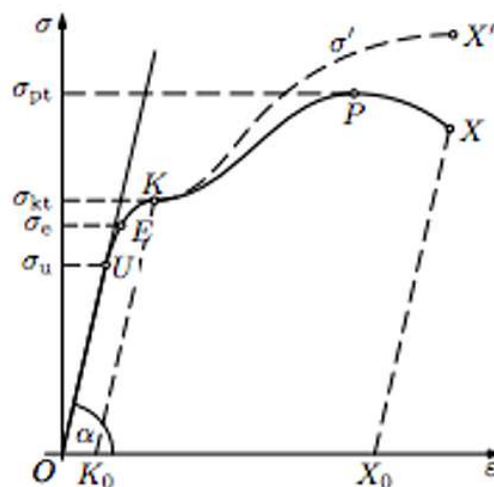
2.1.2 Modul pružnosti

Veličinou popisující pevnostní vlastnosti tuhých látek je modul pružnosti v tahu. Kromě pevnostních vlastností má vliv na další vlastnosti, např. tlumící vlastnosti materiálů nebo vlastní frekvenci. Při této zkoušce jsou používány normalizované materiálové vzorky, které jsou namáhány tahem. Výsledkem statické tahové zkoušky je pracovní diagram udávající závislost tahového napětí σ_t na poměrném prodloužení ε . Na počátku tahové zkoušky (až do bodu U) je závislost mezi napětím v tahu a poměrným prodloužením lineární, viz. Obr. 1. [4]. Tento jev popisuje Hookův zákon:

$$\sigma_t = E \cdot \varepsilon \quad (2.1.)$$

Modul pružnosti v tahu je tedy určen poměrem tahového napětí a poměrného prodloužení, resp. směrnici přímky svírající úhel α s osou poměrného prodloužení:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \operatorname{tg} \alpha \quad (2.2.)$$



Obr. 1. Tahový diagram konstrukční oceli

Modul pružnosti hadic je ovlivňován řadou veličin, např. tlakem a teplotou pracovní kapaliny, teplotou okolí apod. Kromě toho materiály hadic nejsou za normálních podmínek izotropní, hodnoty modulu pružnosti hadic dosahují odlišných hodnot v závislosti na směru namáhání (tzn. příčné a podélné). V případě hydraulických hadic má významnou roli především příčná deformace průřezu hadice. Z toho důvodu by běžná tahová zkouška materiálu hadice byla nedostatečná. Pro stanovení modulu pružnosti hadic se používá speciální zkouška, při které lze stanovit modul pružnosti materiálu hadice v závislosti na tlaku, teplotě kapaliny a teplotě okolí. Modul pružnosti hadic má u hydraulických systémů velký význam, neboť významně ovlivňuje dynamické vlastnosti hydraulického obvodu a tím i jeho provoz.

Výhodou speciální metody na zkušebním zařízení je, že měřená hadice může být vyjmuta z hydraulického obvodu, proměřena a následně opět namontována na původní místo. Nedochozí tedy k žádné destrukci hadice. Měření je možné opakovat po určité době, kdy dochází ke změně pevnostních vlastností materiálů hadic vlivem dlouhodobého namáhání (mechanické, tepelné apod.). [5]

2.2 Spojovací části

Důležitou součástí potrubí jsou potrubní spoje. Nejvíce se používají spojení rozebíratelné a to buď šroubení nebo přírubové spoje. [2]

Přírubové spojení potrubí

Trubky s vnitřním průměrem větším než 40 mm se obvykle spojují kruhovými, čtvercovými nebo tvarovými přírubami. pro nízké tlaky se příruby s trubkami spojují našroubováním, pro vysoké tlaky svařováním.

Šroubení

Nejběžnějším a nejrozšířenějším způsobem spojování trubek s hladkými konci je tzv. typ Ermeto. Na konec trubky se navlékne přesuvná matice a těsnící prsten. Poté se konec trubky zasune do kuželového vrtání hrdla a šroubováním přesuvné matice na hrdlo se zatlačí

břit těsnícího prstenu do trubky. Spojení je spolehlivé a přitom rozebíratelné. Dále je možné ještě použít i stavitelné trubkové přípojky umožňující libovolné nastavení směru trubky.

3 VLASTNÍ FREKVENCE

Vlastní frekvence hydraulického systému je významnou veličinou z hlediska dynamického chování hydraulického systému. Při vlastní frekvenci může dojít k velkým amplitudám tlaku a průtoku. To má za vliv namáhání prvku - rezonanci (pulzaci). Při určité rezonanci může dojít k havárii vlivem velkých kmitů, případně ke značnému zvýšení hluku.

Vlastní frekvence je měřítkem kvality pohonu. K výpočtu přesné frekvence musí být známy různé parametry (např. mechanické tření, viskozita kapaliny). Při návrhu hydraulického systému tyto údaje nejsou známy. Během projekčních prací lze však podle empirických vztahů vypočítat přibližné hodnoty vlastních frekvencí při určitých provozních podmínkách. Pozn. u hydraulických systémů je doporučená minimální vlastní frekvence 2-4 Hz. [6] [20]

3.1 Vlastní frekvence rotačního hydromotoru

Vlastní frekvence rotačního hydromotoru se stanoví dle vztahu:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_\varphi}{J_M}} \quad (3.1.)$$

Pro rotační hydromotor s minimálním tlakem výstupního kanálu je statická tuhost dána vztahem:

$$k_\varphi = D_1 \cdot \left(\frac{V_M}{2 \cdot \pi}\right)^2 = \frac{K}{0,5 \cdot V_M + V_1} \cdot \left(\frac{V_M}{2 \cdot \pi}\right)^2 \quad (3.2.)$$

Pro rotační hydromotor s předpětím v obou kanálech platí pro statickou tuhost vztah:

$$k_\varphi = (D_1 + D_2) \cdot \left(\frac{V_M}{2 \cdot \pi}\right)^2 = \left(\frac{K}{0,5 \cdot V_M + V_1} + \frac{K}{0,5 \cdot V_M + V_2}\right) \cdot \left(\frac{V_M}{2 \cdot \pi}\right)^2 \quad (3.3.)$$

3.2 Vlastní frekvence přímočarého hydromotoru

Vlastní frekvence přímočarého hydromotoru je dána vztahem:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_h}{m_{red}}} \quad (3.4.)$$

Pro přímočarý motor s jednostrannou pístnicí a minimálním tlakem výstupního kanálu je statická tuhost dána vztahem:

$$k_h = D_1 \cdot S_1^2 = \frac{K}{S_1 \cdot x + V_1} \cdot S_1^2 \quad (3.5.)$$

Pro přímočarý motor s jednostrannou pístnicí a tlakovým předpětím v obou kanálech platí pro statickou tuhost vztah:

$$k_h = D_1 \cdot S_1^2 + D_2 \cdot S_2^2 = \frac{K}{S_1 \cdot x + V_1} \cdot S_1^2 + \frac{K}{S_1 \cdot (h - x) + V_2} \cdot S_2^2 \quad (3.6.)$$

4 METODY MĚŘENÍ MODULU PRUŽNOSTI

4.1 Objemová metoda

U této metody se měří stlačení kapaliny pomocí závaží, jde o nejstarší metodu měření modulu pružnosti kapalin. Kapalina se nachází v ocelové nádobě, ze které vede tyč (píst). Na píst se položí závaží, jež vyvolá pokles pístu. Měří se změna tlaku a objemu. [21]

$$K = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (4.1.)$$

4.2 Akustická metoda

Měření modulu pružnosti akustickou metodou spočívá v principu, že zvuk se šíří v různých kapalinách nestejnou rychlostí. Na rozdíl od jiných metod akustické měření lze provádět i pro proudící kapalinu. Při měření se sleduje rychlost tlakové vlny v kapalině, následně se stanoví objemový modul pružnosti. [7]

$$K = \rho \cdot c^2 = \rho \cdot \left(\frac{L}{T_z} \right)^2 \quad (4.2.)$$

4.3 Piezoelektrická metoda

Využívá se metody měření impedance piezoelektrických měničů. Měří se přitom vrchol rezonančního kmitočtu funkce impedance z nichž se určí její závislost na kolísání objemového modulu pružnosti. Platí zde závislost mezi modulem pružnosti K a frekvencí f . [8]

