

O B S A VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A TEXTILNÍ V LIBERCI

PŘEDMLUVA	nositelka Řádu práce	4
Seznam označení nejdůležitějších proměnných a konstant		5
1. ÚVOD		8
1.1. Přehled o současném stavu poznání	Fakulta strojní	9
1.2. Cíl disertace		10
1.3. Zvolené metody zpracování		11
2. KAPALINY POUŽÍVANÉ V HYDRAULICKÝCH MECHANISMÁCH		13
2.1. Stavová rovnice kapaliny		13
2.2. Objemový modul pružnosti kapaliny		15
2.3. Dynamický proces deformace pracovní kapaliny		18
2.4. Vlivní faktory termického modulu pružnosti kapaliny		21
3. HADICOVÉ VEDENÍ		25
3.1. Konstrukce hadice		25
ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI HADICOVÉHO VEDENÍ A JEJICH VLIV NA		31
CHOVÁNÍ HYDRAULICKÝCH MECHANISMŮ		32
3.2.1. Deformace stěny hadice		33
3.2.2. Deformace stěny hadice		33
3.2.3. Gelková deformační energie		39
3.2.4. Závislost	Kandidátská disertační práce	41
3.2.5. Neutrální úhel opletu		42
4. ODPORY VE VEDENÍ		45
4.1. Odpor proti pohybu kapaliny R		45
4.2. Odpor proti zrychlení H		50
4.3. Odpor proti deformaci D		50
Vědní obor: 23-03-9 Stavba výrobních strojů a zařízení		51
4.4. Vliv deformace na odpory u hadice		51
4.5. Odpory ve vedení		54
5. SOUHRNNÝ MODUL PRUŽNOSTI		57
5.1. Souhrnný modul pružnosti		57
5.2. Souhrnný modul pružnosti		62
5.3. Zjištění souhrnného modulu pružnosti		62
6. OBJEMOVÁ ZMĚNA HADICOVÉHO VEDENÍ		64
6.1. Experimentální zjišťování objemových změn		64
6.1.1. Princip měření		65
6.1.2. Vlastní měření		67
6.1.3. Zpracování naměřených výsledků a zjištění		69

Liberec, červenec 1983

O B S A H	
PŘEDMLUVA	4
Seznam označení nejdůležitějších proměnných a konstant	5
1. ÚVOD	8
1.1. Přehled o současném stavu problematiky, která je předmětem disertace	9
1.2. Cíl disertace	10
1.3. Zvolené metody zpracování	11
2. KAPALINY POUŽÍVANÉ V HYDRAULICKÝCH MECHANISMECH	13
2.1. Stavová rovnice kapaliny	13
2.2. Objemový modul pružnosti kapaliny	15
2.3. Dynamický proces deformace pracovní kapaliny	18
2.4. Měření izotermického modulu pružnosti kapaliny	21
3. HADICOVÉ VEDENÍ	25
3.1. Konstrukce hadice	25
3.2. Deformace hadicového vedení	31
3.2.1. Celková deformace hadicového vedení	32
3.2.2. Deformace stěny hadicového vedení	33
3.2.3. Celková deformační energie	39
3.2.4. Závislost změny úhlu β na působícím tlaku	41
3.2.5. Neutrální úhel opletu	42
4. ODPORY VE VEDENÍ	45
4.1. Odpor proti pohybu kapaliny R	45
4.2. Odpor proti zrychlení H	50
4.3. Odpor proti deformaci D	50
4.4. Vliv deformace na odpory u hadice	51
4.5. Odpory ve vedení	54
5. SOUHRNNÝ MODUL PRUŽNOSTI VEDENÍ	57
5.1. Souhrnný modul pružnosti ocelového vedení	57
5.2. Souhrnný modul pružnosti hadicového vedení	62
5.3. Zjištění souhrnného modulu pružnosti	62
6. OBJEMOVÁ ZMĚNA HADICOVÉHO VEDENÍ	64
6.1. Experimentální zjišťování objemových změn hadice měřením vyteklého množství kapaliny z hadice	64
6.1.1. Princip měření	65
6.1.2. Vlastní měření	67
6.1.3. Zpracování naměřených výsledků a zhodnocení	69

6.1.4.	Vyjádření objemových změn náhradou závislosti $\Delta V_S = f(\Delta p)$ exponenciální závislosti	74
6.1.5.	Linearizace závislosti $\Delta V_S = f(\Delta p)$ v určitém intervalu přetlaků	77
6.2.	Vyšetřování závislosti ΔV_S na geometrických parametrech hadice	82
6.3.	Zjišťování objemových změn hadice proměřením geometrických parametrů hadice	88
6.3.1.	Snímání změny vnějšího průměru a délky hadice - uspořádání měřicího zařízení	89
6.3.2.	Výpočet změny geometrického objemu hadice	90
6.3.3.	Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení měření	92
6.4.	Zjišťování objemových změn hadice souvislým měřením	96
6.4.1.	Vlastní měření	98
6.4.2.	Zpracování výsledků a zhodnocení	99
6.5.	Rozbor chyb metodiky vyšetřování objemových změn hadicového vedení	104
7.	VLIV HADICE NA CHOVÁNÍ HYDRAULICKÉHO MECHANISMU	109
7.1.	Rovnice popisující chování hydraulického mechanismu	110
7.2.	Určení přenosů	114
7.3.	Popis programu PŘENOS	119
7.4.	Rozbor vlivu hadice na chování mechanismu	121
8.	ZÁVĚR	132
	Seznam příloh	136
	Seznam použité literatury	137

Hydraulický mechanismus je systém pro přenos energie doplněný transformačním blokem k ovládání parametrů přenášené energie, ve kterém je použito kapaliny jako nositele energie. Systém pro přenos energie je charakterizován tím, že ve vstupním členu / převodníku / a ve výstupním členu /převodníku/ se skutečně přestup energie nejméně mezi dvěma různými druhy jejího nositele. Vstupní a výstupní členy jsou spojeny přenosovým kanálem. Transformační blok je soubor sérioparalelně zapojených odporů proti přenosu energie uspořádaných tak, aby zajistil požadované změny parametrů přenášené energie. Podle hlavní formy energie přenášené přenosovým kanálem rozlišujeme potenciální a kinetické hydraulické mechanismy (v této práci se omezíme na potenciální tlakové - hydrostatické mechanismy).

U hydraulických mechanismů se v poměrně mnoha případech používá hadicové vedení k spojení členů mechanismu. Charakteristické vlastnosti hadice - zejména kapacitní - jsou značně jiné než vlastnosti trubky a mají značný vliv na chování celého hydraulického mechanismu.

Předložená práce je věnována problematice vyšetřování základních vlastností hadicového vedení a jejich vlivu na chování hydraulického mechanismu. Práce je změřena teoreticky, přičemž mnohé předpoklady i závěry jsou ověřeny experimentálně

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Vojtěchu Drábovi, CSc. a Ing. Josefu Cerhovi, CSc. za podporu a povzbuzení v práci, za velmi cenný přístup, s kterým mi pomáhali osvojovat si vědecké a technické poznatky vztahující na téma práce. Stejně tak patří můj dík vedoucímu katedry obrábění a montáže Doc. Ing. Jaromíru Gazdovi, CSc. a celému kolektivu katedry obrábění a montáže za vzácnou všestrannou pomoc a vytvoření dobrých podmínek, které mi umožnily vypracovat tuto práci a poskytl mi potřeby k experimentální práci.

Liberec, květen 1983

Dao Quang Nghiem

Seznam označení nejdůležitějších proměnných a konstant

		[°C]
C	kapacita	$[N^{-1}.m^5]$
C_h	celková hydraulická kapacita objemu hadice	$[N^{-1}.m^5]$
$C_{h,k}$	hydraulická kapacita kapaliny vém přetlaku	$[N^{-1}.m^5]$
$C_{h,s}$	hydraulická kapacita stěn vedení přetlaku	$[N^{-1}.m^5]$
D	odpor proti deformaci ve vedení	$[N.m^{-5}]$
D_v	vnější průměr hydraulického vedení	$[m]$
D_u	vnitřní průměru hydraulického vedení	$[m]$
$\frac{D_v}{D_u}$	poměrná změna vnějšího průměru hadice	$[1]$
$\frac{D_u}{D_v}$	poměrná změna vnitřního průměru hadice	$[1]$
ΔD_v	změna vnějšího průměru vedení	$[m]$
ΔD_u	změna vnitřního průměru vedení	$[m]$
d	průměr nitě (drátu) vedení	$[m]$
E	celková energie systému kapaliny	$[J]$
E_t	modul pružnosti ocelové trubky způsobené	$[MPa]$
E_H	modul pružnosti materiálu hadicového vedení	$[MPa]$
$E_{I,II,III}$	modul pružnosti v tahu duše, tlakové kordové vložky a obalu hadice	$[MPa]$
G_p	modul pružnosti ve smyku pro pryžovou hadice	$[MPa]$
h	celková tloušťka pryžokordové stěny	$[m]$
H	odpor proti zrychlení proudu kapaliny vách	$[Nm^5s^2]$
K	objemový izometrický modul pružnosti kapaliny	$[MPa]$
$\bar{K}$	modul pružnosti směsi kapaliny a vách vzduchu v kapalině	$[MPa]$
K_S	souhrnný modul pružnosti ocelové trubky	$[MPa]$
K_{SH}	souhrnný modul pružnosti hadicového vedení	$[MPa]$
K	konstanta daná konstrukcí hadice namáhání	$[MPa]$
L	délka vlákna odpovídající stoupání šroubovice	$[m]$
l	délka hadice včetně koncovek	$[m]$
Δl	změna délky (zkrácení) hadice	$[m]$
$\frac{l}{l(p)}$	poměrné zkrácení hadice objemové	$[1]$
n	počet vrstev kordových vložek	$[1]$
p	působící přetlak v hadici (au) hadice	$[MPa]$
Δp	změna přetlaku v hadici šroubovice a směrem	$[MPa]$
R_L	odpor proti pohybu kapaliny při laminárním	$[o]$
R_K	izotermický objemový součinitel průtoku	$[Nm^{-5}s]$
R_T	odpor proti pohybu kapaliny	$[MPa^{-1}]$
σ	zkos při turbulentním průtoku	$[Nm^{-5}s]$
	řezu stěny hadice	$[1]$

T	teplota kapaliny	[$^{\circ}\text{C}$]
T_0	počáteční teplota kapaliny	[$^{\circ}\text{C}$]
t_d	rozteč nití	[m]
U	celková deformační energie v objemu hadice	[J]
V_0	vnitřní objem vedení při nulovém přetlaku	[m^3]
V	vnější objem hadice při nulovém přetlaku	[m^3]
ΔV	celková změna objemu vedení	[m^3]
ΔV_K	změna objemu kapaliny	[m^3]
ΔV_t	změna objemu trubky, daná deformací stěn trubky	[m^3]
ΔV_H	změna objemu hadice, daná deformací stěn hadice	[m^3]
v_K	celková poměrná objemová změna hydraulického vedení	[1]
v_K	poměrná objemová změna kapaliny	[1]
v_H	poměrná objemová změna hadice způsobená deformací stěn hadice	[1]
W	výsledná deformační energie v pryžokordové vrstvě vztažená na jednotku povrchu stěny	[J]
W_C	celková energie akumulovaná v objemu hadice vztažená na jednotku stěny	[J]
W_{ck}	celková energie v pryžokordových vrstvách vztažených na jednotku povrchu stěny	[J]
W_{cp}	celková energie v pryžových vrstvách vztažená na jednotku povrchu stěny	[J]
W_{ξ}	deformační energie od normální deformace vztažená na jednotku povrchu stěny	[J]
W_{γ}	deformační energie při smykovém namáhání vztažená na jednotku povrchu stěny	[J]
W_t	potenciál vnějších sil	[J]
α	úhel opletu (ovinu) hadice	[$^{\circ}$]
α_K	izobarický součinitel objemové roztažnosti kapaliny	[K^{-1}]
α_n	neutrální úhel opletu (ovinu) hadice	[$^{\circ}$]
β	úhel mezi směrem vinutí šroubovice a směrem kolmým k ose hadice	[$^{\circ}$]
β_K	izotermický objemový součinitel stlačitelnosti kapaliny	[MPa^{-1}]
γ	zkos pryže mezi vlákny v obecném řezu stěny hadice	[1]

γ^*	jmenovitý zkos pryže při deformaci stěny	[1]
1. ÚVOD	hadice	[1]
ε_d	poměrná deformace průměru hadice	[1]
ε_l	poměrná deformace délky hadice	[1]
ε_n	poměrná deformace stěny ve směru kolmém k ose nití	[1]
ε_n^*	jmenovitá poměrná deformace ve směru kolmém k ose nití	[1]
ε_o	poměrná deformace ve směru osy nití	[1]
$\varepsilon_x, \varepsilon_y$	poměrné deformace ve směrech os X, Y	[1]
$\mu_{I,II,III}$	poissonova konstanta pro duši, tlakovou vložku a obal	[1]
ρ_K	měrná hustota kapaliny	[kgm ⁻³]
β_m	střední kvadratická chyba	[1]
σ_n	napětí ve směru kolmém k ose nití	[MPa]
σ_o	napětí ve směru osy nití	[MPa]
σ_r	radiální napětí	[MPa]
σ_t	obvodové napětí	[MPa]

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{Eh} \right) \Delta p \quad (1-1)$$

Měření ukázalo, že rozdíl mezi výpočtem podle vzorce (1-1) a experimentem je 4%. Je to poměrně malý rozdíl a takže k výpočtu ΔV lze vzorec používat. Naproti tomu pro hadicové vedení vyskytující se u částí, konajících relativní pohyb, nebo majících složité spojení, nemáme zatím způsoby výpočtu, které dávaly shodné výsledky se skutečností. Vlastnosti hadice (odpory, deformace, kapacita, modul pružnosti atd.) závisí na mnoha jejích parametrech. Např. pro hadici máme:

$$\Delta V = V_0 \left[\frac{\Delta p}{K} + f(M, p) \right] \quad (1-2)$$

kde:

$f(M, p)$ je funkce, vyjadřující vliv materiálových, geometrických a konstrukčních parametrů stěny hadice, uzavírající geometrický objem V_0 , na působícím tlaku.

Namůžeme matematicky vypočítat změnu objemu hadice ΔV , protože nemáme k dispozici $f(M, p)$. Ale ukázalo se, že změnu objemu ΔV i jiné vlastnosti hadic teoreticko-expe-

1. ÚVOD jejich vliv na chování hydraulického mechanismu, museli bychom používat způsobu teoreticko-experimentálního vy-

Dosažení mechanisace a zejména automatisace výrobního procesu je jedním z hlavních požadavků současnosti. Při řešení těchto úkolů hrají důležitou úlohu hydraulické mechanismy, které se v posledních letech rozšířily do mnoha výrobních oborů a úspěšně se uplatňují zejména v souvislosti s automatizací, samočinnou regulací a programovým řízením. Hydraulické mechanismy se stále používají v průmyslu a zejména ve strojírenských výrobcích.