4.4 Kapacitní metoda

Pro stanovení modulu pružnosti hadice se vychází se skutečností, že celková kapacita soustavy olej + hadice $C_{O,H}$ je dána součtem dílčích kapacit, tzn. kapacity oleje C_O a kapacity hadice C_H . [5]

$$C_{O,H} = C_O + C_H \quad (4.3.)$$

Pro jednotlivé kapacity platí vztahy :

$$C_{O,H} = \frac{\Delta V_{O,H}}{\Delta p}, \quad (4.4.)$$

$$C_O = \frac{\Delta V_{O,H}}{K_O}, \quad (4.5.)$$

$$C_H = \frac{V_{O,H} \cdot d_H}{E_H \cdot s_H}, \quad (4.6.)$$

po dosazení rovnic 4.4 - 4.6 do rovnice 4.3. a následujících matematických úpravách lze stanovit vztah pro výpočet modulu pružnosti hadice:

$$E_H = \frac{1}{\left(\frac{\Delta V_{O,H}}{V_{O,H} \cdot \Delta p} - \frac{1}{K_O} \right) \cdot \frac{s_H}{d_H}} \quad (4.7.)$$

Pro přírůstek oleje v důsledku stlačitelnosti oleje a hadice a objem hadice platí rovnice:

$$\Delta V_{O,H} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \Delta h_H \quad (4.8.)$$

$$V_{O,H} = \frac{\pi \cdot d_H^2}{4} \cdot l_H \quad (4.9.)$$

Modul pružnosti oleje v rovnici 4.7. se stanoví:

$$K_O = \frac{1}{\frac{\Delta V_{O,TR}}{V_{O,TR} \cdot \Delta p} - \frac{d_{TR}}{E_{TR} \cdot s_{TR}}} \quad (4.10.)$$

Pro přírůstek objemu oleje v důsledku stlačitelnosti oleje a trubky a objem oleje v trubce platí rovnice:

$$\Delta V_{O,TR} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \Delta h_{TR} \quad (4.11.)$$

$$V_{O,TR} = \frac{\pi \cdot d_{TR}^2}{4} \cdot l_{TR} \quad (4.12.)$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 PRVKY TEKUTINOVÝCH MECHANISMŮ

V tekutinových mechanismech se pro přenos a řízení energie používají prvky :

- hydraulické
- pneumatické
- kombinované

Jejich funkce je závislá hlavně na jejich konstrukci. Pneumatické prvky jsou z hlediska konstrukce jednodušší než hydraulické prvky. To je dáno především nižším pracovním tlakem (až 50 krát) než u hydraulických mechanismů a tím i menšími požadavky na těsnost a materiály prvků. [10]

Hydraulické a pneumatické prvky lze rozdělit do čtyř hlavních skupin :

- převodníky – jejich úkolem je přenos energie z tekutiny na pevný člen; generátory a motory
- řídicí prvky – jejich úkolem je řízení směru a parametrů průtoku tekutiny; jednosměrné ventily, rozvaděče, škrťací ventily, pojistné ventily
- pomocné prvky – jejich úkolem je zajišťovat správnou funkci mechanismu; nádrže, akumulátory, vedení čističe
- speciální prvky – jejich úkolem je zajišťovat specifické funkce; např. v hydraulických mechanismech zajišťují ohřev a chlazení kapaliny

5.1 Hydraulické prvky

5.1.1 Hydromotory a hydrogenerátory

Hlavními parametry všech převodníků jsou tlak a průtok. O vhodnosti užití některého z daných typů rozhodují vyjma jeho vlastností i schopnost regulace, velikost, hmotnost, cena či hlučnost. Vlastnosti hydraulických převodníků jsou taktéž ovlivňovány vlastnostmi kapaliny, zejména viskozitou a její závislostí na teplotě. Hydromotory slouží k transformaci tlakové energie kapaliny na mechanickou. Hydrogenerátory slouží k transformaci mechanické energie kapaliny na tlakovou. [10]

Hydrostatické převodníky dělíme do tří hlavních typů na zubové, lamelové a pístové.

Rozdělení hydromotorů a hydrogenerátorů z hlediska optimálního tlaku:

Tab. 1. Druhy hydromotorů a hydrogenerátorů

typ hydromotoru	pracovní tlak (MPa)
zubové	
s vnějším ozubením	16 až 20
s vnitřním ozubením	8 až 30
lamelové	
s kruhovým statorem	2 až 7
s oválným statorem	7 až 21
pístové	
radiální s vnitřním vedením pístů	21 až 40
radiální s vnějším vedením pístů	16 až 63
axiální pístové s rozvodným čepem	4 až 16
axiální pístové s čelním rozvodem	21 až 40

5.1.2 Řídící prvky

S řídicími prvky se setkáváme u všech hydraulických mechanismů. Patří mezi ně:

- jednosměrné ventily
- hydraulické zámky
- uzavírací ventily
- rozváděče
- škrťací ventily

Jednosměrné ventily

Prvky umožňující průtok kapaliny jen v jednom směru.

Zásadními požadavky jsou: - minimální odpor v propustném směru

- dokonalá těsnost v uzavřeném směru

Těsnící účinek obstarává kulička příp. kuželka, buď jen působením protitlaku nebo pomocí pružiny.

Hydraulický zámek

Vznikne spojením dvou řízených jednosměrných ventilů, použití má k zajištění přímočarého hydromotoru v požadované poloze.

Uzavírací ventil

Prvek určený k otevírání (uzavírání) průtoku. Pro pneumatické obvody bývá konstruován jako kohout. Většinou se místo něj používá škrťací ventil.

Rozváděče

Používají se v nejrůznějších aplikacích v různých provedeních pro řízení směru pohybu, připojování a odpojování tlakových zdrojů či motorů apod. Z hlediska dělení je lze rozdělit podle: počtu cest (dvoucestný, třícestný,...), počtu poloh (jednopolohový, dvoupolohový, ...), podle tvaru řídicího prvku, způsobu ovládní (ručně, elektricky, hydraulicky,...).

Základním typem je dvoupolohový rozváděč jež v první poloze umožňuje průtok kapaliny a ve druhé poloze jej uzavírá. Různou konstrukcí šoupátka a počtu nákrůžků lze získat různá propojení.

Škrťací ventily

Užívají se v hydraulických i pneumatických obvodech. Pracují na principu škrcení průtoku. Škrcení průtoku se děje buď s konstantním odporem (clony, trysky) či s proměnným odporem (škrťací ventily). Odpor proti průtoku se vykonává změnou průtočného průřezu. [11]

Pojistné ventily

Zařízení, které se při překročení určitého přetlaku automaticky otevře a odvede kapalinu. U většiny pojišťovacích ventilů se požadovaný přetlak nastavuje pomocí pružiny.

5.1.3 Pomocné prvky

Akumulátory

Důvodem užití akumulátorů je energetická úspornost nebo potlačení nepříznivých vlivů hydraulických mechanismů.

Funkce akumulátoru jsou:

- krytí objemových ztrát
- krytí krátkodobé zvýšení odběru kapaliny
- vyrovnání nerovnoměrnosti v odběru kapaliny
- nouzový zdroj energie

Princip činnosti akumulátoru je shromažďování nadbytečné energie kapaliny v době jejího přebytku a jejího zpětného předání do systému v době zvýšení spotřeby. Akumulace energie buď stlačováním pružiny nebo stlačováním plynu. Pro výběr akumulátoru je rozhodující jeho užitečný objem kapaliny, který lze z akumulátoru odebrat.

Akumulátory mohou být pružinové, plynové s přímým stykem, pístové, membránové.

Nádrže

Základní prvky všech hydraulických systémů.