Hydraulický mechanismus se skládá z mnoha prvků a částí (z čerpadla, motoru, ovládacích členů, pomocných členů a z vedení). Vedení je jedna z nezbytných součástí hydraulického mechanismu a jeho vlastnosti mají vliv na chování hydraulického mechanismu. U hydraulických mechanismů je používáno kovové (ocelové) a hadicové vedení, jejichž vlastností a použití jsou různé. Např. pro ocelovou trubku lze změnu objemu při statickém stavu určit ze vztahu:

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E L} \right) \Delta p \quad (1 - 1)$$

Měření ukázalo, že rozdíl mezi výpočtem podle vzorce (1 - 1) a experimentem je 4%. Je to poměrně malý rozdíl a takže k výpočtu ΔV lze vzorce používat. Naproti tomu pro hadicové vedení vyskytující se u částí, konajících relativní pohyb, nebo majících složité spojení, nemáme zatím způsoby výpočtu, které dávaly shodné výsledky se skutečností. Vlastnosti hadice (odpory, deformace, kapacita, modul pružnosti atd.) závisí na mnoha jejích parametrech. Např. pro hadici máme:

$$\Delta V = V_0 \left[\frac{\Delta p}{K} + f(M, p) \right] \quad (1 - 2)$$

kde:

$f(M, p)$ je funkce, vyjadřující vliv materiálových, geometrických a konstrukčních parametrů stěny hadice, uzavírající geometrický objem V_0 , na působícím tlaku.

Nemůžeme matematicky vypočítat změnu objemu hadice ΔV , protože nemáme k dispozici $f(M, p)$. Ale ukázalo se, že můžeme změnu objemu ΔV i jiné vlastnosti hadic teoreticko-expe-

rimentálním vyšetřením. T. zn. abychom zjistili vlastnosti hadice a jejich vliv na chování hydraulického mechanismu, museli bychom používat způsobu teoreticko-experimentálního vyšetřování. Dosud byly otázky týkající se tohoto problému postupně a částečně zkoumány a řešeny mnoha autory.

1. 1. Přehled o současném stavu problematiky, která je předmětem disertace:

- Řešené problémy jsou orientovány na tři hlavní otázky :
- Vyšetřování statických a dynamických vlastností kapaliny v potrubí
 - Vyšetřování kapacitních vlastností a dynamických charakterů hydraulického potrubí ocelového a hadicového
 - Zjišťování dynamiky hydraulických mechanismů.

Tyto otázky dostaly značnou pozornost od mnoha autorů již od šedesátých let. Vicent, G.M. /33/ psal o pojmu objemového modulu a jeho důležitost. Výsledky při zkoumání Haywarda, A.T.J. /13/ se týkají způsobu hodnocení objemového modulu pružnosti hydraulických tekutin a zevšeobecnění izotermické a adiabatické stlačitelnosti hydraulického minerálního oleje. Hudcovský, F. /14/ teoreticko-experimentálně vyšetřoval objemovou pružnost kapalin. Jeho práce představuje stavovou rovnici kapaliny, stlačitelnost a objemový modul pružnosti kapaliny, dynamický proces deformace pracovní kapaliny. Fischer, J. /10/ podal experimentální výzkum dynamických vlastností kapaliny v potrubí. Ve spojení s vlastností kapaliny Pavluch, L. /21/ a později Čarují, I.A. /5/ vyšetřovali nestacionární proudění reálné kapaliny v potrubí.

Problém zjišťování vlastností ocelových a hadicových vedení zajímá také mnohé autory. Zymák, V. se věnoval přenosu tlakové energie dlouhým potrubím a tlakovému kmitu v hydraulickém obvodu /38/. Jeho díla o přenosové matici hydraulických potrubí a vlivu počátečních podmínek na přenosové poměry hydraulických potrubí /34/, /35/, ve kterých představuje řešení dynamiky potrubí pomocí symbolické metody operátorového a maticového výpočtu, umožňují výzkumníkům a konstruktérům analyzovat činnosti hydraulických mechanismů. Zymák, V. se také zabýval dynamickými charakteristikami hydraulického potrubí s oscilačním průtokem /37/. Schaedel, H. /28/

teoreticko-experimentálně vyšetřoval vedení a koncentrační prvky tekutin. Roman, N.M. /26/ analyzoval dynamické procesy v potrubí.

Různé autory zajímaly rovněž vlastnosti hadicového vedení. Cerha, J. /2/ podal experimentální vyšetření kapacitních vlastností hadicového vedení, a ukázal dvě možnosti zjistit kapacitní parametry hadice: pomocí vyteklého množství kapaliny z "natlakované" hadice nebo proměřením geometrických parametrů (vnějšího průměru a délky) hadice při změně vnitřního přetlaku. Kopáček, J. /16/ experimentálním měřením zjistil objemový modul pružnosti několika druhů pryžových hadic. Výsledky umožňují vypočítat odpory proti deformaci nebo příslušné kapacity hadice i vyšetřovat dynamické chování hydraulických mechanismů, u nichž se vyskytuje hadice.

Dynamické chování hydraulických mechanismů a jejich jednotlivých prvků patří v současné době k neaktuálnějším problémům. Práce Dráždila, M. /7/ a /8/ se zabývaly základními problémy dynamické syntézy hydraulických mechanismů sestavených z typických prvků a umožňují vyšetřovat dynamiku hydraulického mechanismu metodou teorie lineární regulace, kdy lze dynamické chování mechanismu popisovat pomocí přenosů, přechodových a frekvenčních charakteristik a blokových schémat. Prokeš, J. /24/ provedl možnosti syntézy hydraulických mechanismů s použitím samočinného počítače. Zymák, V. /36/ zkoumal dynamiku hydraulických obvodů a metody jejich řešení. Je to analytická metoda, která je použitelná pro lineární poměry, graficko-početní metoda a metoda s použitím elektro-
nického analogového počítače. Podobnými způsoby Prokofjev, V. N. vyšetřoval vliv deformace kapaliny na dynamiku hydraulického obvodu /25/.

1. 2. Cíl disertace:

Na základě dosavadních prací a jako jejich pokračování jsem za cíl své disertace zvolil zkoumání základních vlastností hadicového vedení a jejich vlivu na chování hydraulických mechanismů.

Disertační práce obsahuje hlavní obsahy následující :

- + Studium kapacitních vlastností kapalin používaných v hydrau-

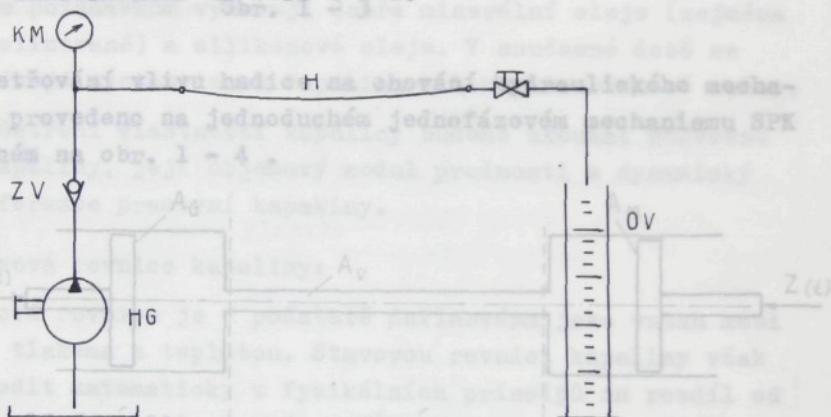
- lických mechanismech, tj. lapovaného pístu zatlačovaného do val-
- + konstrukce a vlastnosti hadicového vedení, - 3 . 2 hodnoty
- + teoreticko-experimentální vyšetřování objemových změn hadi-
- cového vedení,
- + vyšetřování vlivu hadice na chování jednoduchého hydraulického mechanismu.

1. 3. Zvolené metody zpracování:

Při vyšetřování budu používat metody teoreticko-experimentální.

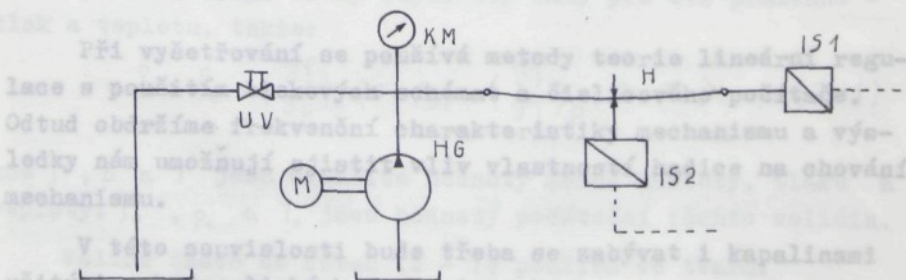
Pro zjišťování objemových změn hadicového vedení použiji tří metod:

a) měření a určování množství kapaliny vyteklé z měřené hadice do odměřené trubice při změně vnitřního tlaku podle principu znázorněného na obr. 1 - 1.



Obr. 1 - 1

b) proměření geometrických parametrů (vnějšího průměru a délky) hadice, podle principu na obr. 1 - 2 .



Obr. 1 - 2

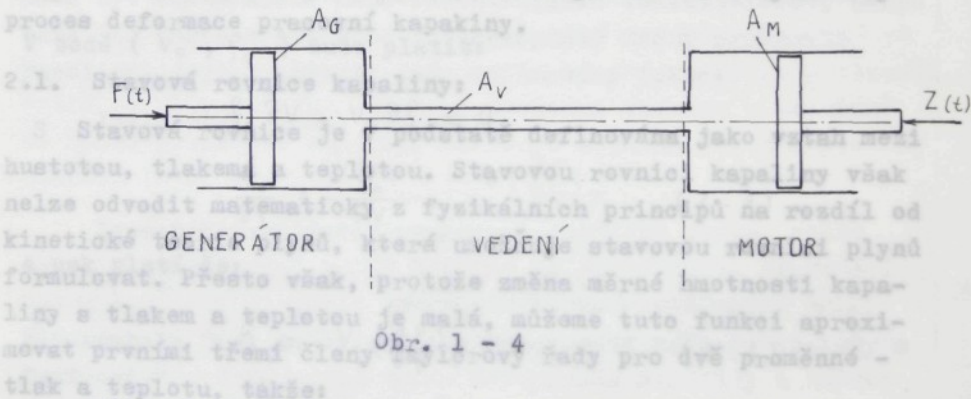
c) měření posunutí lapovaného pístu zatlačovaného do válce o známém průměru podle principu na obr. 1 - 3. Z hodnoty posunutí pístu X a průměru D_p lze vypočítat změnu objemu hadice ΔV .

Hlavní funkcí kapaliny v hydraulickém mechanismu je přenos tlakové energie. Na kapaliny používané v hydraulických pohonech jsou kladeny značné požadavky, které jsou podmíněny jejich kombinováním s ostatními. Hlavní z požadavků jsou:

- a) vstřebávání kapalin při provozní teplotě odhalování
- b) musí mít při provozní teplotě d
- c) nemají obsahovat kap
- d) musí mít dobrý
- e) mají
- f) se největší modul pružnosti - s tím je spojená otázka kapacity mechanismu, tedy jeho tuhosti a přesnosti práce;

Při těchto požadavcích v Obr. 1 - 3 je minerální oleje (zejména tzv. viskozitní) a silikonové oleje. V současné době se také vyšetřování vlivu hadice na chování hydraulického mechanismu je provedeno na jednoduchém jednofázovém mechanismu SPK znázorněném na obr. 1 - 4.

proces deformace pružnosti kapalin.



Obr. 1 - 4

Při vyšetřování se používá metody teorie lineární regulace s použitím blokových schémat a číslicového počítače. Odtud obdržíme frekvenční charakteristiky mechanismu a výsledky nám umožňují zjistit vliv vlastností hadice na chování mechanismu.

V této souvislosti bude třeba se zabývat i kapalinami užitými v hydraulických mechanismech.

2. KAPALINY POUŽÍVANÉ V HYDRAULICKÝCH MECHNISMECH :

Kapaliny jsou důležitou součástí operátoru hydraulického převodu. Hlavní funkcí kapaliny v hydraulickém mechanismu je přenášení tlakové energie. Na kapaliny používané v hydraulických pohonech jsou kladeny značné požadavky, které jsou podmíněny jejich kombinovaným namáháním. Hlavní z požadavků jsou:

- a) vypařování kapaliny při provozní teplotě co nejmenší,
- b) musí mít při provozní teplotě dostatečnou tekutost, aby byly hydraulické odpory malé,
- c) nemají obsahovat kapalně nebo pevně nečistoty,
- d) musí mít dobré mazací vlastnosti,
- e) mají mít co nejmenší změnu viskosity při změně teploty,
- f) co největší modul pružnosti - s tím je spojená otázka kapacity mechanismu, tedy jeho tuhosti a přesnosti práce;

Těmto požadavkům vyhovují dobře minerální oleje (zejména tzv. voltolizované) a silikonové oleje. V současné době se také používají syntetickou kapalinu a lihoglicerinnové směsi.

K vyšetření vlastností kapaliny budeme zkoumat stavovou rovnici kapaliny, její objemový modul pružnosti a dynamický proces deformace pracovní kapakiny.

2.1. Stavová rovnice kapaliny:

Stavová rovnice je v podstatě definována jako vztah mezi hustotou, tlakem a teplotou. Stavovou rovnici kapaliny však nelze odvodit matematicky z fyzikálních principů na rozdíl od kinetické teorie plynů, která umožňuje stavovou rovnici plynů formulovat. Přesto však, protože změna měrné hmotnosti kapaliny s tlakem a teplotou je malá, můžeme tuto funkci aproximovat prvními třemi členy Taylorovy řady pro dvě proměnné - tlak a teplotu, takže:

$$\rho = \rho_0 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_T (p - p_0) + \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_p (T - T_0) + \dots \quad (2-1)$$

kde ρ , p a T jsou okamžité hodnoty měrné hustoty, tlaku a teploty; ρ_0 , p_0 a T_0 jsou hodnoty počáteční těchto veličin.

Velice často se vztah (2 - 1) používá ve tvaru:

Součinitel α vyjadřuje změnu objemu s teplotou při

konstantní tlaku a nazývá se součinitel objemového roztažení.

$$\beta = \beta_0 \left[1 + \frac{1}{K} (p - p_0) - \alpha (T - T_0) \right] \quad (2-2)$$

Hodnota β_0 vyjadřuje změnu objemu se změnou tlaku při konstantní teplotě a nazývá se izotermický objemový modul pružnosti (krátký modul pružnosti kapaliny).

kde:

$$K = \left(\frac{\partial p}{\partial \beta} \right)_T \beta_0 \quad \alpha = -\frac{1}{\beta_0} \left(\frac{\partial \beta}{\partial T} \right)_p$$

Dále se budeme zabývat objemovým modulem pružnosti kapaliny.