Požadavky na nádrže jsou:

- pojmout veškerý obsah kapaliny jež je potřebná pro činnost obvodu
- umožnit doplňování a vypouštění kapaliny
- kontrola stavu hladiny
- vhodný základ pro montáž dalších prvků
- udržovat teplotu kapaliny (připojením chladiče, ohřívače)

Velikost nádrže se obvykle volí z tzv. užitečného objemu V_n . U stabilních hydraulických soustav se užitečný objem rovná dvou až čtyř násobku součtu všech hydrogenerátorů připojených k nádrži v $\text{dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. Tvar nádrží se volí většinou hranolovitý či válcový. [11]

5.1.4 Speciální prvky

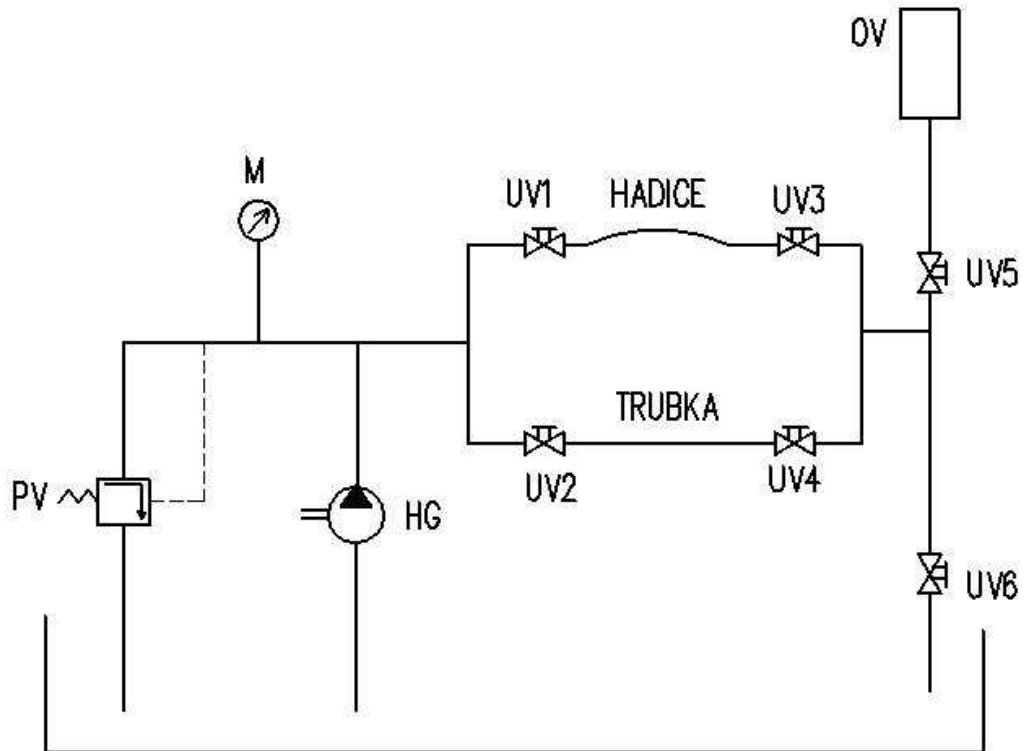
Chladiče

Kapalina se při provozu v hydraulickém systému zahřívá. Chladič se umísťuje do hydraulického obvodu z důvodu chlazení kapaliny. Chladiče lze rozdělit na chladiče trubkové, deskové, či kombinované.

Filtry

Pokud existuje riziko poškození čerpadla hrubými nečistotami, musí být hydraulický systém vybaven sacím filtrem. Filtrační vložky mají zpravidla síť o mezerách 40 -125 μm , pro lepší filtrování je ale vhodné použít jemnější síť.

6 NÁVRH EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ



Obr. 2. Schématický náčrt zařízení

Popis jednotlivých komponentů:

HG – hydrogenerátor (součást hydraulického agregátu)

PV – pojistný ventil

M – manometr

UV1-UV6 – uzavírací kulové ventily

OV – odměrný válec

Princip měření pro stanovení modulu pružnosti soustavy olej-trubka:

Vždy před spuštěním hydraulického agregátu musí být uzavřen ventil UV5, aby nedošlo k úniku kapaliny přes odměrný válec. Při spuštěném agregátu nesmí být nikdy otevřen ventil UV5 a zároveň ventily UV1 a UV3 nebo UV2 a UV4, kapalina by začala proudit skrz trubku (hadici) to odměrného válce a odtud do okolí.

1. V počátečním stavu jsou ventily spojovací hadici (UV1 a UV3) a ventil UV5 uzavřeny a ventily UV2, UV4 a UV6 otevřeny, kapalina proudí skrz trubku zpět do nádrže. Na pojistném ventilu se nastaví minimální hodnota tlaku.
2. Zapne se hydraulický agregát a uzavře se odpadní ventil UV6. Na manometru M odečteme velikost tlaku, jež nastavíme pojistným ventilem PV.
3. Po natlakování trubky se uzavře ventil UV4, odečte se tlak na manometru M a uzavře se ventil UV2. Pro odlehčení hydraulického agregátu se pojistný ventil PV nastaví na minimální hodnotu.
4. Otevřeme ventil u odměrného válce UV5, následně se otevře ventil UV4. Tím dojde k poklesu tlaku Δp v trubce z tlaku p na atmosférický tlak. Protože se na manometru M měří relativní tlak, je tedy pokles tlaku Δp v trubce roven dříve změřenému tlaku na manometru: $\Delta p = p$. Část objemu kapaliny $\Delta V_{O,TR}$, která vyteče z trubky v důsledku stlačitelnosti kapaliny a trubky, způsobí stoupnutí hladiny v odměrném válci OV o hodnotu Δh_{TR} , která se zaznamená. Následně se uzavře ventil UV4. Pokud je v odměrném válci příliš mnoho oleje, vypustí se potřebné množství z válce otevřením ventilu UV6. Sleduje se pokles hladiny, trubice se nesmí vypustit úplně. Uzavře se ventil UV6 a následně i UV5.
5. Měření se opakuje pro různé tlaky. Po skončení měření je nutno nastavit na pojistném ventilu minimální hodnotu.

Měření pro stanovení modulu pružnosti soustavy olej-hadice je obdobné s rozdílem, že v bodě 1. jsou uzavřeny ventily spojovací trubku (UV2 a UV4) a ventily UV1 a UV3 otevřeny. V bodě 3. se následně uzavře ventil UV3 a následně UV1. Po otevření ventilu UV5 a ventilu UV3 se sleduje změna objemu kapaliny $\Delta V_{O,H}$, která způsobí změnu stoupnutí hladiny v odměrném válci o hodnotu Δh_H , která se zaznamená. Vypuštění je poté stejné jako u předchozího případu.

6.1 Návrh experimentálního zařízení pro tlak 10 MPa

Volba agregátu

Pro volbu agregátu pro zařízení na měření modulu pružnosti oleje a hadice pro tlak 10 MPa jsem zvolil hydraulický agregát firmy Chvalis s.r.o. Volím agregát série M-Pak, horizontální provedení použitelný do tlaku 14 MPa.

Agregát je vhodný pro stacionární hydraulické systémy. Vstupní a výstupní DN si dle výrobce můžeme určit. Taktéž zvýšení maximálního průtoku z 35 l/min na 40 l/min. [11]

Typ agregátu M-Pak, horizontální provedení, pro tlak 14 MPa

Motor: 0,55-15 kW

Max. průtok: 40 l/min

Max. tlak: 14 MPa

Objem nádrže: 100-250 l

Rychlost proudění ve vedení

Pro tlakové vedení je optimální rychlost: 4,5-7 m/s. [3] Volím střední rychlost 5,75 m/s.

Vnitřní průměr pro tlakové vedení [2]

$$Q = 40 \text{ dm}^3 / \text{min} = \left(40 \cdot \frac{0,001}{60} \right) = 0,000666 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{v}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{0,000666 \cdot 4}{\pi \cdot 5,75}} = 0,0121 \text{ m}$$

Vnitřní průměr (světlost) vedení pro tlak 10 MPa rychlostí 5,75 m/s je 12,1 mm.

Vnitřní průměr tlakového vedení d volím na 13 mm. Veškeré vedení bude tedy mít průměr 13 mm. Z toho důvodu volím ostatní součásti na požadovaný montážní průměr 13 mm, pro snížení počtu redukcí.

Zpětný přepočítání rychlosti proudění pro průměr 13 mm

$$Q = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{v}{4} \Rightarrow v = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = \frac{0,000666 \cdot 4}{\pi \cdot 0,013^2} = 5,01 \text{ m/s}$$

Rychlost proudění ve vedení bude 5,01 m/s, což vyhovuje rozsahu 4,5-7 m/s.