Rovnice (2-1) resp. (2-2) je linearizovaná stavová rovnice kapaliny. Tedy měrná hustota se zvětšuje se zvětšujícím se tlakem a naopak zmenšuje s rostoucí teplotou. Protože měrná hmotnost kapaliny vztažená na určitý objem, můžeme volit objem V tak, aby platilo:

$$V \cdot \beta = (2-4)$$

Po derivaci obdržíme:

$$K = -V_0 \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T$$

$$\frac{\partial}{\partial p} (V \cdot \beta) = 0$$

anebo: Tato definice modulu pružnosti kapaliny je totiž jediná, která platí pro termodynamické výpočty. Protože stlačení může být izotermické nebo izentropické (adiabatické), nazýváme

V bodě (V_0, β_0) bude platit:

kapaliny. Jejich hodnoty jsou definovány takto:

Izotermický modul pružnosti:

$$\beta_0 \frac{\partial V}{\partial \beta} + V_0 \frac{\partial \beta}{\partial \beta} = 0$$

$$\frac{\beta_0}{\partial \beta} = -\frac{V_0}{\partial V} = -V_0 \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T \quad (2-3)$$

Izentropický modul pružnosti:

a pak platí že:

$$K = -V_0 \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_S$$

kde symboly T a S značí konstantní teplotu a "entropie".

Dále vyšetřujeme pouze izotermický objemový modul pružnosti kapaliny (nazývá se krátce modul pružnosti kapaliny) a používáme symbolu K místo symbolu K_T .

kde V je celkový objem a V_0 je počáteční celkový objem kapaliny. Obsahuje vždy nevelké množství vzduchu, jak rozpustného, tak vyloučeného ve formě bublinek. Odstranit

Součinitel α vyjadřuje změnu objemu s teplotou při

konstantním tlaku a nazývá se součinitel objemového roztažení. Za obvyklých podmínek může být v kapalině systému

Hodnota K vyjadřuje změnu objemu se změnou tlaku při konstantní teplotě a nazývá se izotermický objemový modul pružnosti (krátce modul pružnosti kapaliny). určité velikosti

Dále se budeme hlouběji zabývat objemovým modulem pružnosti kapaliny.

2.2 Objemový modul pružnosti kapaliny:

Modul pružnosti je velmi důležitým parametrem kapaliny, protože ovlivňuje dynamické vlastnosti hydraulického mechanismu. Objemový modul pružnosti kapaliny při stlačení je mírou odporu kapaliny k zmenšení svého objemu při působení přetlaku. Je definovaný vztahem (2 - 4) :

$$K = -V_0 \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)$$

Tato definice modulu pružnosti kapaliny je totiž jediná, která platí pro termodynamické výpočty. Protože stlačení může být izotermické nebo izoentropické (adiabatické), nazýváme jej izotermický nebo izoentropický modul pružnosti kapaliny. Jejich hodnoty jsou definovány takto:

Izotermický modul pružnosti:

$$K_T = -V_0 \left(\frac{\partial P}{\partial V} \right)_T$$

Izoentropický modul pružnosti: kapaliny zcela, nelze tedy ve skutečnosti určit a měřit objemový modul pružnosti pouze kapaliny K , ale

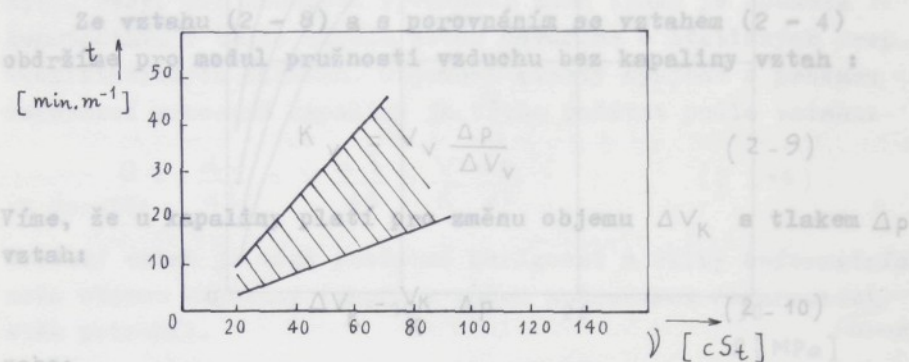
kde symboly T a ad platí pro konstantní hodnoty teploty a "entropie". sestávající se ze dvou fází: kapaliny a neroz-

Dále vyšetřujeme konkrétně pouze izotermický objemový modul pružnosti kapaliny (nazývá se krátce modul pružnosti kapaliny) a používáme symbolu K místo symbolu K_T .

Víme, že kapalina, obíhající v obvodu hydraulického mechanismu obsahuje vždy nevelké množství vzduchu, jak rozpuštěného, tak vyloučeného ve formě bublinek. Odstranit vzduch z kapaliny zcela není možné. V nejlepším případě ob-

sahuje kapalina ne méně než $(0,3 + 0,5)\%$ nerozpuštěného vzduchu. Za obvyklých podmínek může být v kapalině systému $(3 + 5)\%$ nerozpuštěného vzduchu /14/ .

Pro zajímavost si všimněme obr. 2 - 1, kde je zachycen čas potřebný pro uniknutí vzduchové bublinky určité velikosti z minerálního oleje z hloubky 1 m v závislosti na viskozitě oleje η .



Obr. 2 - 1

Jestliže rozpuštěný vzduch v kapalině nemá praktický vliv na modul pružnosti kapaliny, potom vzduch vyloučený ve formě bublinek může mít značný vliv na změnu modulu pružnosti. Právě na úkor velkého stlačení bublinek vzduchu v kapalině se modul pružnosti kapaliny zmenšuje zejména při nízkých tlacích (obr. 2 - 2).

Není možné odstranit vzduch z kapaliny zcela, nelze tedy ve skutečnosti určit a měřit objemový modul pružnosti pouhé kapaliny K , ale jenom modul pružnosti směsi $\bar{K}$. Všimněme si nyní procesu stlačení a objemového modulu pružnosti směsi sestávající se ze dvou fází: kapaliny a nerozpuštěného vzduchu (plynu), za předpokladu, že objem vzduchu bude konstantní a tlaky v kapalně a plyné fázi budou stejné.

Nechť tedy při atmosférickém tlaku p_0 je objem kapaliny V_{K0} a vzduchu V_{V0} . Při tlaku p pak bude objem vzduchu $V_V + \Delta V_V$ a při kompresi $p + \Delta p$ bude objem vzduchu V_V . Za předpokladu izotermické změny bude podle Boyleva zákona:

Závislost $\bar{K}/K$ na tlaku p je na obr. 2 - 2, na vlnitosti

$$p(V_v + \Delta V_v) = (p + \Delta p)V_v \quad (2 - 7)$$

Po úpravě obdržíme:

$$\Delta V_v = V_v \cdot \frac{\Delta p}{p} \quad (2 - 8)$$

Ze vztahu (2 - 8) a s porovnáním se vztahem (2 - 4) obdržíme pro modul pružnosti vzduchu bez kapaliny vztah :

$$K_v = V_v \frac{\Delta p}{\Delta V_v} \quad (2 - 9)$$

Víme, že u kapaliny platí pro změnu objemu ΔV_K s tlakem Δp vztah:

$$\Delta V_K = \frac{V_K}{K} \cdot \Delta p \quad (2 - 10)$$

nebo:

$$K = V_K \frac{\Delta p}{\Delta V_K} \quad (2 - 11)$$

S ohledem na vztahy (2 - 9) a (2 - 11) můžeme pro modul pružnosti směsi sestávající z kapaliny a nerozpuštěného vzduchu psát:

$$\bar{K} = V \frac{\Delta p}{\Delta V} = \frac{V_K + V_v}{\Delta V_K + \Delta V_v} \cdot \Delta p \quad (2 - 12)$$

Při aplikaci (2 - 8), (2 - 10) a s přihlednutím, že $V_{v0} \cdot p_0 = V_v \cdot p$ a $p_0 = 9,8066 \cdot 10^4 \text{ Nm}^{-2}$, takže: $V_v = V_{v0} \cdot 10^5 \frac{1}{p}$ lze po úpravě psát vztah (2 - 12) ve tvaru:

$$\bar{K} = \frac{V}{V_{v0}} \cdot \frac{dV}{d\epsilon} = \frac{V_K}{V_{v0}} \cdot p \cdot 10^{-5} \quad (2 - 13)$$

Lineární zákon o deformaci za předpokl. (2 - 13) proces je dostatečně dlouhý tak, aby mohlo dojít k ustálení rovnovážného stavu, vede $\frac{K}{p} + \frac{V_K}{V_{v0}} \cdot p \cdot 10^{-5}$ změny tlaku na změnu deformace:

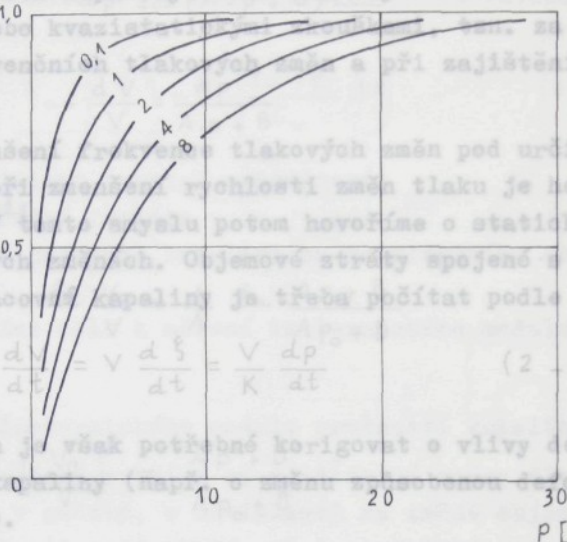
$$dp = K \cdot d\epsilon \quad (2 - 15)$$

Závislost $\bar{K}/K$ na tlaku p je na obr. 2 - 2. Na rychlosti změny tlaku, je již dříve zmíněným isothermickým modulem objemové pružnosti kapaliny. Jeho hodnoty se mohou stanovit statickým nebo kvazistatickým způsobem. Při poměrně nízkých frekvencích tlakových změn a při zajištění isothermické změny.

Při zmenšení frekvence tlakových změn pod určitou hranici, resp. při zmenšení rychlosti změny tlaku je hodnota K konstantní. V tomto případě potom hovoříme o statických resp. kvazistatických změnách. Objemové stráty spojené s pružnou deformací pracovní kapaliny je třeba počítat podle vztahu:

$$Q = - \frac{dV}{dt} = V \frac{d\xi}{dt} = \frac{V}{K} \frac{dp}{dt} \quad (2 - 16)$$

Uvedený vztah je však potřebné korigovat o vlivy deformačních změn objemu kapaliny (např. o změnu hustoty kapaliny a deformaci stěn potrubí).



Obr. 2 - 2

Při adiabatické, resp. polytropické změně je výpočet poněkud komplikovanější a také i výsledný vztah. Přitom se nevyhneme rozvoji v řadu, takže konečný vztah vystihuje skutečnost jenom přibližně. Přistoupíme k vyšetřování dynamického procesu deformace pracovní kapaliny.

2.3. Dynamický proces deformace pracovní kapaliny:

Působením tlaku na pracovní hydraulickou kapalinu se mění v důsledku její stlačitelnosti její objem a měrná hustota. Tuto změnu objemu V a hustoty ρ je možné definovat ve vztahu k deformaci ξ takto (viz. vztah (2 - 3)):

$$\text{Protože však } - \frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho} = d\xi, \text{ je nutné při výpočtu (2 - 14) deformací volit } K_0 \text{ velmi opatrně. Pro některé minerální oleje je}$$

závislost K na tlaku p dostatečně dlouhá tak, aby mohlo dojít k ustálení rovnovážného stavu, vede k přímé závislosti změny tlaku na změně deformace: do rovnice (2 - 15) za K s $d\xi$, pak:

$$dp = K \cdot d\xi \quad (2 - 15)$$

Koeficient úměrnosti K , který je nezávislý na rychlosti změny tlaku, je již dříve zmíněným izotermickým modulem objemové pružnosti kapaliny. Jeho hodnoty se mohou stanovit statickými nebo kvazistatickými zkouškami, tzn. za poměrně nízkých frekvenčních tlakových změn a při zajištění izotermické změny.

Při zmenšení frekvence tlakových změn pod určitou hranici, resp. při zmenšení rychlosti změn tlaku je hodnota K konstantní. V tomto smyslu potom hovoříme o statických resp. kvazistatických změnách. Objemové ztráty spojené s pružnou deformací pracovní kapaliny je třeba počítat podle vztahu:

$$Q = - \frac{dV}{dt} = V \frac{d\xi}{dt} = \frac{V}{K} \frac{dp}{dt} \quad (2 - 16)$$

Uvedený vztah je však potřebné korigovat o vlivy deformačních změn objemu kapaliny (např. o změnu způsobenou deformacemi stěn potrubí).

Při určování deformací způsobených konečnou změnou tlaku Δp je možné použít linearizovaný výraz (2 - 15), a to ve formě konečných rozdílů, ale to jen tehdy, jestliže hodnota Δp se neliší příliš v porovnání s hodnotami $K_0 \approx K$.

$$\Delta p = - K_0 \frac{\Delta V}{V} \quad (2 - 17)$$

Při jakýchkoli větších změnách tlaku je nutné provést integraci rovnice (2 - 15).

Jestliže K = konstantní a při malých tlakových spádech vede integrace rovnice (2 - 15) k této exponenciální závislosti:

$$V = V_0 e^{-\frac{p-p_0}{K}} \quad (2 - 18)$$

Protože však v praxi $K \neq K_0$, je nutné při výpočtech deformací volit K_0 velmi opatrně. Pro některé minerální oleje je závislost K na p lineární:

$$K = A \cdot p + B \quad (2 - 19)$$

Dosadíme-li do rovnice (2 - 15) za K a $d\xi$, pak:

$$K_{ad} = \rho \cdot c^2 \quad (2.22)$$

a převeď na hodnotu $d\rho = -(A \cdot p + B) \frac{dV}{V}$ podle vztahu:

$$K_{ad} = \frac{dV}{V} = \frac{dp}{A \cdot p + B} \cdot \frac{1}{C_V} \quad (2.23)$$

kde: α - koeficient tepelní roztlačnosti

a po integraci:

C_V - měrná kapacita kapaliny za konstantního objemu.

/14/.

$$\ln \frac{V_0}{V} = \frac{1}{A} \ln \frac{A p + B}{A p_0 + B}$$

Přistoupíme dále k měření izotermického modulu pružnosti

kapaliny.

Po úpravě:

2.4. Měření izotermického modulu pružnosti kapaliny:

Princip měření spočívá v měření izotermické změny tlaku p kapaliny uzavřené v nádobě, v níž lze měřit na změnu objemu V . Víme, že podle vztahu (2 - 4) platí pro izotermický objemový modul a dále upravíme na konečnou rovnici:

$$\left(p + \frac{B}{A}\right) V^A = \left(p_0 + \frac{B}{A}\right) V_0^A \quad (2.20)$$

Uspořádáme-li nyní měření podle obr. 2 - 3, můžeme při nebo po dosazení za $V = \frac{1}{\rho}$ dostaneme:

vypočítat objemový modul pružnosti kapaliny K .

Obvod pro měření tlaku p a objemu V kapaliny (2 - 3) se skládá z tlakové nádoby (TN), dvou společně ovládaných ventílů (V_1, V_2) a sadky měřících přístrojů.

Z rovnice je vidět, že v intervalu tlakové změny, ve kterém veličina $d\rho/dp$ se může pokládat za konstantní, je $A=1$. Po získání konstant A a B dosadíme do rovnice (2 - 19), odkud obdržíme modul pružnosti kapaliny.

Dynamické procesy v kapalinách však většinou neprobíhají izotermicky. Tyto děje přesněji vystihuje izoentropická (adiabatická) změna. V této souvislosti pak hovoříme o izoentropickém modulu pružnosti K_{ad} . Tento modul je možno určit z rychlosti šíření tlakových kmitů v kapalině. Pak bude platit rovnice:

$$K_{ad} = \rho \cdot c^2 \quad (2.22)$$

a převod na hodnotu K je možné provést podle vztahu:

$$K_{ad} = \left(1 + \frac{\alpha^2 \cdot T_a \cdot K}{\rho \cdot C_V} \right) K \quad (2.23)$$

kde: α - koeficient tepelní roztažnosti

T_a - absolutní teplota

C_V - měrná kapacita kapaliny za konstantního objemu.

/14/.

Přistoupíme dále k měření izotermického modulu pružnosti kapaliny.

2.4. Měření izotermického modulu pružnosti kapaliny:

Princip měření spočívá ve zjišťování změny tlaku p kapaliny uzavřené v nádobě, v závislosti na změně objemu V . Víme, že podle vztahu (2 - 4) platí pro izotermický objemový modul pružnosti kapaliny:

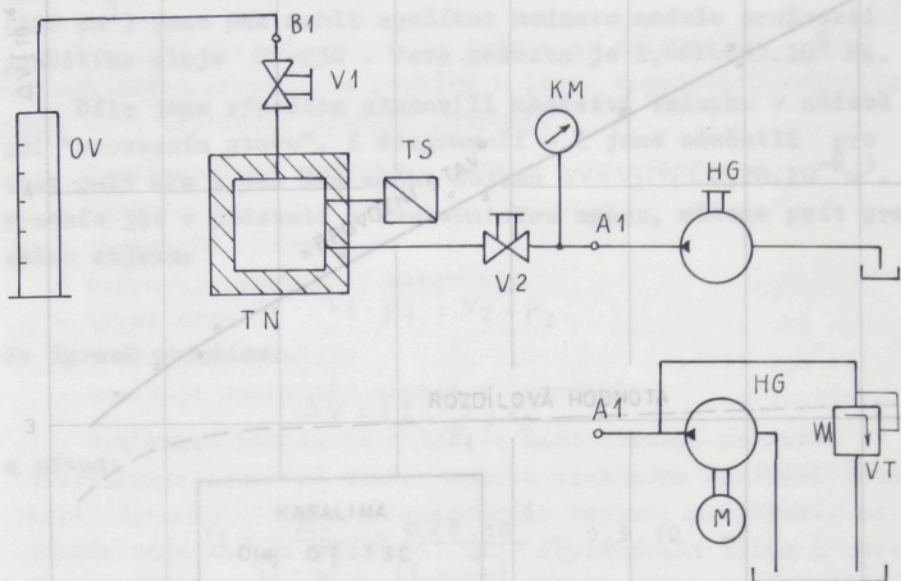
$$K = V \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

Postup měření:

Uspořádáme-li nyní měření podle obr. 2 - 3, můžeme při známém objemu V nádoby a naměřených hodnotách ΔV a Δp vypočítat objemový modul pružnosti kapaliny K .

3/ Obvod pro měření objemového modulu kapaliny (obr. 2 - 3) se skládá z tlakové nádoby (TN), dvou ručně ovládaných ventilů (V1, V2) a odměrného válce (OV). Napájení může být buď ručním hydrogenerátorem nebo hydrogenerátorem s elektrickým motorem (M). Obvod je vybaven kontrolním manometrem (KM). Tlaková nádoba (TN) je válcového tvaru a je vybavena z konstrukční oceli. Objem nádoby je 200 cm³. Stěny jsou dostatečně silné, abychom zanedbali zvětšení objemu nádoby vlivem tlaku. (Pro namáhání tlaku 15 MPa činí změna objemu vlivem roztažnosti stěn 0,14% celkového objemu). Nádoba je opatřena dvěma ventily V1 a V2 s ručním ovládáním. Ve stěně nádoby je otvor pro napojení tenzometrického tlakového snímače (TS).

/32/. Z hodnot pro "ideální stav" byla metodou nejmenších



Obr. 2 - 3

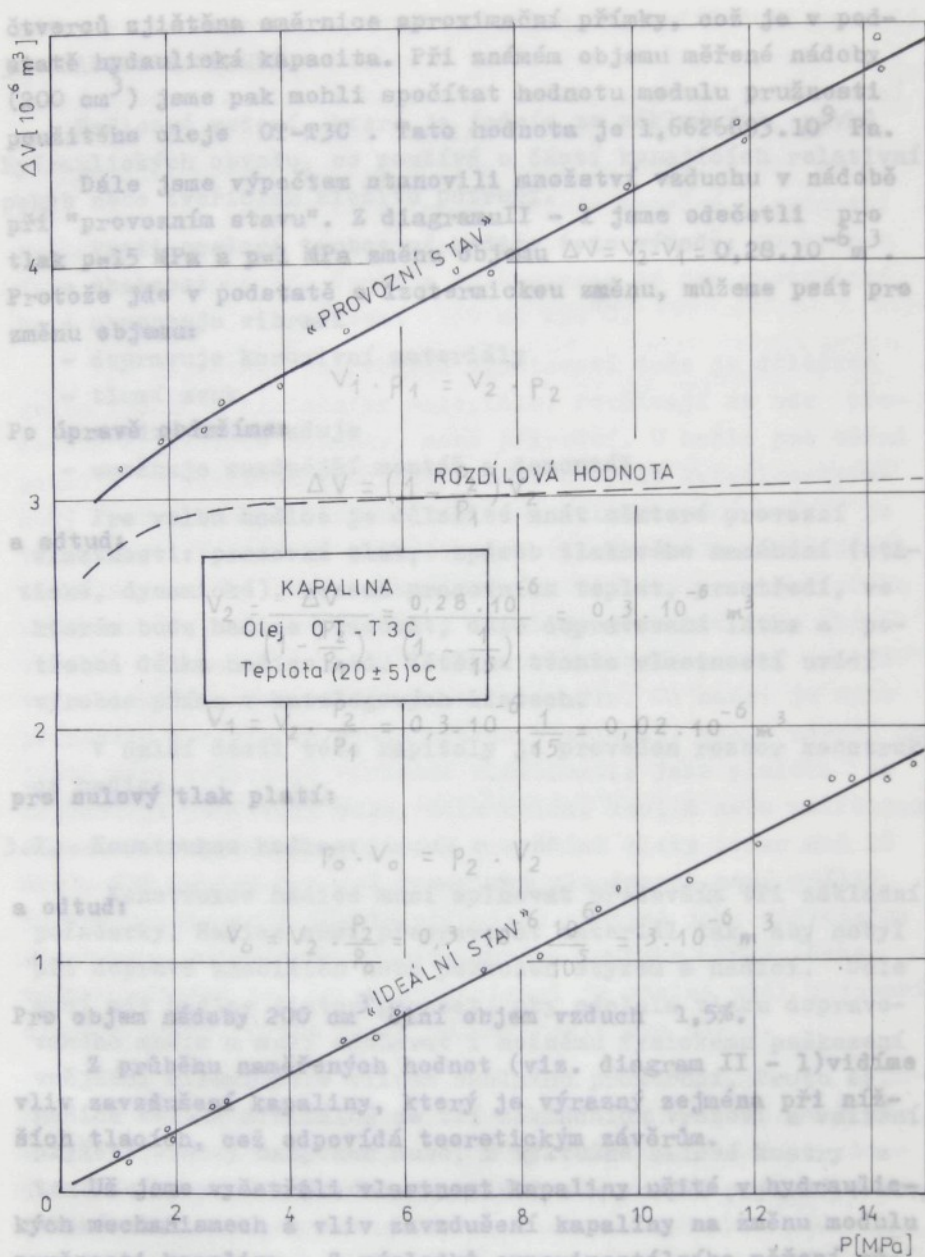
Postup měření:

- 1/ uzavřeme ventil V1 a otevřeme ventil V2
- 2/ ručním hydrogenerátorem naplníme nádobu na určitý tlak a pak uzavřeme ventil V2
- 3/ ventilem V1 odpouštíme kapalinu z nádoby do odměrného válce a zaznamenáme hodnoty Δp a ΔV .

Výsledky měření:

Všechny naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu (diagr. II - 1). Je to měření modulu pružnosti kapaliny v "ideálním" (odvzdušněným) a v "provozním stavu". "Ideálním stavem" rozumíme stav kapaliny v nádobě po naplnění ruční pumpou. "Provozním stavem" rozumíme takový stav, kdy byl obvod připojen k zdroji tlaku HA - 1,2 - 200 a po dobu 10ti minut byl v činnosti. Ze závislosti pro "provozní stav" a "ideální stav" byla utvořena rozdílová hodnota.

Z hodnot pro "ideální stav" byla metodou nejmenších



čtverců zjištěna směrnice aproximační přímky, což je v podstatě hydraulická kapacita. Při známém objemu měřené nádoby (200 cm^3) jsme pak mohli spočítat hodnotu modulu pružnosti použitého oleje OT-T3C. Tato hodnota je $1,6626693 \cdot 10^9 \text{ Pa}$.

Dále jsme výpočtem stanovili množství vzduchu v nádobě při "provozním stavu". Z diagramu II - 1 jsme odečetli pro tlak $p=15 \text{ MPa}$ a $p=1 \text{ MPa}$ změnu objemu $\Delta V = V_2 - V_1 = 0,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$. Protože jde v podstatě o izotermickou změnu, můžeme psát pro změnu objemu:

$$V_1 \cdot p_1 = V_2 \cdot p_2$$

Po úpravě obdržíme:

$$\Delta V = \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right) V_2$$

a odtud:

$$V_2 = \frac{\Delta V}{\left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right)} = \frac{0,28 \cdot 10^{-6}}{\left(1 - \frac{1}{15}\right)} = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_1 = V_2 \cdot \frac{p_2}{p_1} = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1}{15} = 0,02 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

pro nulový tlak platí:

$$p_0 \cdot V_0 = p_2 \cdot V_2$$

a odtud:

$$V_0 = V_2 \cdot \frac{p_2}{p_0} = 0,3 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{10^6}{10^5} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Pro objem nádoby 200 cm^3 činí objem vzduch 1,5%.

Z průběhu naměřených hodnot (viz. diagram II - 1) vidíme vliv zavzdušení kapaliny, který je výrazný zejména při nižších tlacích, což odpovídá teoretickým závěrům.

Už jsme vyšetřili vlastnost kapaliny užitá v hydraulických mechanismech a vliv zavzdušení kapaliny na změnu modulu pružnosti kapaliny. Z výsledků experimentálního měření můžeme izotermický modul pružnosti kapaliny považovat za konstantní. V další kapitole se budeme zabývat konstrukcí a modelní vlastnostmi hadicového vedení.

látky a zaručuje nepropustnost hadice. Materiál duše se volí
3. **HADICOVÉ VEDENÍ** hadice a tvoří jej většinou pryž. Pryž

Hadicové vedení, které je jedním ze základních prvků hydraulických obvodů, se používá u částí konajících relativní pohyb nebo tvořících složité potrubí.

Proti ocelové trubce má hadice tyto výhody: po kterou

ta - ohebnost působí. Teplota vulkanizace se pro syntetické

kau - absorbuje vibraci mezi 150 až 230°C.

- dopravuje korozivní materiály

- tlumí zvuk

- snadno se skladuje

- umožňuje snadnější montáž a demontáž.

Pro volbu hadice je důležité znát některé provozní je
vlastnosti: pracovní tlak, způsob tlakového namáhání (sta-
tické, dynamické), rozsah pracovních teplot, prostředí, ve
kterém bude hadice pracovat, dále dopravovaná látka a po-
třebná délka hadice atd. Většinu těchto vlastností uvádí
výrobce přímo v katalogových listech.

V další části této kapitoly je proveden rozbor konstruk-
ce hadice.

3.1. **Konstrukce hadice:** jících s vyššími tlaky (více než 15

Konstrukce hadice musí splňovat především tři základní
požadavky. Hadice musí přepravovat materiál tak, aby nebyl
při dopravě znečištěn nebo poškozen stykem s hadicí. Dále
musí mít hadice jistou pevnost, aby odolala tlaku dopravo-
vaného media a musí odolávat i možnému fyzickému poškození
vnějšími silami nebo vlivem okolního prostředí. Proto se ha-
hadice skládá minimálně ze tří základních vrstev: z vnitřní
pryžové vrstvy nazývané duše, z výztužné silové kostry z
textilního nebo kovového materiálu a z vnější pryžové vrstvy
zvané obal.

3.1.1. **Duše:**

Duše tvoří vnitřní vrstvu hadice, která musí být odolná
vůči dopravované látce; přenáší tlak této látky na tlakovou
vložku, chrání tlakovou vložku před chemickým působením.

látky a zaručuje nepropustnost hadice. Materiál duše se volí s ohledem na použití hadice a tvoří jej většinou pryž. Pryž se získává vulkanizací kaučukové směsi, přičemž vulkanizací rozumíme vytváření pevné chemické vazby mezi jednotlivými molekulami kaučuku pomocí vulkanizačního činidla při působení teploty. Jakost této vazby určuje konečné vlastnosti vulkanizátoru a je závislá na teplotě a na době, po kterou tato teplota působí. Teplota vulkanizace se pro syntetické kaučuky pohybuje v rozmezí 150 až 230°C.

Pro zajištění potřebných vlastností duše je důležitá volba vhodného základního materiálu. Používají se zde především syntetické kaučuky, méně přírodní. U hadic pro běžná použití je základem kaučukové směsi obvykle butadienstyrenový kaučuk (SBR). Složení výsledné vulkanizační směsi je různé a je závislé na požadovaných vlastnostech. Nejčastěji se skládá z síry jako vulkanizačního činidla, z organického urychlovače, zinkové bělohy a kyseliny stearové jako aktivátorů. Pro zajištění lepší zpracovatelnosti pryže, se do vulkanizační směsi přidávají změkčovadla. Do směsi je dále přidáváno plnidlo (z ekonomického hlediska), které rovněž do jisté míry ovlivňuje výsledné vlastnosti; jako plnidla se nejčastěji používají saze, dále křída, kaolin nebo uhličitán vápenatý. U hadic pracujících s vyššími tlaky (více než 15 MPa), SBR kaučuk pro své dynamické vlastnosti není příliš vhodný, proto se v těchto případech používá jako základního elastomeru butadienakrylonitrilového kaučuku (NBR). Jeho velkou výhodou je, že po vulkanizaci je odolný vůči působení olejů a paliv. Proto tvoří základ hadic pro oleje.

Z dalších materiálů se používají plastické hmoty. U hadic nízkotlakých PVC a hadic vysokotlakých polyamidy. V některých případech je duše vyráběna z termoplastických kaučuků. Pro hadice značně teplotně namáhané se s výhodou používá kaučuk chloroprenový. Jeho značnou nevýhodou však je vysoká výrobní cena. V poslední době byl vyvinut zcela nový typ kaučuku, tzv. etylénpropylénový kaučuk (EPMD), jehož použití v oblasti směsí pro výrobu hadic (pro jeho vynikající vlastnosti: vysoká odolnost proti oxidaci, chemickým činidlům, vysoké teplotě), bude v budoucnu jistě narůstat.