Odpadní vedení bude mít průměr vyšší, neboť se zde již neužívají tak velké tlaky a tudíž je i nižší rychlost. Optimální rychlost ve zpětném vedení je 2 – 4 m/s.[3] Volím rychlost 3 m/s.

$$Q = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{v}{4} \Rightarrow d_{ODP} = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{0,000666 \cdot 4}{\pi \cdot 3}} = 0,0168 \text{ m}$$

Odpadní vedení bude mít průměr 19 mm (voleno dle hadice). Zpětný přepočít rychlosti pro průměr 19 mm, $v = 2,35$ m/s, což vyhovuje rozsahu 2 – 4 m/s.

U hydraulického agregátu je proto vhodné zvolit výstupní průměr 13 mm a vstupní průměr 19 mm.

Pojistný ventil

Pro pojistný ventil volím ventil firmy Severočeská armaturka, spol. s.r.o., pojistný ventil P14 287 5100, použitelný do tlaku 10 MPa, při teplotě kapaliny v rozsahu -10 – 300 °C. Ventil má vstupní DN 15, z toho důvodu je nutné použít redukci. Ventil má výstupní DN G1“ proto je nutné taktéž použít redukci na odpadní vedení průměr 19 mm. [12]

Uzavírací kulové ventily

Pro uzavírací ventily volím ventily firmy Charvát Group, s.r.o., 2 cestný kulový kohout použitelný do tlaku 50 MPa s připojením pomocí trubkového závitu G 1/2. Zvolený typ má firemní označení BKH G1/2 13 1113. Materiál těla je ocel, materiál koule a páky je pozinkovaná ocel. Pro pracovní teplotu kapaliny v rozsahu -10 – 100 °C. Jmenovitá světlost je stejná jako u průměrů vedení, DN 13. [13]

Hadice

Pro tlakové vedení oleje v zařízení volím hadici firmy Semperflex, tj. jednovrstvá hydraulická hadice s označením DIN EN 853 1SN DN 12 WP 160 BAR. Materiál hadice je syntetická pryž s jednou vrstvou vysoce pevného ocelového drátu pro pracovní teplotu kapaliny v rozsahu $-40 - 100$ °C. Jmenovitá světlost hadice je 13,0 mm, použitelná pro tlak do 16 MPa. [14]

Pro zpětné vedení oleje v zařízení volím hadici firmy Semperflex, tj. jednovrstvá hydraulická hadice s označením DIN EN 853 1SN DN 19 WP 105 BAR. Materiál hadice je syntetická pryž s jednou vrstvou vysoce pevného ocelového drátu pro pracovní teplotu kapaliny v rozsahu $-40 - 100$ °C. Jmenovitá světlost hadice je 19 mm, použitelná pro tlak do 10,5 MPa. [14]

Odměrný válec

Odměrný válec ze skla firmy Simax. Volím vnější průměr $d = 10$ mm, síla stěny $s = 1$ mm. Objednávací číslo 632 246 100 100. [15]

Manometr

Manometr firmy Gumex, průměru 63 mm, s vnějším závitem G1/4". Pracovní tlak $0 - 160$ bar, přesnost 2,5 %. Pro oleje při teplotě $-20 - 60$ °C. Objednávací kód 4613160. [16]

Šroubení

Šroubení jednotlivých prvků bude pomocí úhlových spojek a T spojek firmy SEALL, s.r.o. Úhlová spojka W připojení EO 24° s vnitřním průměrem 12 mm. Firemní označení W15LMSX. Materiál mosaz. Použitelné do tlaku 20 MPa. [17]

T-spojka T připojení EO 24° s vnitřním průměrem 12 mm. Firemní označení T15LMSX. Materiál mosaz. Použitelné do tlaku 20 MPa. [17]

Potrubí pro vedení

Trubka dle ČSN 42 5715. Materiál – ocel třídy 11 353. Označení TR \varnothing 20 x 3,6. [18]

Měřicí potrubí

Trubka dle ČSN 42 5715. Materiál – ocel třídy 11 503. Označení TR \varnothing 28 x 4. [18]

6.2 Návrh zařízení pro tlak 30 MPa

Volba agregátu

Pro volbu agregátu pro zařízení na měření modulu pružnosti oleje a hadice pro tlak 30 MPa jsem zvolil hydraulický agregát firmy Trading BFBT, s.r.o. Nejvýhodnější se jeví typ AHC15.

Hydraulický agregát je skříňové, samonosné konstrukce. Je vybaven závěsnými oky pro jednoduchou montáž. Agregát je standardně dodáván pro napětí 230V/400V VY 3 fáze a kmitočtu 50Hz. Je osazen elektrorozvaděčem se všemi spouštěcími a jistícími prvky. Součástí je trafo 24V pro dálkové ovládání. Dále je agregát vybaven teplotními čidly, chladičem a topením (standardní výbava). Do hydraulického okruhu je zapojen zpětný filtr 10 mikronů. Agregát může být vybaven záchytnou olejovou vanou a nebo střechou. Vstupní a výstupní DN si dle výrobce můžeme určit. [19]

Typ agregátu AHC15

Příkon: 15 kW

Otáčky el. motoru: 1460 min⁻¹

Max. průtok: 63,7 l/min

Max. tlak: 30 MPa

Objem nádrže: 180 l

Výška: 1,45 m

Rozměry podstavy: 0,74x1,26 m

Rychlost proudění ve vedení

Pro tlakové vedení je optimální rychlost: 5-10 m/s. [3] Volím střední rychlost 7,5 m/s.

Vnitřní průměr pro tlakové vedení [2]

$$Q = 63,7 \text{ dm}^3 / \text{min} = \left(63,7 \cdot \frac{0,001}{60} \right) = 0,001061 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$Q = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{v}{4} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{0,001061 \cdot 4}{\pi \cdot 7,5}} = 0,0134 \text{ m}$$

Vnitřní průměr (světlost) vedení pro tlak 30 MPa rychlostí 7,5 m/s je 13,4 mm.

Vnitřní průměr d volím dle normalizované hodnoty na 16 mm. Veškeré vedení bude tedy mít průměr 16 mm. Z toho důvodu volím ostatní součásti na požadovaný montážní průměr 16 mm, pro snížení počtu redukcí.

Zpětný přepočít rychlosti proudění pro průměr 16 mm

$$Q = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{v}{4} \Rightarrow v = \frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot d^2} = \frac{0,001061 \cdot 4}{\pi \cdot 0,016^2} = 5,27 \text{ m/s}$$

Rychlost proudění ve vedení bude 5,27 m/s, což vyhovuje rozsah 5-10 m/s

Odpadní vedení bude mít průměr vyšší, neboť se zde již neuvžívají tak velké tlaky a tudíž je i nižší rychlost. Optimální rychlost ve zpětném vedení je 2 – 4 m/s.[3] Volím rychlost 3 m/s.

$$Q = \pi \cdot d^2 \cdot \frac{v}{4} \Rightarrow d_{ODP} = \sqrt{\frac{Q \cdot 4}{\pi \cdot v}} = \sqrt{\frac{0,001061 \cdot 4}{\pi \cdot 3}} = 0,0212 \text{ m}$$

Odpadní vedení bude mít průměr 25 mm (voleno dle hadice). Zpětný přepočít rychlosti pro průměr 25 mm, $v = 2,17$ m/s, což vyhovuje rozsahu 2 – 4 m/s.

U hydraulického agregátu je proto vhodné zvolit výstupní průměr 16 mm a vstupní průměr 25 mm.