Na kaučukové směsi jsou kladeny důležité požadavky: vysoká pevnost za syrova, (nutná vzhledem k vysokému tahu ovinovacích strojů, aby nadocházelo k deformaci nevulkanizované duše), dále odolnost vůči vysokým teplotám ($90 + 140^{\circ}\text{C}$) a dosazení dobré adheze mezi duší a tlakovou vložkou popř. tlakovou vložkou s obalem, aby hadice byla po vulkanizaci vytvářena kompaktní celek.

Proto jsou vlastnosti nevulkanizované duše jedním z nej-důležitějších faktorů pro výrobu hadic a často určují celou technologii výroby hadic. Pro výrobu hadice existují v podstatě dvě základní technologie:

a) technologie trnová: používaná především pro výrobu vysokotlakých hadic. Uvnitř duše je během konfekce uložen trn s vnějším průměrem shodným s vnitřním průměrem vyráběné hadice. Konfekce hadice se provádí buď na ohebných nebo kovových trnech. Kovových trnů se používá pro menší délky hadic (do 20 m), materiál trnů bývá ocelová nebo duralová trubka. Ohebných trnů se používá k výrobě dlouhých hadic (až 300 m) a materiál trnů je plastická hmota (polypropylen, polyamidy) nebo pryž. V poslední době většina výrobců přechází na tuto technologii, která se stává progresivnější.

b) technologie beztrnová: používaná pro výrobu nízkotlakých hadic (např. hadice pro vodu, hadice pro svářečské plyny). V některých případech se používá pro výrobě vysokotlakých hadic speciálních, kdy je jako duše použita trubka z polyamidu.

Někdy se pro zlepšení vlastností nevulkanizované duše u vysokotlakých hadic používá ochranného opletu, který není součástí tlakové vložky, umožňuje uložení tlakové vložky tak, aby nemohlo dojít k porušení celistvosti duše. Při výrobě dlouhých hadic (100 + 300 m), se duše nechrání opletem, ale ztužuje se podchlazováním na teplotu -40 až -70°C , kdy syrová duše dostane vlastností kovu a tlaková vložka se na duši může ukládat přímo.

3.1.2. Tlaková vložka:

Tlaková vložka tvoří pevnou část hadice odolnou tlakovým

silám. Druh a způsob uložení tlakové vložky udává typ hadice.

Z hlediska tlakových sil lze hadice rozdělit na: podtlakové a tlakové; a ty pak dále na vysokotlaké a nízkotlaké.

Podle použitého materiálu tlakové vložky na:

a) hadice přízové - jsou tvořeny textilním materiálem. nejčastěji se používají chemická vlákna na bázi regenerované celulozy, vyráběná viskóзовou technologií. Méně potom přírodní materiály (bavlna, len). Z jiných materiálů jsou to polyamidy, polyester, a také polyvinylalkohol. Všechny uvedené materiály se používají výhradně ve formě kordového či technického hedvábí nebo nití z něho vyrobených. V poslední době se uplatňují vlákna na bázi aromatických polyamidů, která se pevnostně vyrovnají vláknům ocelovým.

b) hadice drátové - jsou tvořeny drátem. Používá se vysokopevnostní drát (ocelový o pevnosti až 3000 MPa, o průměrech 0,25 až 0,56 mm), který musí být i dostatečně poddajný, aby umožnil co nejkvalitnější uložení tlakové vložky. Pro dosažení dobré soudržnosti s vnější vrstvou, se používá pomosazený drát. Pro hadice bez pryžového obalu se používá pozinkovaný drát, který pro svou vyšší odolnost vůči povětrnostním vlivům zajišťuje ochranu proti vnějšímu mechanickému poškození kostry hadice.

Důležité je dosažení dobré soudržnosti tlakové vložky s ostatními vrstvami hadice. Toho se dosahuje použitím cementů, použitím impregnované příze nebo použitím adhezivních směsí.

Podle způsobu uložení tlakové vložky se hadice dělí: na hadice oplétané, hadice ovinované, hadice zavalované a případně na hadice speciální.

1/ Hadice oplétané:

Tlaková vložka těchto hadic je tvořena přízovým nebo drátovým opletem. U přízových hadic se používají až čtyři vrstvy opletu, u drátových většinou jedna nebo dvě. Polovina přízí nebo drátů tvoří pravé spirály a druhá polovina levé spirály, které jsou mezi sebou vzájemně propleteny. Soudržnost jednotlivých vrstev se zabezpečuje u přízových opletů nanášením cementů (což jsou roztoky kaučuků v organických

rozpouštědlech) na jednotlivé oplety. U drátových opletů se soudržnost dosahuje ukládáním tenké vrstvy pryže (tzv. mezigumy). Prolétáním příze nebo drátu je způsoben vlnitý tvar příze nebo drátu v místě přechodu z polohy pod do polohy nad (tzv. zvlnění).

Změna úhlu mezi pravotočivou a levotočivou spirálou v opletu způsobí u hotové hadice to, že hadice při působení tlaku mění svůj objem, což je spojeno se změnou délky a průměru hadice. Na většinu hadic je kladen požadavek na minimální změny objemu. Úhel mezi osou hadice a pramenem příze či drátu se nazývá úhlem opletu α . Úhel opletu, při kterém nedochází k žádné změně délky a průměru, se nazývá neutrální nebo také úhel rovnováhy α_n . Hodnota tohoto úhlu je pro všechny typy a průměry hadic stejná a činí $54^{\circ}44'$. Tato hodnota se dá odvodit z rovnováhy sil v hadici nebo z faktu, že objem hadice je při tomto úhlu maximální. Odvození tohoto úhlu je provedeno v kapitole 3.2.5. Je-li hodnota úhlu opletu jiná než hodnota neutrálního úhlu, dochází ke změně délky a průměru hadice tak, aby hadice zaujala maximální objem a tím se hodnota úhlu opletu změnila na neutrální. To znamená, že když úhel opletu je menší než $54^{\circ}44'$, pak při působení vnitřního přetlaku se bude délka hadice zkracovat a průměr se bude zvětšovat, a je-li úhel opletu větší než $54^{\circ}44'$ bude tomu naopak. V praxi se hodnota úhlu opletu neměří, ale počítá se z tzv. odtahu, což je délka hadice odpovídající jedné smyčce spirály $t = \pi D_s / t_g \alpha$, kde D_s je oplétaný průměr. U některých speciálních hadic je oplet hadice úmyslně uložen pod jiným úhlem než neutrálním. V těchto případech se využívá změny průměru hadice.

Pro oplétané hadice je možno si předem vypočítat tlak, při kterém dojde k porušení soudržnosti hadice (tzv. poruchový tlak). Pro jeho výpočet existují orientační vzorce, jejichž chyba však bývá až 30% /15/. Při návrhu hadice je většinou zadána hodnota poruchového tlaku, na který má být hadice vyrobena a z něho se zpětně vypočítá počet přízí nebo drátů v pramenu. U víceopletových hadic je skutečností to, že jednotlivé oplety nejsou namáhány stejnoměrně a z celkového poruchového tlaku drží první oplet u dvouopletových

hadic 2/3 a u třípletových přibližně 4/7 poruchového tlaku.

2/ Hadice ovinované:

Tlaková vložka je zde tvořena ovinem z příze či drátu. Hadice mohou mít pouze sudý počet jednotlivých vrstev ovinů. U přízových hadic se dělají většinou dvě vrstvy ovinu, u drátových až šest vrstev. Polovina vrstev tvoří pravotočivé spirály, druhá polovina levotočivé a nejsou mezi sebou vzájemně propleteny. Pro dosažení soudržnosti jednotlivých vrstev ovinu se používají stejné materiály jako u opletů. Vlastnosti ovinovaných hadic jsou lepší než oplétaných, poněvadž jednotlivé vrstvy nejsou mezi sebou propleteny a nedochází ke zvlnění. Výrazné je především zlepšení dynamických vlastností hadic, tj. odolnosti hadice vůči tlakovým rázům. Úhel mezi přízí resp. drátem ve spirále a osou hadice se nazývá úhel ovinu a platí pro něj totéž jako u oplétaných. Vzhledem k stejnoměrnějšímu rozložení příze či drátu v ovinu oproti opletu, je u ovinovaných hadic dosahováno až o 10% vyšších poruchových tlaků než u oplétaných (při náhradě jednoho opletu ekvivalentním párem ovinů). Vzhledem ke skutečnosti, že výroba ovinovaných hadic je produktivnější než výroba oplétaných a vzhledem k lepším vlastnostem těchto hadic, je jejich výroba perspektivnější a přechází se stále ve větší míře na výrobu těchto hadic.

3/ Hadice zavalované:

Tlaková vložka je tvořena nabalenou textilní tkaninou z bavlny nebo syntetických přízí. Pro dosažení dobré soudržnosti mezi jednotlivými vrstvami hadice se používá tkanina s nanesenou kaučukovou směsí. Délky těchto hadic jsou omezeny délkou zařízení, na kterém je zavalování prováděno. Zavalovaná textilní vložka má plátěnou vazbu se stejným počtem podélných (útek) a příčných (osnova) nití. V případě, kdy jsou osnovní nitě rovnoběžné s osou hadice vzniká tuhá hadice, která se ale při ohnutí zplošťuje. Tomu lze zabránit otočením textilu o 45° .

4/ Hadice speciální:

3.2 Mimo výše uvedených základních typů tlakových vložek se

používají ještě některé speciální typy. Je to např. spirála tvořená jedním drátem. Průměr drátu je pro rozdílné průměry hadic různý. Pro nejmenší průměry hadic se používá drát o průměru 0,5 mm. Tato tlaková vložka se používá hlavně u hadic s velkým průměrem a většinou v kombinaci s tlakovou vložkou zavalovanou nebo oplétanou.

Dalším typem jsou tkané nebo pletené tlakové vložky. U tkaných tlakových vložek jsou kordové nitě vinuty pod malým stoupáním a jsou protkány podélnými přízemi. Při použití bavlny nebo syntetických přízí se dá vlášt utkat bez duše, která se vsune až před konečnou vulkanizací. Hadice tohoto typu se obvykle vyrábějí bez obalu (např. požární hadice). Pletené tlakové vložky se používají především u hadice s malým poruchovým tlakem.

V poslední době se používají tlakové vložky, které jsou součástí duše hadice. Jsou to krátká vlákna zamíchaná do směsi na duši a při vytlačování orientovaná tak, že po vulkanizaci je možno použít těchto duší jako náhrady některých nízkotlakých hadic.

$$3.1.3. \text{ Obal: } = V_0 \left[\frac{\Delta P}{K} + f(M, P) \right] \quad (3-2)$$

Obal chrání tlakovou vložku před mechanickým poškozením a chemickými účinky prostředí. Musí být proto odolný vůči prostředí, ve kterém má být hadice použita. Vnější vzhled obalu určuje norma ČSN 63 5305. Nejčastějším materiálem obalu je pryž. V poslední době se také používají plastické hmoty (PVC, polyamidy). Materiál pro obal je dán kompromisem mezi několika jeho vlastnostmi. Jsou to především: olejuvzdornost, teplovzdornost, ohebnost při nízkých teplotách, odolnost vůči chemikáliím, odolnost vůči oděru, dobrá adheze k tlakové vložce a plamenvzdornost. Pro jeho výběr platí obdobně jako pro materiál duše.

Konstrukce hadice má značný vliv na vlastnosti hadice, zejména na její deformaci při vnitřním přetlaku.

Přitoupíme k vyšetření deformace u hadicového vedení.

3.2. Deformace hadicového vedení:

3.2.1. Celková deformace hadicového vedení:

Při působení vnitřního přetlaku, který se přenáší na stěny hadice pomocí dopravované látky, dochází k deformaci hadice a vzhledem k určité poddajnosti přepravované látky i k deformaci této látky. Budeme-li předpokládat, že přepravovaná látka je kapalina, potom můžeme pro celkovou deformaci psát:

$$\Delta V = V_0 [\beta_K \cdot \Delta p + f(M_i, p)] \quad (3-1)$$

kde: ΔV - celková změna objemu při působení tlaku Δp na hadici
 V_0 - objem uzavřený stěnami hadice při $\Delta p = 0$
 β_K - izotermický objemový součinitel stlačitelnosti kapaliny

$f(M_i, p)$ - funkce vyjadřující vliv materiálových, geometrických

a konstrukčních parametrů stěny hadice, uzavírající geometrický objem V_0 , na působícím tlaku.

Vztah (3 - 1) lze dále rozepsat:

$$V = V_0 + \Delta V_s = \frac{\pi}{4} (D_0 + \Delta D)^2 (l_0 + \Delta l) \quad (3-6)$$

$$\Delta V = V_0 \left[\frac{\Delta p}{K} + f(M_i, p) \right] \quad (3-2)$$

kde: K : izotermický objemový modul pružnosti kapaliny.
Ze vztahu (3 - 1), (3 - 2) je zřejmé, že změna objemu je dána součtem (superpozicí) změny objemu vlivem stlačitelnosti kapaliny a změny objemu způsobené deformací stěny hadice.

Potom můžeme psát:

$$\Delta V = \Delta V_K + \Delta V_s = V_0 \frac{1}{K} \Delta p + V_0 f(M_i, p) \quad (3-3)$$

kde:

ΔV_K : deformace objemu kapaliny

ΔV_s : deformace stěny hadice

V případě, že změny jsou lineární platí:

$$\Delta V = V_0 \left[\frac{1}{K} + g(M_i) \right] \Delta p = C_h \cdot \Delta p \quad (3-4)$$

Vzhledem k modulům pružnosti obou materiálů (přít 1 až kde, C_h : celková hydraulická kapacita systému, daná vztahem: se probíhá beze změny délky nití kordu. Deformace tedy

probíhá změnou úhlů kosočtverců vytvořených nitěmi kordu

$$C_h = C_K + C_S = \frac{V_0}{K} + V_0 \cdot g(M_i) \quad (3.5)$$

Dále předpokládáme, že napětí v pryži jsou velice malá
kde C_S , C_K : hydraulická kapacita stěn vedení, kapaliny.

Už jsme výše vyšetřili deformaci objemu kapaliny ΔV_K
a víme, že můžeme deformaci objemu kapaliny nebo izotermický
objemový modul pružnosti kapaliny K zjistit za předpokladu,
že změna objemu kapaliny při působení tlaku je malá a line-
ární (viz. kap. 2.). Nemůžeme však matematicky vypočítat ΔV_S
hadice, protože nemáme k dispozici $f(M_i, p)$ ani hydraulickou
kapacitu stěn hadice C_S . Musíme proto deformaci stěny ha-
dice ΔV_S zjistit teoreticko-experimentálním vyšetřováním.
V další budeme vyšetřovat deformaci pouze stěny hadice.

3.2.2. Deformace stěny hadicového vedení:

Pro deformaci stěny hadice o počáteční délce ℓ_0 odpoví-
dající stoupání šroubovice navinutého vlákna na počátečním
průměru D_0 , platí:

$$V = V_0 + \Delta V_S = \frac{\pi}{4} \cdot (D_0 + \Delta D)^2 \cdot (\ell_0 + \Delta \ell) \quad (3.6)$$

Při zanedbání elementárních veličin druhého a vyššího řádu
obdržíme:

$$\Delta V_S = V_0 \left(2 \frac{\Delta D}{D_0} + \frac{\Delta \ell}{\ell_0} \right) \quad (3.7)$$

Nyní odvodíme závislost změny délky a změny průměru na
změně úhlu β , kde β je úhel mezi spirálou příze či drátu
a směrem kolným k ose hadice. Odvození je provedeno za nás-
ledujícími předpoklady:

Vzhledem k vlastní konstrukci hadice předpokládáme, že
veškeré tlakové působení zachycuje tlaková vložka, která se
skládá z křížících se vrstev pryží zalitých kordových vláken
(přízových, drátových).

Vzhledem k modulům pružnosti obou materiálů (pryž 1 až
5 MPa, textilní kord 1000 až 2000 MPa) předpokládáme, že de-
formace probíhá beze změny délky nití kordu. Deformace tedy

probíhá změnou úhlů kosočtverců vytvořených nitěmi kordu
sousedních vrstev (viz. obr. 3 - 1) .

Dále předpokládáme, že napětí v pryži jsou velice malá
ve srovnání s napětími ve vláknech (nitích) kordu. To znamená
, že veškeré silové působení se přenáší pouze pomocí vláken.

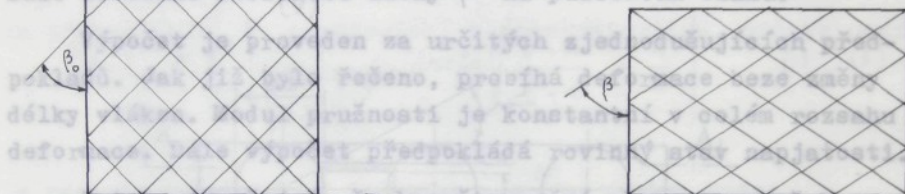
l_0 : délka vláken odpovídající stoupání šroubovice .

element před deformací

element po deformaci

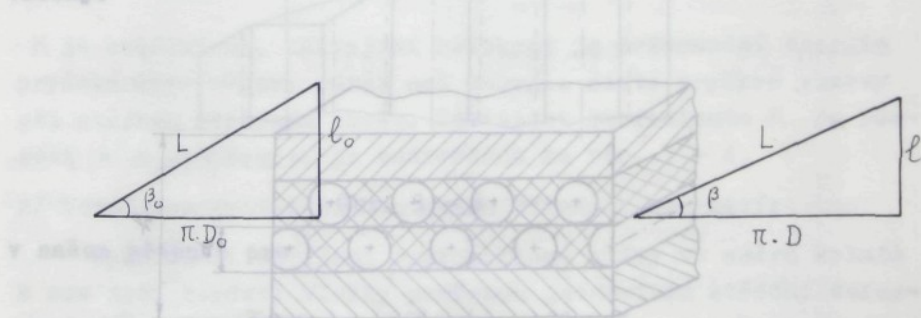
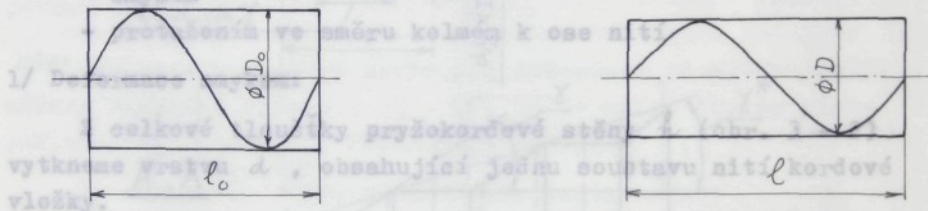
$$\Delta V_S = V_0 \cdot \left(2 \frac{\cos \beta}{\cos \beta_0} + \frac{\sin \beta}{\sin \beta_0} - 3 \right) \quad (3-10)$$

Dále předpokládáme, že změna β na působícím tlaku.



délky vláken kordu pružnosti je konstantní v celém rozsahu
deformace. Tato skutečnost předpokládá rovinný stav napjatosti

davé vrstvy jsou namáhány v podstatě dvěma způsoby:



Obr. 3 - 1

l_0 : délka vláken odpovídající stoupání šroubovice .

Smyková deformace pryžekordové stěny je dána středním

(jmenovitě obr. 3 - 1) vyplývá: Jak vyplývá z obr. 3 - 3, je skos pryže mezi vlákny v řezu A - A dán vztahem:

$$\varepsilon_D = \frac{D - D_0}{D_0} = \frac{\cos \beta - \cos \beta_0}{\cos \beta_0} \quad (3 - 8)$$

$$\varepsilon_L = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\sin \beta - \sin \beta_0}{\sin \beta_0} \quad (3 - 9)$$

kde:

l : délka vlákna odpovídající stoupání šroubovice .

Dosadíme-li do (3 - 17), obdržíme:

Deformační energie vrstvy při saskovém namáhání je rovna:

$$\Delta V_S = V_0 \cdot \left(2 \frac{\cos \beta}{\cos \beta_0} + \frac{\sin \beta}{\sin \beta_0} - 3 \right) \quad (3 - 10)$$

Dále odvodíme závislost změny β na působícím tlaku.

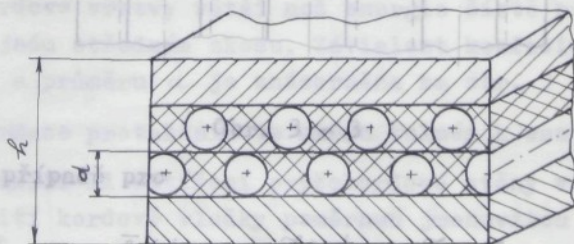
Výpočet je proveden za určitých zjednodušujících předpokladů. Jak již bylo řečeno, prosáhá deformace beze změny délky vláken. Modul pružnosti je konstantní v celém rozsahu deformace. Dále výpočet předpokládá rovinný stav napjatosti.

Z toho je zřejmé, že kosočtverečné elementy pryžokordové vrstvy jsou namáhány v podstatě dvěma způsoby:

- smykem
- protažením ve směru kolmém k ose nití

1/ Deformace smykem:

Z celkové tloušťky pryžokordové stěny h (obr. 3 - 2) vytkneme vrstvu d , obsahující jednu soustavu nití kordové vložky.



kde $\bar{l}$: délka vytknutí Obr. 3 - 12 mentu podél nití a pro γ platí

(3 - 11) Smyková deformace pryžokordové stěny je dána středním

(jmenovitým) zkosem γ^* . Jak vyplývá z obr. 3 - 3, je zkos pryže mezi vlákny v řezu A - A dán vztahem:

$$dU = \frac{G_p \cdot \gamma^2 \cdot dV}{\gamma} = \gamma^* \frac{G_p \gamma^2 \cdot \bar{\ell} \cdot t^2 \cdot d}{2t \cdot 2(t - d \cos \gamma)} \cdot \cos \gamma d\gamma \quad (3-14)$$

$$\gamma = \gamma^* \frac{t}{t - d \cos \gamma} \quad (3-11)$$

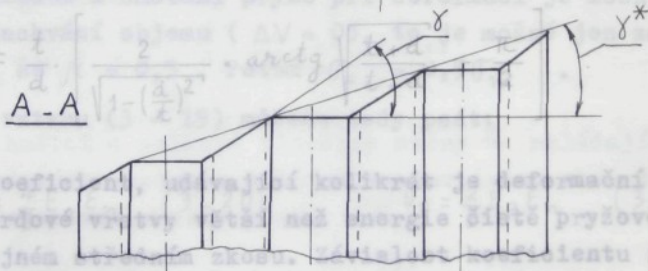
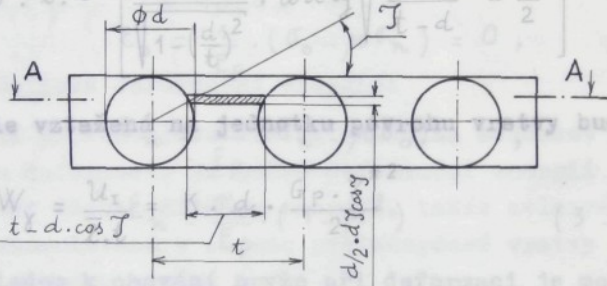
kde:

γ : úhel určující polohu řezu
 t : rozteč vláken
 d : průměr vláken

Deformační energie vrstvy při smykovém namáhání je rovna:

$$U = \int_{(V)} \frac{G}{2} \gamma^2 dV \quad (3-12)$$

$$\frac{G_p \cdot \gamma^2 \cdot \bar{\ell} \cdot t^2}{2} \cdot \arctg \frac{t+d}{t-d} - \frac{\pi}{2} \quad (3-15)$$



K je koeficient, udávající kolikrát je deformační energie pryžekordové vrstvy větší než energie žilové vrstvy při stejném středním zkose. Závislost koeficientu K na rozteči t a průměru d je znázorněna na obr. 3 - 4.

2/ Deformace protažen Obr. 3 - 3 kolmá k ose nití: tahem v našem případě pro protažení pryžekordové stěny ve směru kolmém k ose nití kordové vložky poměrnou jmenovitou střední deformací ϵ_n^* $dV = \bar{\ell} \cdot (t - d \cos \gamma) \cdot \frac{d}{2} \cos \gamma d\gamma$ (3-13)

kde $\bar{\ell}$: délka vytknutého elementu podél nití a pro γ platí (3 - 11). Potom obdržíme:

$$dU = \frac{G_P \cdot \gamma^2}{2} \cdot dV = \frac{G_P \cdot \gamma^2}{2} \cdot \frac{\bar{l} \cdot t^2 \cdot d}{2(t - d \cdot \cos J)} \cdot \cos J \cdot dJ \quad (3-14)$$

Deformační energie při smykovém namáhání akumulovaná v objemu pryžokordové vrstvy vymezeném délkou $\bar{l}$, tloušťkou d a roztečí t , je dána vztahem:

$$U_I = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} dU = \frac{G_P \cdot \gamma^2 \cdot \bar{l} \cdot t^2 \cdot d}{2} \cdot \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} \frac{\cos J}{t - d \cos J} \cdot dJ =$$

Obr. 3 - 4

Za předpokladu, že prodloužení vláken je nulové, můžeme psát:

$$\frac{G_P \cdot \gamma^2 \cdot \bar{l} \cdot t^2}{2} \left[\frac{2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{t}\right)^2}} \cdot \arctg \sqrt{\frac{t+d}{t-d}} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (3-15)$$

a energie vztažená na jednotku povrchu vrstvy bude:

$$W_\gamma = \frac{U_I}{\bar{l} \cdot t} = K \cdot \frac{d}{t} \cdot \frac{G_P \cdot \gamma^2}{2} \quad (3-16)$$

kde: Vzhledem k chování pryže při deformaci je možno použít

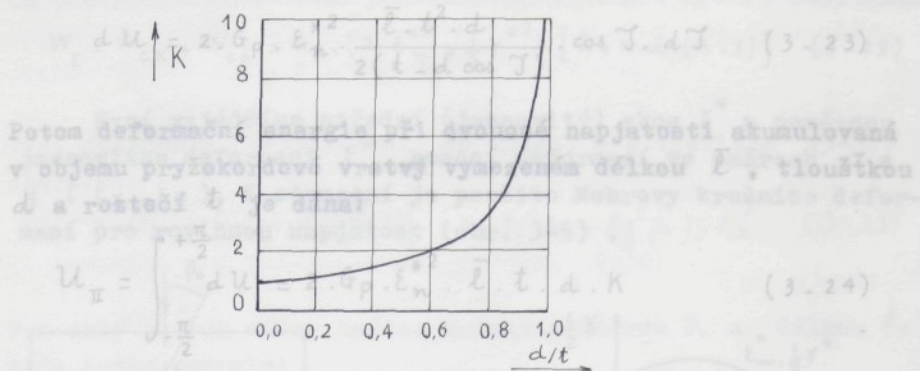
$$K = \frac{t}{d} \cdot \left[\frac{2}{\sqrt{1 - \left(\frac{d}{t}\right)^2}} \cdot \arctg \sqrt{\frac{t+d}{t-d}} - \frac{\pi}{2} \right] \quad (3-17)$$

K je koeficient, udávající kolikrát je deformační energie pryžokordové vrstvy větší než energie čistě pryžové vrstvy při stejném středním zkosu. Závislost koeficientu K na rozteči t a průměru d je znázorněna na obr. 3 - 4.

2/ Deformace protažení ve směru kolmém k ose nití: tahem:

Způsobí-li zatížení pryžokordové stěny ve směru kolmém k ose nití kordové vložky poměrnou jmenovitou střední deformací ε_n^* , pak pro vytknutý element na obr. 3 - 3 lze psát:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_n^* \cdot \frac{t}{t - d \cdot \cos J} \quad (3-18)$$



kde K je koeficient daný vztahem (3-17).

Obr. 3 - 4

Energie vztahená na jednotku povrchu vrstvy bude:

Za předpokladu, že prodloužení vláken je nulové, můžeme psát:

$$W_E = \frac{W_\pi}{\bar{\ell} \cdot \bar{t}} = 2 \cdot G_p \cdot \varepsilon_n^2 \cdot d \cdot K \quad (3-25)$$

$$\varepsilon_o = \frac{1}{E_p} \cdot (\sigma_o - \mu \sigma_n) = 0,$$

3.2.3. Celková deformační energie:

Je-li pryžková vrstva současně smykovou a normální deformační energií stanovit

potom: $\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{E_p} \cdot (1 - \mu^2)$ také celková deformační energie akumulovaná v objemu pryžkové vrstvy vztahená na

jedno Vzhledem k chování pryže při deformaaci je možno použít zákona zachování objemu ($\Delta V = 0$), to je možné jen za předpokladu, že $\mu = 0,5$. Potom $\sigma_o = 0,5 \sigma_n$.

Ze vztahu (3 - 19) můžeme tedy psát:

Máme-li hadici o celkové tloušťce stěny n skládající se z n

pryžkových vrstev a dalších vrstev (viz. obr. 3-2), pak pro pryžkové vrstvy platí: $\sigma_n = \frac{4}{3} E_p \varepsilon_n$ (3-20) $\sigma_o = \frac{2}{3} E_p \varepsilon_n$ (3-21)

$$W_c = n(W_\pi + W_s) = nK d \cdot G_p \cdot (2 \varepsilon_n^2 + \frac{1}{2} \gamma^2) \quad (3-27)$$

kde $E_p = 3 \cdot G_p$

Deformační energie při dvousmě napjatosti je dána vztahem:

což je celková energie akumulovaná v pryžkových vrstvách.

$$U = \int_{(V)} \frac{1}{2 \cdot E} \cdot (\sigma_o^2 + \sigma_n^2 - 2 \cdot \mu \cdot \sigma_o \cdot \sigma_n) dV \quad (3-22)$$

$$W_{cp} = G_p \cdot \int_{(V)} (v) \cdot (2 \cdot \varepsilon^2 + \frac{1}{2} \cdot \gamma^2) \quad (3-28)$$

V našem případě s použitím vztahů (3 - 13), (3 - 18), (3-20) a (3 - 21) vyplývá:

U vztahená na jednotku povrchu stěny bude:

$$dU = 2 \cdot G_p \cdot \varepsilon_n^{*2} \cdot \frac{\bar{\ell} \cdot t^2 \cdot d}{2(t - d \cos J)} \cdot \cos J \cdot dJ \quad (3-23)$$

Potom deformační energie při dvouosé napjatosti akumulovaná v objemu pryžokordové vrstvy vymezeném délkou $\bar{\ell}$, tloušťkou d a roztečí t je dána:

$$U_{II} = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{+\frac{\pi}{2}} dU = 2 \cdot G_p \cdot \varepsilon_n^{*2} \cdot \bar{\ell} \cdot t \cdot d \cdot K \quad (3-24)$$

kde K je koeficient daný vztahem (3-17).