Pojistný ventil

Jako pojistný ventil volím ventil firmy Severočeská armaturka, spol. s.r.o., pojistný ventil P14 217 5400, použitelný do tlaku 40 MPa, při teplotě kapaliny v rozsahu -10 – 200 °C. Ventil má vstupní DN 15, z toho důvodu je nutné použít redukci. Výstupní DN 40, proto je nutné taktéž použít redukci na odpadní vedení průměr 25 mm. [12]

Uzavírací kulové ventily

Pro uzavírací ventily volím ventily firmy Charvát Group, s.r.o., 2 cestný kulový kohout použitelný do tlaku 50 MPa s připojením pomocí trubkového závitu G 5/8. Zvolený typ má firemní označení BKH G5/8 16 1113. Materiál těla je ocel, materiál koule a páky je pozinkovaná ocel. Pro pracovní teplotu kapaliny v rozsahu -10 – 100 °C. Jmenovitá světlost je stejná jako u průměrů vedení, DN 16. [13]

Hadice

Pro tlakové vedení oleje v zařízení volím hadici firmy Semperflex, tj. vícevrstvá hydraulická hadice s označením DIN EN 856 4 SP DN16 WP 350 BAR. Materiál hadice je syntetická pryž, odolná vůči hydraulickým kapalinám se čtyřmi vrstvami vysoce pevného ocelového drátu pro pracovní teplotu kapaliny v rozsahu -40 – 100 °C. Jmenovitá světlost hadice je 16 mm, použitelná pro tlak do 35 MPa. [14]

Pro zpětné vedení oleje v zařízení volím hadici firmy Semperflex, tj. dvouvrstvá hydraulická hadice s označením 2SN-K DN25 1“ WP 200 BAR. Materiál hadice je syntetická pryž se dvěma vrstvami vysoce pevného ocelového drátu. Pro pracovní teplotu kapaliny v rozsahu -40 – 100 °C. Jmenovitá světlost hadice je 25 mm, použitelná pro tlak do 20 MPa. [14]

Odměrný válec

Odměrný válec ze skla firmy Simax. Volím vnější průměr $d = 10$ mm, síla stěny $s = 1$ mm. Objednávací číslo 632 246 100 100. [15]

Manometr

Manometr firmy Gumex, průměru 63 mm, s vnějším závitem G1/4“. Pracovní tlak 0 – 400 bar, přesnost 2,5 %. Pro oleje při teplotě -20 – 60 °C. Objednávací kód 4613400. [16]

Šroubení

Šroubení jednotlivých prvků bude pomocí úhlových spojek a T spojek firmy SEALL, s.r.o.

Úhlová spojka W připojení EO 24° s vnitřním průměrem 16 mm. Firemní označení W20S71X. Materiál nerezová ocel. Použitelné do tlaku 40 MPa. [17]

T-spojka T připojení EO 24° s vnitřním průměrem 16 mm. Firemní označení T20S71X. Materiál nerezová ocel. Použitelné do tlaku 40 MPa. [17]

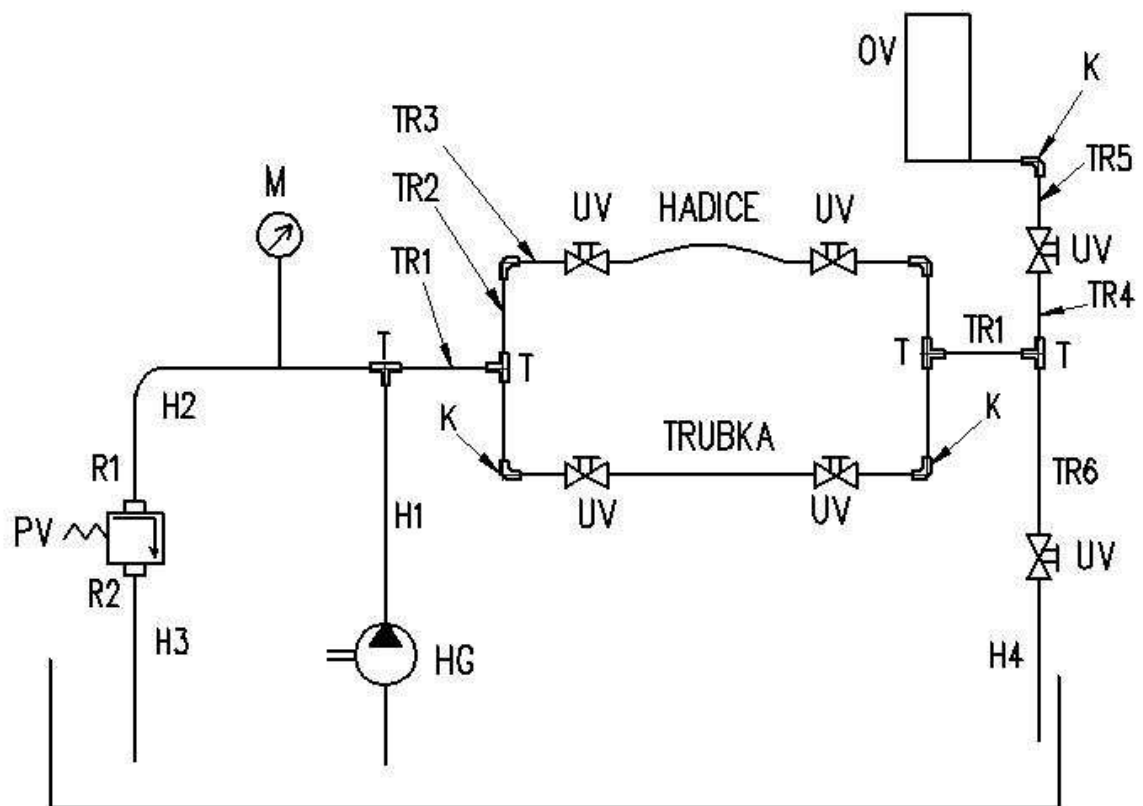
Potrubí pro vedení

Trubka dle ČSN 42 5715. Materiál – ocel třídy 11 353. TR \varnothing 22 x 4. [18]

Měřicí potrubí

Trubka dle ČSN 42 5715. Materiál – ocel třídy 11 503. Označení TR \varnothing 28 x 4. [18]

6.3 Zapojení



Obr. 3. Schéma zapojení

Zařízení, vyjma hydraulického agregátu, pojistného ventilu a hadice bude na pracovním stole. Veškeré šroubení součástí včetně trubek bude pevně připevněno k pracovnímu stolu.