Energie vztažená na jednotku povrchu vrstvy bude:

$$W_{\varepsilon} = \frac{U_{II}}{\bar{\ell} \cdot t} = 2 \cdot G_p \cdot \varepsilon_n^{*2} \cdot d \cdot K \quad (3-25)$$

3.2.3. Celková deformační energie:

Je-li pryžokordová vrstva namáhána současně smykovou a normálnou deformací, je možné deformační energii stanovit jako součet těchto dílčích energií, takže celková deformační energie akumulovaná v objemu pryžokordové vrstvy vztažená na jednotku povrchu vrstvy bude:

$$W = W_{\gamma} + W_{\varepsilon} = K \cdot d \cdot G_p \cdot \left(2 \cdot \varepsilon_n^{*2} + \frac{1}{2} \gamma^{*2} \right) \quad (3-26)$$

Máme-li hadici o celkové tloušťce stěny h skládající se z n pryžokordových vrstev a dalších vrstev (viz. obr. 3-2), pak pro pryžokordové vrstvy platí:

$$W_{CK} = n (W_{\gamma} + W_{\varepsilon}) = n \cdot K \cdot d \cdot G_p \cdot \left(2 \cdot \varepsilon_n^{*2} + \frac{1}{2} \gamma^{*2} \right) \quad (3-27)$$

což je celková energie akumulovaná v pryžokordových vrstvách. Pro pryžové vrstvy platí:

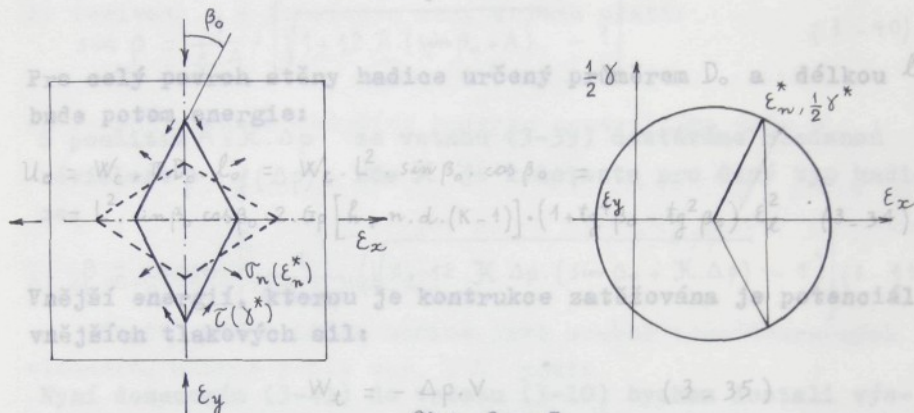
$$W_{cp} = G_p \cdot (h - n \cdot d) \cdot \left(2 \cdot \varepsilon_n^{*2} + \frac{1}{2} \gamma^{*2} \right) \quad (3-28)$$

Potom celková energie akumulovaná v objemu hadice o tloušťce h vztažená na jednotku povrchu stěny bude:

Za předpokladu nulového prodloužení vláken ($\varepsilon_x = 0$) obdržíme:

$$W_c = W_{cK} + W_{cP} = G_P \cdot \left(2 \cdot \varepsilon_n^{*2} + \frac{1}{2} \gamma^{*2} \right) \cdot [h + n \cdot d \cdot (K-1)] \quad (3-29)$$

Nyní vyjádříme střední (jmenovitý) zkos γ^* a poměrnou jmenovitou deformaci ε_n^* pomocí deformací ve směrech x a y ($\varepsilon_x, \varepsilon_y$). K odvození je použito Mohrovy kružnice deformací pro rovinnou napjatost (obr. 3-5).



Obr. 3-5

Z obr. 3-5 vyplývají vztahy:

$$\gamma^* = (\varepsilon_x - \varepsilon_y) \cdot 2 \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos \beta_0 \quad (3-30)$$

$$\varepsilon_n^* = \varepsilon_x \cdot \cos^2 \beta_0 + \varepsilon_y \cdot \sin^2 \beta_0 \quad (3-31)$$

kde je využito vztahu (3-9) a pro objem V platí:

Dále odvodíme závislost mezi deformací ε_x a ε_y :

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L = \frac{L^3}{4\pi} \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta \quad (3-37)$$

$$z^2 = x^2 + y^2,$$

$$x = z \cdot \sin \beta_0,$$

$$y = z \cdot \cos \beta_0,$$

$$dx = dz \cdot \sin \beta_0; \quad dy = dz \cdot \cos \beta_0;$$

$$z^2 = z^2 \sin^2 \beta_0 + z^2 \cos^2 \beta_0,$$

$$2z dz = 2z \cdot dz \sin^2 \beta_0 + 2z \cdot dz \cos^2 \beta_0,$$

$$\frac{dz}{z} = \frac{dz}{z} \cdot \sin^2 \beta_0 + \frac{dz}{z} \cdot \cos^2 \beta_0,$$

$$L^2 \sin \beta_0 \cdot \cos \beta_0 \cdot 2G_P \cdot [h + n \cdot d \cdot (K-1)] \cdot (1 + \gamma^{*2} \beta_0 - \gamma^{*2} \beta_0) \cdot \frac{1}{\sin^2 \beta_0} \cdot \sin^2 \beta_0 \cdot 2 \cdot (\sin \beta_0 - \sin \beta_0) - \Delta p \cdot \frac{L}{4\pi} \cdot \varepsilon_z = \varepsilon_x \cdot \sin^2 \beta_0 + \varepsilon_y \cdot \cos^2 \beta_0$$

Za předpokladu nulového prodloužení vláken ($\varepsilon_x = 0$) obdržíme:

$$\varepsilon_y = -\varepsilon_x \cdot \operatorname{tg}^2 \beta_0 \quad (3-38)$$

Nyní dosazením (3-30), (3-31) do (3-29) a s využitím (3-32) obdržíme:

$$W_c = 2 \cdot G_p \cdot [h + n \cdot d \cdot (K-1)] \cdot (1 + \operatorname{tg}^4 \beta_0 - \operatorname{tg}^2 \beta_0) \cdot \varepsilon_x^2 \quad (3-33)$$

Pro celý povrch stěny hadice určený průměrem D_0 a délkou l_0 bude potom energie:

$$\begin{aligned} U_c &= W_c \cdot \pi \cdot D_0 \cdot l_0 = W_c \cdot L^2 \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos \beta_0 = \\ &= L^2 \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos \beta_0 \cdot 2 \cdot G_p [h + n \cdot d \cdot (K-1)] \cdot (1 + \operatorname{tg}^4 \beta_0 - \operatorname{tg}^2 \beta_0) \cdot \varepsilon_x^2 \end{aligned} \quad (3-34)$$

Vnější energii, kterou je konstrukce zatěžována je potenciál vnějších tlakových sil:

$$W_t = -\Delta p \cdot V \quad (3-35)$$

Celková energie bude potom dána součtem energie potenciální a energie deformační:

$$\begin{aligned} E &= U_c + W_t = L^2 \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos \beta_0 \cdot 2 \cdot G_p \cdot [h + n \cdot d \cdot (K-1)] \cdot \\ &\cdot (1 + \operatorname{tg}^4 \beta_0 - \operatorname{tg}^2 \beta_0) \cdot \left(\frac{\sin \beta - \sin \beta_0}{\sin \beta_0} \right)^2 - \Delta p \cdot \frac{L^3}{4\pi} \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta \end{aligned} \quad (3-36)$$

kde je využito vztahu (3-9) a pro objem V platí:

$$V = \frac{\pi D^2}{4} l = \frac{L^3}{4\pi} \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin \beta \quad (3-37)$$

3.2.4. Závislost změny úhlu β na působícím tlaku:

Závislost $\beta = f(\Delta p)$ dostaneme z podmínky minima celkové energie systému. To je:

$$\frac{\partial E}{\partial \beta} = 0$$

Po derivaci obdržíme:

$$\begin{aligned} &L^2 \cdot \sin \beta_0 \cdot \cos \beta_0 \cdot 2 \cdot G_p \cdot [h + n \cdot d \cdot (K-1)] \cdot (1 + \operatorname{tg}^4 \beta_0 - \operatorname{tg}^2 \beta_0) \cdot \frac{1}{\sin^2 \beta_0} \cdot \cos \beta \cdot \\ &\cdot 2 \cdot (\sin \beta - \sin \beta_0) - \Delta p \cdot \frac{L^3}{4\pi} \cdot (\cos^3 \beta - 2 \cdot \cos \beta \cdot \sin^2 \beta) = 0 \end{aligned}$$

Úpravou vyplývá:

$$\sin \beta - \sin \beta_0 - A \cdot (1 - 3 \sin^2 \beta) = 0 \quad (3-38)$$

kde:

$$A = \frac{tg \beta_0}{16 \cdot \pi \cdot (1 + tg^4 \beta_0 - tg^2 \beta_0)} \cdot \frac{\Delta p \cdot L}{G_p \cdot [h + n \cdot d \cdot (K-1)]} = K \cdot \Delta p \quad (3-39)$$

Z rovnice (3-38) obdržíme:

$$\sin \beta = \frac{1}{6 \cdot A} \cdot \left[\sqrt{1 + 12 \cdot A \cdot (\sin \beta_0 + A)} - 1 \right] \quad (3-40)$$

S použitím $A = K \cdot \Delta p$ ze vztahu (3-39) dostáváme hledanou závislost $\beta = f(\Delta p)$, kde K je konstanta pro daný typ hadice:

$$\beta = \arcsin \left[\frac{1}{6 \cdot K \cdot \Delta p} \cdot \left(\sqrt{1 + 12 \cdot K \cdot \Delta p \cdot (\sin \beta_0 + K \cdot \Delta p)} - 1 \right) \right] \quad (3-41)$$

Nyní dosazením (3-41) do vztahu (3-10) bychom dostali výslednou změnu objemu hadice při působení vnitřního přetlaku.

Z předvedeného výpočtu je zřejmé, že změna objemu způsobená deformací stěny hadice je vedle působícího tlaku závislá též na materiálových, geometrických a konstrukčních parametrech hadice. Můžeme tedy psát:

$$\Delta V_s = F(\beta_0, L, h, n, d, t, G_p, \Delta p) \quad (3-42)$$

Pro deformaci hadice o počáteční délce ℓ_{0H} je potřeba do výpočtu tutou délku zahrnout. Ta se projeví ve zvětšení konstanty K o hodnotu ℓ_{0H}/ℓ_0 krát větší a v dosazení příslušného počátečního objemu V_0 .

3.2.5. Neutrální úhel opletu:

Pod pojmem úhel opletu rozumíme úhel mezi osou hadice a spirálou tvořenou pramenem příze či drátu. Platí pro něj:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta$$

Při neutrálním úhlu opletu (úhlu rovnováhy) nedochází při působení vnitřního přetlaku ke změnám délky resp. průměru hadice (pozn. nemáme-li ovšem na mysli změnu průměru

danou deformací vnitřní pryžové vrstvy-duše). Hodnotu tohoto úhlu lze odvodit z podmínky, že objem hadice při tomto úhlu je maximální, nebo z rovnováhy sil v hadici.

a) Z podmínky maximálního objemu:

Podle vzorce (3-37) máme:

$$V = \frac{L^3}{4\pi} \cdot \cos^2 \beta \cdot \sin^2 \beta$$

Po derivaci a s podmínkou max. objemu platí:

$$\frac{\partial V}{\partial \beta} = \frac{L^3}{4\pi} \cdot (-2 \cos \beta \cdot \sin^2 \beta + \cos^3 \beta) = 0$$

Po řešení rovnice obdržíme hodnotu neutrálního úhlu α_n :

$$\operatorname{tg}^2 \beta_n = \frac{1}{2}, \quad \beta_n = 35^\circ 15' 52''$$

$$\alpha_n = 54^\circ 44' 08'' \quad (3-43)$$

b) Z rovnováhy cíl v hadici:

Uvažujeme-li stěnu hadice jako soubor kosočtverečných elementů, můžeme podle obr. 3-6 psát:

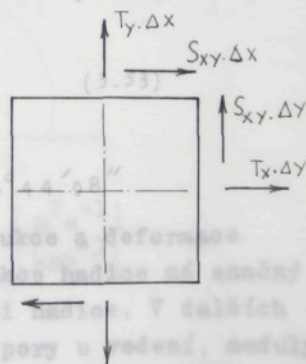
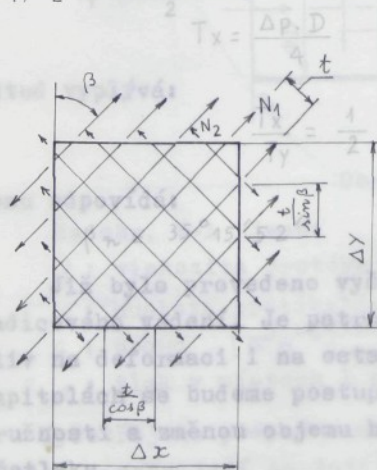
$$F_{VY} = (N_1 + N_2) \cdot \cos \beta \cdot \frac{\Delta x \cdot \cos \beta}{t} \cdot \frac{n}{2} \quad (3-44)$$

kde:

n : počet vrstev

F_{VY} : výsledná síla působící na řez Δx elementu $\Delta x \cdot \Delta y$

N_1, N_2 : osově síly v nitích jdoucích směry 1, 2



Obr. 3 - 6

Tuto sílu lze vyjádřit pomocí intenzity T_y sil vztažených na jednotku délky řezu. Potom :

$$F_{vy} = T_y \cdot \Delta x \quad (3-45)$$

$$T_y = \frac{n}{2t} \cdot (N_1 + N_2) \cdot \cos^2 \beta \quad (3-46)$$

obdobně sílu F_{vx} působící na řez Δy pomocí intenzity T_x :

$$F_{vx} = T_x \cdot \Delta y \quad (3-47)$$

$$T_x = \frac{n}{2t} \cdot (N_1 + N_2) \cdot \sin^2 \beta \quad (3-48)$$

Pro smykovou sílu S_{xy} namáhající element $\Delta x \cdot \Delta y$ platí:

$$S_{xy} = \frac{n}{2t} \cdot (N_1 - N_2) \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (3-49)$$

V případě, že konstrukce bude zatížena symetricky, potom směry x a y budou představovat směry hlavních napětí a smyková síla bude nulová. Platí tedy:

$$N_1 = N_2 \quad ; \quad T_y = \frac{n}{t} \cdot N \cos^2 \beta \quad ; \quad T_x = \frac{n}{t} \cdot N \sin^2 \beta$$