Tab. 2. Specifikace prvků pro zapojení měřícího zařízení pro tlak 10 MPa

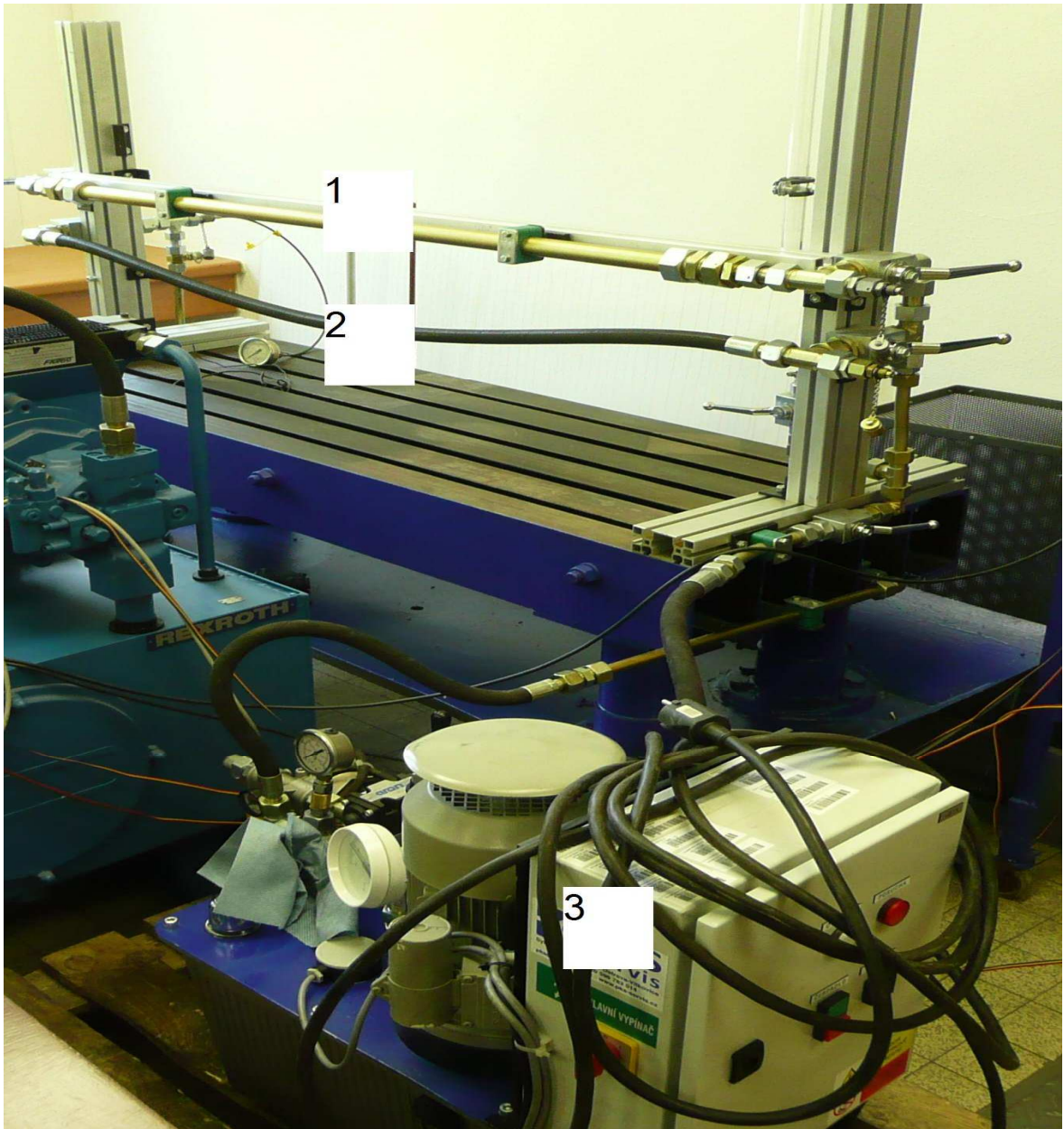
Označení prvku	Název	Parametry, typ	Počet kusů
HG	Hydrogenerátor-součást hydraulického agregátu	Chvalis, s.r.o., typ M-Pak, max. tlak 14 MPa	1
UV	Uzavírací ventil	Charvát Group, s.r.o., BKH G1/2 13 1113, max. tlak 50 MPa	6
PV	Pojistný ventil	Severočeská armaturka, spol. s.r.o., P14 287 5100 max. tlak 10 MPa	1
M	Manometr	Gumex, 4613160, rozsah 0-16 MPa	1
OV	Odměřovací válec	Simax, 632 246 100 100	1
T	T-spojka	Kovaz s.r.o., T15LMSX, max. tlak 20 MPa	4
K	Úhlová spojka	Kovaz s.r.o., W15LMSX, max. tlak 20 MPa	5
H1	Hadice 1	Semperflex, DIN EN 853 1SN DN 12 WP 160 BAR, délky 2 m	1
H2	Hadice 2	Semperflex, DIN EN 853 1SN DN 12 WP 160 BAR, délky 1 m	1
H3	Hadice 3	Semperflex, DIN EN 853 1SN DN 19 WP 105 BAR, délky 0,5 m	1
H4	Hadice 4	Semperflex, DIN EN 853 1SN DN 19 WP 105 BAR, délky 3,5 m	1
TR1	Trubka 1	Ocelová trubka, 11 353, délky 0,2 m	2
TR2	Trubka 2	Ocelová trubka, 11 353, délky 0,4 m	4
TR3	Trubka 3	Ocelová trubka, 11 353, délky 0,3 m	4
TR4	Trubka 4	Ocelová trubka, 11 353, délky 0,2 m	1
TR5	Trubka 5	Ocelová trubka, 11 353, délky 0,2 m	1
TR6	Trubka 6	Ocelová trubka, 11 353, délky 0,4 m	1
R1	Redukce 1	Redukce z průměru hadice 13 mm na vstup pro PV 15 mm	1
R2	Redukce 2	Redukce z PV průměru G1" na odpadní vedení průměru 19 mm	1
HADICE	Měřená hadice	Hadice světlosti 16 mm, délky 1,5 m	1
TRUBKA	Měřící trubka	Ocelová trubka, 11 504, délky 1,4 m	1

Tab. 3. Specifikace prvků pro zapojení měřícího zařízení pro tlak 30 MPa

Označení prvku	Název	Parametry, typ	Počet kusů
HG	Hydrogenerátor-součást hydraulického agregátu	Trading BFBT, s.r.o., typ AHC15, max. tlak 30 MPa	1
UV	Uzavírací ventil	Charvát Group, s.r.o., BKH G5/8 16 1113, max. tlak 50 MPa	6
PV	Pojistný ventil	Severočeská armaturka, spol. s.r.o., P14 217 5400, max. tlak 40 MPa	1
M	Manometr	Gumex, 4613400, rozsah 0- 40 MPa	1
OV	Odměřovací válec	Simax, 632 246 100 100	1
T	T-spojka	SEALL s.r.o., T20S71X	4
K	Úhlová spojka	SEALL s.r.o., W20S71X	5
H1	Hadice 1	Semperflex, DIN EN 856 4 SP DN16 WP 350 BAR, délka 2 m	1
H2	Hadice 2	Semperflex, DIN EN 856 4 SP DN16 WP 350 BAR, délka 1 m	1
H3	Hadice 3	Semperflex, 2SN-K DN25 1" WP 200 BAR, délka 0,5 m	1
H4	Hadice 4	Semperflex, 2SN-K DN25 1" WP 200 BAR, délka 3,5 m	1
TR1	Trubka 1	Ocelová trubka, 11 353, délka 0,2 m	2
TR2	Trubka 2	Ocelová trubka, 11 353, délka 0,4 m	4
TR3	Trubka 3	Ocelová trubka, 11 353, délka 0,3 m	4
TR4	Trubka 4	Ocelová trubka, 11 353, délka 0,2 m	1
TR5	Trubka 5	Ocelová trubka, 11 353, délka 0,2 m	1
TR6	Trubka 6	Ocelová trubka, 11 353, délka 0,4 m	1
R1	Redukce 1	Redukce z průměru hadice 16 mm na vstup pro PV 15 mm	1
R2	Redukce 2	Redukce z PV průměru 40 mm na odpadní vedení průměru 25 mm	1
HADICE	Měřená hadice	Hadice světlosti 16 mm, délky 1,5 m	1
TRUBKA	Měřící trubka	Ocelová trubka, 11 503, délky 1,4 m	1

7 MĚŘENÍ

Měření modulu pružnosti hadice a oleje bylo prováděno ve spolupráci s VŠB TU Ostrava, na fakultě strojní, katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení. Na daném zařízení bylo provedeno měření modulu pružnosti hadice a oleje pro různé tlaky.



Obr. 4. Měřící zařízení

Popis: 1- Potrubí pro měření oleje

2- Měřená hadice

3- Hydraulický agregát



Obr. 5. Detail odměrného válce

7.1 Modul pružnosti oleje

Tab. 4. Stanovení modulu pružnosti oleje

Δp [bar]	Δh_{TR} [m]	K_o [10^9 Pa]
50	0,052	0,79
70	0,063	0,92
90	0,068	1,10
110	0,072	1,27
130	0,076	1,43
150	0,081	1,55

Měřeno při teplotě kapaliny 28°C a teplotě okolí 21°C. Druh oleje: minerální olej OH-HM 46.

Parametry trubky: $l_{TR} = 1,6 \text{ m}$, $d_{TR} = 0,022 \text{ m}$, $s_{TR} = 0,004 \text{ m}$, $E_{TR} = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$

Parametry odměrného válce: $d_0 = 0,0098 \text{ m}$

Příklad výpočtu pro tlak 50 bar

Objem oleje v trubce:

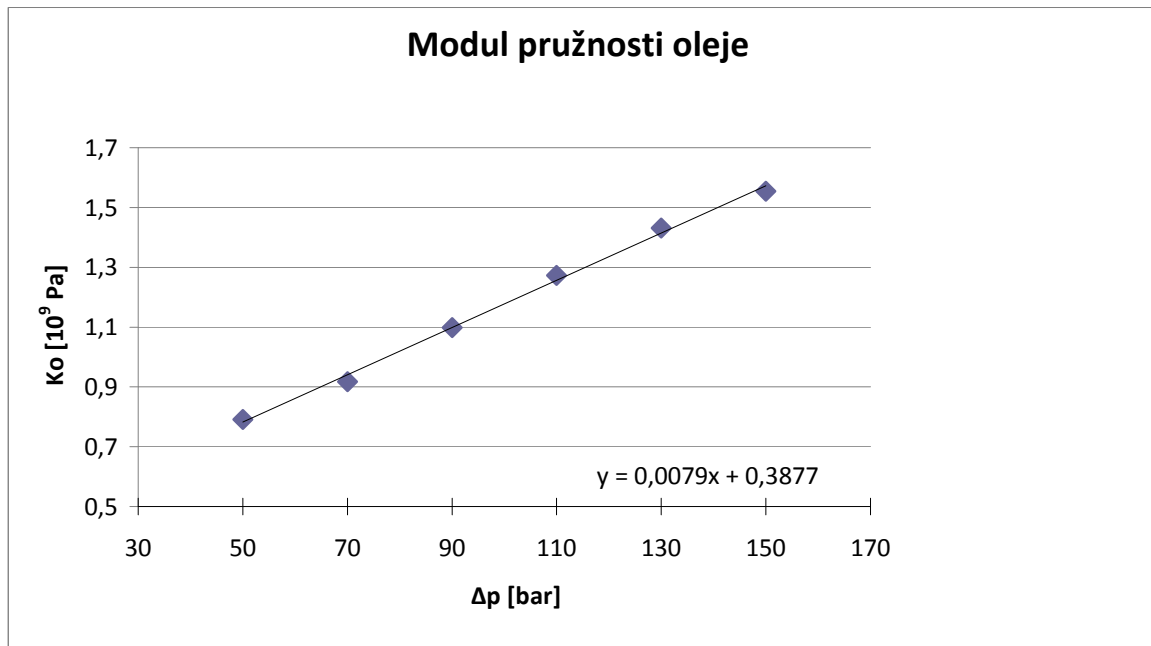
$$V_{O,TR} = \frac{\pi \cdot d_{TR}^2}{4} \cdot l_{TR} = \frac{\pi \cdot 0,022^2}{4} \cdot 1,6 = 6,082 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Přírůstek objemu v důsledku stlačitelnosti oleje a trubce:

$$\Delta V_{O,TR} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \Delta h_{TR} = \frac{\pi \cdot 0,0098^2}{4} \cdot 0,052 = 3,922 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Modul pružnosti oleje:

$$K_o = \frac{1}{\frac{\Delta V_{O,TR}}{V_{O,TR} \cdot \Delta p} - \frac{d_{TR}}{E_{TR} \cdot s_{TR}}} = \frac{1}{\frac{3,922 \cdot 10^{-6}}{6,082 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^5} - \frac{0,022}{2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,004}} = 0,79 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$



Obr. 6. Graf Závislosti modulu pružnosti oleje na tlaku

7.2 Modul pružnosti hadice

Tab. 5. Stanovení modulu pružnosti hadice

Δp [bar]	Δh_h [m]	E_H [MPa]
50	0,054	2983
70	0,062	3842
90	0,069	4258
110	0,074	4781
130	0,080	5060
150	0,084	5644

Měřeno při teplotě kapaliny 28°C a teplotě okolí 21°C. Typ hadice HANSA – FLEX EN 853 SN 16 WP 250 BAR.

Parametry hadice: $l_H = 1,7 \text{ m}$, $d_H = 0,016 \text{ m}$, $s_H = 0,0048 \text{ m}$

Parametry odměrného válce: $d_0 = 0,0098 \text{ m}$

Příklad výpočtu pro tlak 50 bar

Objem oleje v hadici:

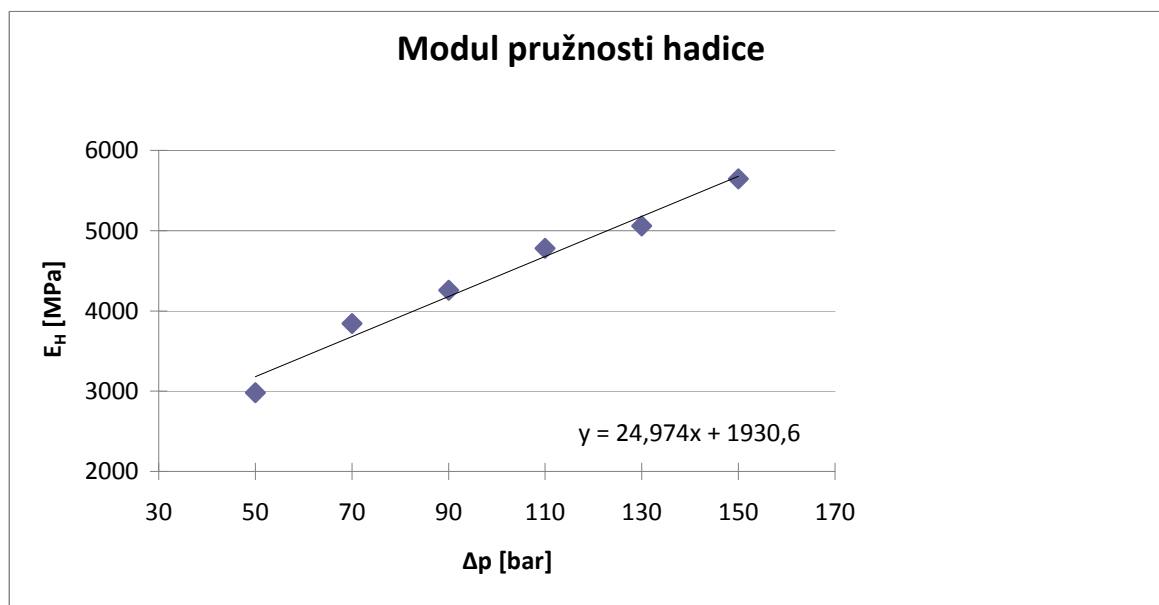
$$V_{O,H} = \frac{\pi \cdot d_H^2}{4} \cdot l_H = \frac{\pi \cdot 0,016^2}{4} \cdot 1,7 = 3,418 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Přírůstek objemu v důsledku stlačitelnosti oleje a hadice:

$$\Delta V_{O,H} = \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} \cdot \Delta h_H = \frac{\pi \cdot 0,0098^2}{4} \cdot 0,054 = 4,073 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Modul pružnosti hadice:

$$E_H = \frac{1}{\left(\frac{\Delta V_{O,H}}{V_{O,H} \cdot \Delta p} - \frac{1}{K_O} \right) \cdot \frac{s_H}{d_H}} = \frac{1}{\left(\frac{4,073 \cdot 10^{-6}}{3,418 \cdot 10^{-4} \cdot 50 \cdot 10^5} - \frac{1}{0,79 \cdot 10^9} \right) \cdot \frac{0,0048}{0,016}} = 2,983 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$



Obr. 7. Graf závislosti modulu pružnosti hadice na tlaku

ZÁVĚR

Předmětem práce byl návrh experimentálního zařízení pro stanovení modulu pružnosti oleje a hadice pomocí kapacitní metody, jejíž princip je podrobně popsán v teoretické části bakalářské práce. Návrh systému se odvíjel podle tlaku, jehož se má při měření dosáhnout. Byly navrženy 2 hydraulické systémy, pro měření modulu pružnosti oleje a hadic při tlaku 10 MPa a pro měření modulů pružnosti při tlaku 30 MPa.

V laboratoři VŠB-TU Ostrava bylo rovněž provedeno experimentální měření modulu pružnosti oleje a materiálu hadice v závislosti na provozním tlaku. Z měření jsem zjistil, že modul pružnosti oleje stoupá takřka lineárně s rostoucím tlakem. Modul pružnosti hadice taktéž stoupá s rostoucím tlakem. Z uvedených závislostí tedy vyplývá, že je třeba modul pružnosti kapalin a hadic brát více než pouze v potaz, u vysokotlakých soustav takřka nevyhnutelně.

Výše uvedené modulu pružnosti jsou důležité veličiny pro návrh hydraulických systémů. Modul pružnosti materiálu hadice je důležitý z pevnostního hlediska. Modul pružnosti kapaliny, který závisí na mnoha parametrech (např. na obsahu vzduchu v kapalině, teplotě, tlaku kapaliny aj.), je důležitou veličinou z hlediska dynamického chování hydraulických systémů. Jeho velikost má velký vliv na tuhost systému a tím i na velikost vlastní frekvence daného hydraulického systému. Při nižších hodnotách modulu pružnosti kapaliny se všeobecně snižuje velikost vlastní frekvence hydraulického systému a tím se snižují dynamické vlastnosti.

Výhodou kapacitního měření modulů pružnosti je nedestruktivní měření, po němž lze proměřenou hadici znovu použít v hydraulických systémech.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DVOŘÁK, Lukáš. Vlastnosti tekutin, VŠB Ostrava 2010. Dostupné online: <<http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf/>>
- [2] PEŇÁZ, Václav, BENŽA, Dušan. Tekutinové mechanismy, 1. vyd. VUT Brno 1990, ISBN 80-214-0082-X
- [3] Technická příručka firmy Parker. Dostupné online: <http://www.parker.com/literature/Literature%20Files/cz/images/download/4400/Catalog/4400_Aa.pdf/>
- [4] <[http://www.autodeskclub.cz/acres.axd/getimg/artres\\$7Ce734ea0eeb7042328ef50ff3415e1944/500x444/85/](http://www.autodeskclub.cz/acres.axd/getimg/artres$7Ce734ea0eeb7042328ef50ff3415e1944/500x444/85/)>
- [5] Jemná mechanika a optika. Rok 2008, č. 5, str. 133-135. Dostupné online: <<http://jmo.fzu.cz/2008/Jmo-05/JMO-200805.pdf/>>
- [6] SIVÁK, Václav. Projektování hydraulických systémů. 1. vyd. VŠB Ostrava, 1990, str. 131. ISBN 80-7078-037-1.
- [7] Van de Ven, J.D.: On Fluid Compressibility in Switch-Mode Hydraulic Circuits – Part II: Experimental Results. Journal of Dynamic Systeme Measurement and Kontrol-Transactions of the ASME 135, (2013)
- [8] Kim, G., Wang, K.: On-line Estimation of effective Bulk Modulus in Fluid Power Systeme usány Piezoelectric transducer Impedance. Journal of Intelligent materiál Systeme and Structures 20, 2101-2106 (2009)
- [9] Jemná mechanika a optika. Rok 2008, č. 5, str. 133-135. Dostupné online: <<http://jmo.fzu.cz/2008/Jmo-05/JMO-200805.pdf/>>
- [10] KOPÁČEK, Jaroslav, PAVLOK, Bohuslav. Tekutinové mechanismy, 3. vyd. VŠB TU Ostrava 2001, ISBN 978-80-428-2405-5
- [11] Katalog firmy Chvalis, s.r.o. Dostupné online: <http://www.chvalis.cz/www/assets/katalogy/Katalog_hydrauliky.PDF/>
- [12] Katalog firmy Severočeská armaturka, s.r.o. Dostupné online: <<http://www.sca.cz/download/pojistne.pdf/>>

- [13] Katalog firmy Charvát Group, s.r.o. Dostupné online:
<<http://www.charvat-chs.cz/sortiment/2-cestne-kulove-kohouty/>>
- [14] Katalog firmy Semperflex. Dostupné online:
<<http://www.semperflex.com/hydraulikschlaeuche/produkte/hydraulikschlauch//>>
- [15] Katalog firmy Ites, s.r.o. Trubice Simax, str. 50. Dostupné online:
<http://www.ites.sk/files/docs/produkty/svk/dokument_151.pdf/>
- [16] Katalog firmy Gumex. Dostupné online:
<<http://www.gumex.cz/manometr-glycerinovy-serie-gs-28899.html/>>
- [17] Katalog firmy SEALL, s.r.o. Dostupné online:
<http://www.seall.cz/upload/stranky/users/seall/File/produkty/rozvody/DIN_sroubeni.pdf/>
- [18] LEINVEBER, Jan, VÁVRA, Pavel. Strojnické tabulky. 2. doplněné vydání. Albra 2005. str. 300. ISBN 80-7361-011-6
- [19] Katalog firmy Trading BFBT, s.r.o. Dostupné online:
<<http://www.bfbt.cz/hydraulicke-agregaty/>>
- [20] VAŠINA, Martin. energeticky úsporné hydraulické systémy zvedacích a nakládacích zařízení. Disertační práce, VŠB TU Ostrava 2000.
- [21] HAYWARD, A.T.J. The compressibility of hydraulic fluids. Journal of the institute of petroleum, Vol. 51, No. 494, February 1965

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Popis</i>
c	$[m \cdot s^{-1}]$	Rychlost zvuku
C_H	$[N^{-1} \cdot m^5]$	Kapacita hadice
C_O	$[N^{-1} \cdot m^5]$	Kapacita oleje
$C_{O,H}$	$[N^{-1} \cdot m^5]$	Kapacita soustavy olej + hadice
d	$[mm]$	Průměr tlakového potrubí
d_0	$[m]$	Vnitřní průměr odměrné nádoby
d_H	$[m]$	Vnitřní průměr hadice
d_{ODP}	$[mm]$	Průměr odpadního potrubí
d_{TR}	$[m]$	Vnitřní průměr trubky
D_1	$[N \cdot m^{-5}]$	Odpor proti deformaci
D_2	$[N \cdot m^{-5}]$	Odpor proti deformaci
E	$[Pa]$	Modul pružnosti v tahu
E_H	$[Pa]$	Modul pružnosti hadice
E_{TR}	$[Pa]$	Modul pružnosti trubky
f_0	$[Hz]$	Vlastní frekvence
h	$[m]$	Zdvih motoru
J_m	$[kg \cdot m^2]$	Moment setrvačnosti
k_h	$[N \cdot m]$	Statická tuhost
k_φ	$[N \cdot m]$	Statická tuhost
K, K_O	$[Pa]$	Objemový modul pružnosti
K_p	$[Pa]$	Objemový modul pružnosti bez volného vzduchu
K_s	$[Pa]$	Objemový modul pružnosti s volným vzduchem
l_H	$[m]$	Délka hadice
l_{TR}	$[m]$	Délka trubky
L	$[m]$	Vzdálenost jež urazí tlakové vlny
m	$[kg]$	Hmotnost
m_{red}	$[m]$	Redukovaná hmotnost
n	-	Polytropický exponent
p	$[Pa]$	Tlak
Q	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Průtok tekutiny
S_1, S_2	$[m^2]$	Plocha pístu
S_H	$[m]$	Tloušťka stěny hadice
S_{TR}	$[m]$	Tloušťka stěny trubky
T	$[^\circ C]$	Teplota
T_z	$[s]$	Časové zpoždění tlakové vlny
V	$[m^3]$	Objem
v	$[m \cdot s^{-1}]$	Průtoková rychlost
V_0	$[m^3]$	Počáteční objem
V_1	$[m^3]$	Objem kapaliny ve vstupním kanálu

V_2	$[m^3]$	Objem kapaliny ve výstupním kanálu
V_k	$[m^3]$	Objem kapaliny
V_M	$[m^3]$	Objem hydromotoru
$V_{O,H}$	$[m^3]$	Objem oleje v hadici
$V_{O,TR}$	$[m^3]$	Objem oleje v trubce
V_s	$[m^3]$	Objem směsi kapaliny a vzduchu
V_v	$[m^3]$	Objem volného vzduchu ve směsi
x	$[m]$	Poloha pístu
α_v	-	Objemová koncentrace vzduchu
β_p	$[Pa^{-1}]$	Objemová stlačitelnost
β_T	$[K^{-1}]$	Objemová roztažnost
Δh_H	$[m]$	Stoupnutí hladiny oleje
Δh_{TR}	$[m]$	Stoupnutí hladiny oleje
$\Delta V_{O,TR}$	$[m^3]$	Přírůstek objemu
ε	-	Poměrné prodloužení
η	$[Pa \cdot s]$	Dynamická viskozita
ν	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Kinematická viskozita
ρ	$[kg \cdot m^{-3}]$	Hustota
σ_t	$[Pa]$	Napětí
τ	$[Pa]$	Tečné napětí

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Tahový diagram konstrukční oceli	19
Obr. 2. Schématický náčrt zařízení.....	32
Obr. 3. Schéma zapojení	42
Obr. 4. Měřicí zařízení	45
Obr. 5. Detail odměrného válce	46
Obr. 6. Graf Závislosti modulu pružnosti oleje na tlaku.....	48
Obr. 7. Graf závislosti modulu pružnosti hadice na tlaku	49

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Druhy hydromotorů a hydrogenerátorů	28
Tab. 2. Specifikace prvků pro zapojení měřicího zařízení pro tlak 10 MPa.....	43
Tab. 3. Specifikace prvků pro zapojení měřicího zařízení pro tlak 30 MPa.....	44
Tab. 4. Stanovení modulu pružnosti oleje	47
Tab. 5. Stanovení modulu pružnosti hadice.....	48

SEZNAM PŘÍLOH