Z toho vyplývá závislost mezi intenzitami sil T_x a T_y :

$$T_x = T_y \cdot \tan^2 \beta \quad (3-50)$$

Uvažujeme-li hadici jako tenkostěnou válcovou nádobu, pak při zatížení vnitřním přetlakem vzniknou v nádobě obvodové a osové síly o intenzitách:

$$T_y = \frac{\Delta p \cdot D}{2} \quad (3-51)$$

$$T_x = \frac{\Delta p \cdot D}{4} \quad (3-52)$$

odtud vyplývá:

$$\frac{T_x}{T_y} = \frac{1}{2} \quad (3-53)$$

Tomu odpovídá:

$$\beta_n = 35^\circ 15' 52'' \quad ; \quad \alpha_n = 54^\circ 44' 08''$$

Již bylo provedeno vyšetření konstrukce a deformace hadicového vedení. Je patrné, že konstrukce hadice má značný vliv na deformaci i na ostatní vlastnosti hadice. V dalších kapitolách se budeme postupně zabývat odpory u vedení, moduly pružnosti a změnou objemu hadicového vedení při vnitřním přetlaku. projeví se její vliv na velikost odporu. V tomto

4. ODPORY VE VEDENÍ :

K přeměně energie dochází na odporech, působících proti přenosu energie. Pod pojmem odpor se rozumí schopnost prvku přeměnit tlakovou energii na některou jinou formu energie. Při přenosu energie se vyskytují tři druhy odporu:

1. odpor proti pohybu kapaliny R
2. odpor proti zrychlení H
3. odpor proti deformaci D

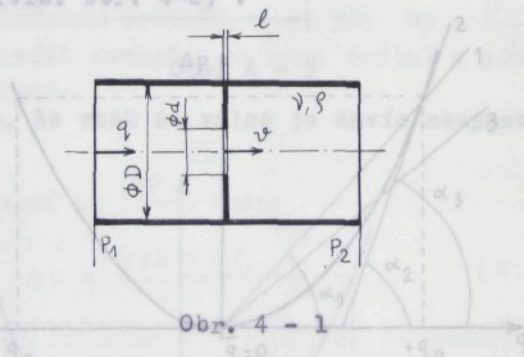
4.1. Odpor proti pohybu kapaliny R :

Do této skupiny odporů řadíme odpory, na kterých se přeměňuje energie vlivem tření při relativním pohybu částí prvků či kapaliny. Jeho elektrickou analogií je ohmický odpor. Tyto odpory jsou dvojího druhu:

- a) odpory místní
- b) odpory rozložené

a) Místní odpory:

Místní odpory jsou způsobené změnou průtočného průřezu nebo směru proudu.



Obr. 4 - 1

Na obr. 4-1 jsou:

ν : viskozita protékající kapaliny [$m^2 s^{-1}$]

ρ : hustota protékající kapaliny [$kg m^{-3}$]

q : proud [$m^3 s^{-1}$]

$P_{1,2}$: tlak v místech 1 a 2 [$N m^{-2}$]

Vyšetřujeme případ naznačený na obr. 4-1, kde délka je malá a neprojevuje se její vliv na velikost odporu. V tomto

případě můžeme pro tlakovou ztrátu $\Delta p = p_1 - p_2$ psát:

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \xi \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \left(\frac{q}{A} \right)^2 \quad (4-1)$$

V obvodu mechanismu SPK se místní odpor uplatňuje hlavně v ξ : ztrátový součinitel. Tento odpor je závislý na kon-

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

krátnosti průřezu vstupu do válce a na poloze pístu, t.j. vzdálenosti pístu ode dna válce. Např. pro centrický vtok (obr. 4-2) ξ závisí na mnoha faktorech, které lze analyticky velmi těžko postihnout a proto se při výpočtech vychází z empiricky zjištěných hodnot.

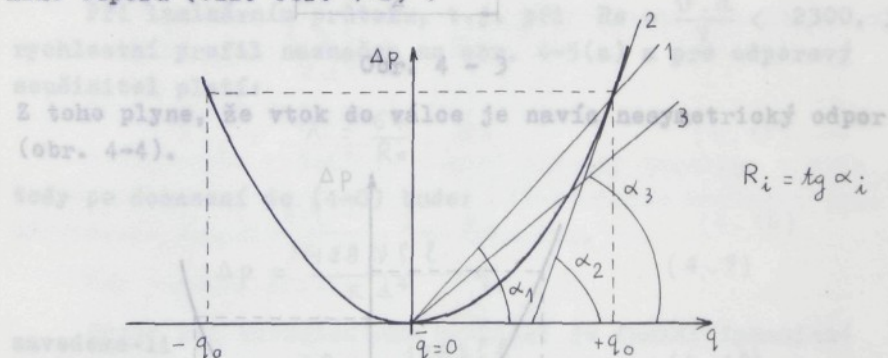
Zavedením pojmu hydraulického odporu R_m , který definujeme:

$$R_m = \xi \frac{\rho}{2A^2} = 0,4 \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} \right)^2$$

můžeme pro tlakový spád psát:

$$\Delta p = R_m q^2 \quad (4-3)$$

Tuto nelineární závislost je obvykle potřeba linearizovat. V podstatě můžeme uvažovat tři způsoby linearizace místního odporu (viz. obr. 4-2):



Obr. 4 - 2

1- sečnou z $q=0$ do q_0 :

$$R_1 = R_m \cdot q_0 = \xi \cdot \frac{\rho}{2A^2} \cdot q_0 \quad (4-4)$$

2- tečnou v q_0 :

$$R_2 = \left. \frac{\partial \Delta p}{\partial q} \right|_{q_0} = \xi \frac{\rho}{A^2} \cdot q_0 \quad (4-5)$$

3- z rovnosti ztracených výkonů plyne:

Údělky rozložené jsou způsobené třením kapaliny o stěny vedení a třením mezi kapalinou a tělesem, jejich relativně mezi sebou.

$$R_3 = \frac{2}{3} R_m \cdot q_0 = \xi \frac{\rho}{3 \cdot A_2} \cdot q_0 \quad (4-6)$$

V obvodu mechanismu SPK se místní odpor uplatňuje hlavně v místech vtoku do válce. Tento odpor je závislý na konkrétním provedení vtoku do válce a na poloze pístu, t.j. vzdálenosti pístu ode dna válce. Např. pro centrický vtok (obr. 4-3) a dostatečně velké Z můžeme použít vzorců pro odpor změny průřezu potrubí podle Bordy:

$$q > 0 : R_m = 1,11 \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} \right)^2 \quad (4-8)$$

$$q < 0 : R_m = 0,4 \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} \right)^2$$

ℓ : délka vedení [m]
 d : vnitřní průměr vedení [m]

Zde: Ze vztahu (4-8) je patrné, že tento typ odporu se projevuje všude tam, kde $\ell \gg d$, tzn. u dlouhých vedení. Zde je opět třeba rozlišit dva případy: laminární a turbulentní průtok.

Při laminárním průtoku, t.j. při $Re = \frac{\bar{v} \cdot d}{\nu} < 2300$, je rychlostní profil napsaný na obr. 4-5(a) a pro odporový součinitel platí:

Obr. 4 - 3

Z toho plyne, že vtok do válce je navíc nesymetrický odpor (obr. 4-4).

tedy po dosazení do (4-8) bude:

$$\Delta p = \frac{128 \sqrt{s} \ell}{\pi d^4} q \quad (4-9)$$

savedeme-li turbulentní průtok, t.j. při $Re \geq 2300$, je rychlostní profil napsaný na obr. 4-5(b) a pro odporový součinitel platí:

$$R_\ell = \frac{128 \sqrt{s}}{\pi d^4} \quad (4-10)$$

potom při laminárním režimu proudění bude:

$$\Delta p = R_\ell \cdot q \quad (4-11)$$

2/ turbulentní průtok:

Při turbulentním průtoku, t.j. při $Re \geq 2300$, je rych-

Obr. 4 - 4

b) Rozložené odpory: (viz obr. 4-5(b)).

Odpory rozložené jsou způsobené třením kapaliny o stěny vedení a třením vrstev kapaliny pohybujících relativně mezi sebou.

Při výpočtu ztráty můžeme vycházet ze známého vztahu (4-1), ale místo součinitele ztrát ξ zavedeme:

$$\xi = \lambda \frac{l}{d} \quad (4-7)$$

takže vztah (4-1) se mění na:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \frac{q^2}{A^2} \quad (4-8)$$

kde

λ : odporový součinitel

l : délka vedení [m]

d : vnitřní průměr vedení [m]

kde: Ze vztahu (4-8) je patrné, že tento typ odporu se projevuje všude tam, kde $l \gg d$, tzn. u vedení. Zde je opět třeba rozlišit dva případy: laminární a turbulentní průtok.

Provedeme-li linearizaci vztahu (4-12) jako výše,
1/ laminární průtok:

Při laminárním průtoku, t.j. při $Re = \frac{\bar{v} \cdot d}{\nu} < 2300$, je rychlostní profil naznačen na obr. 4-5(a) a pro odporový součinitel platí:

$$R_{\lambda} = \frac{64}{Re} \quad (4-15)$$

tedy po dosazení do (4-8) bude:

$$\Delta p = \frac{128 \nu l}{\pi d^4} \cdot q \quad (4-9)$$

zavedeme-li

viskozitu η , která $R_{\lambda} = \frac{128 \nu l}{\pi d^4}$ tlaku. Tato závislost se vyjadřuje vztahem:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-\alpha p}$$

potom při laminárním režimu proudění bude:

Uvedené vztahy (4-12), (4-13) platí stacionární popř. pro kvazistacionární proudění. Při nestacionárním proudění, kdy dochází k výrazným rychlostním profilu, je třeba uvažovat odpor jako funkci frekvence.

2/ turbulentní průtok:

Při turbulentním průtoku, t.j. při $Re \geq 2300$, je rych-

lostní profil naznačen na obr. 4-5(b) .

Tento odpor představuje dynamické účinky setrvačných hmot v trubici obvodu. Jeho elektrický analog je indukčnost.

Provedeme vztahu naznačenou na obr. 4-5(a) předpokladu dokonale tekutiny. Pro urychlení částic kapaliny mezi místy 1 a 2 platí Newtonův zákon:

(a)

(b)

$$P = m \cdot a = A \cdot \Delta p$$

$$(4-17)$$

přičemž střední rychlost urychlení a hmota jsou dány vztahy:

Obr. 4 - 5

Pro odporový součinitel platí:

$$\lambda_T = \frac{0,316}{Re^{0,25}} \quad (4-18)$$

po dosazení, úpravě a zavedení R_T - t.j. odporu při turbulentním režimu proudění, bude:

$$\Delta p = \frac{m}{A^2} \cdot \frac{dq}{dt} \quad \Delta p = R_T \cdot q^2 \quad (4-12)$$

kde:

$$R_T = \frac{8 \beta \lambda_T l}{\pi^2 d^5} \quad (4-13)$$

Provedeme-li linearizaci vztahu (4-12) jako výše, obdržíme:

$$R_{T1} = \frac{2 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot d^4} \cdot \lambda_T \cdot Re \quad (4-14)$$

$$R_{T2} = \frac{4 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot d^4} \cdot \lambda_T \cdot Re \quad (4-15)$$

$$R_{T3} = \frac{4 \cdot \eta \cdot l}{3 \pi \cdot d^4} \cdot \lambda_T \cdot Re \quad (4-16)$$

Odpor při turbulentním proudění je funkcí dynamické viskozity η , která je závislá na tlaku. Tato závislost se vyjadřuje vztahem:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{\alpha P}$$

Uvedené vztahy (4-12), (4-13) platí stacionární popř. pro kvazistacionární proudění. Pro nestacionární proudění, kdy dochází k deformaci rychlostního profilu, je třeba uvažovat odpor jako funkci frekvence.

4.2. Odpor proti zrychlení H :

Tento odpor představuje dynamické účinky setrvačných hmot v hydraulickém obvodu. Jeho elektrickou analogií je indukčnost.

Provedeme úvahu naznačenou na obr. 4-1 za předpokladu dokonale hladké trubky. Pro urychlení sloupce kapaliny mezi místy 1 a 2 platí Newtonův zákon:

$$P = m \cdot a = A \cdot \Delta p \quad (4-17)$$

přičemž střední rychlost, zrychlení a hmota jsou dány vztahy:

$$v = \frac{q}{A} ; a = \frac{dv}{dt} = \frac{1}{A} \cdot \frac{dq}{dt} ; m = \ell \cdot A \cdot \rho \quad (4-18)$$

takže po dosazení těchto výrazů do (4-17) bude:

$$\Delta p = \frac{m}{A^2} \cdot \frac{dq}{dt} = \frac{\ell \rho}{A} \cdot \frac{dq}{dt} = H \frac{dq}{dt} \quad (4-19)$$

kde: H je odpor proti zrychlení ve vedení je deformace

$$H = \frac{m}{A^2} \quad (4-20)$$

Ze vztahu (4-20) vyplývá, že odpor proti zrychlení ve vedení je konstantní.

4.3. Odpor proti deformaci D :

Tento odpor vyjadřuje tuhost sloupce kapaliny a stěn kolem kapaliny (potrubí, válec). Elektrickou analogií jeho převrácené hodnoty $C = \frac{1}{D}$ je kapacita.

Pro potrubí platí:

$$P = \frac{(\pi \cdot \Delta \ell)^4}{V_0 \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot s} \right)} \int q \cdot dt = D \cdot \int q \cdot dt$$

respektivně :

$$d p = D \cdot d v$$

kde $\bar{\ell}_p = \frac{\Delta \ell}{\ell}$ - poměrná změna délky hadice

$$v_H = \frac{D}{V_0} \frac{dp}{dv} = \frac{1}{C} = \frac{1}{V_0 \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot s} \right)}$$

Z experimentálních výsledků známe např. pro hadice

Je 1 Pro hadici platí také vztah (4-22), ale odpor proti deformaci se zjišťuje vztahem: a tedy:

$$R_{LH} = R_L = \frac{dP}{dV} = \frac{1}{C_H} = \frac{1}{V_0 \left[\frac{1}{K} + g(\mu_i) \right]} = 0,86 \quad (4-24)$$

Při pracovním tlaku 8 MPa bude:

kde $g(\mu_i)$: funkce vyjadřující vliv materiálových, geometrických, konstrukčních a výrobních parametrů stěny hadice, uzavírající geometrický objem V_0 , na působícím tlaku.

Víme, že deformace u hadice je mnohem větší než u trubky stejné světlosti a délky, což má vliv na odpory v hadici. Dále se budeme tímto problémem zabývat konkrétněji.

Pro turbulentní proudění máme:

4.4. Vliv deformace na odpory u hadice :

4.4.1. Vliv deformace na odpor proti pohybu R u hadice :

U trubky při výpočtu R považujeme d a l za konstantní při různých vnitřních přetlacích, protože je deformace velmi malá. Proti tomu je deformace u hadice dost velká, proto bychom měli přičítat vliv deformace na odpor R navíc.

Máme např. pro ocelovou trubku u laminárního proudění:

$$R_L = \frac{128 \eta \cdot l}{\pi d^4}$$

Připočítáme-li u hadice stejného rozměru vliv deformace při vnitřním přetlaku, bude:

$$R_{LH} = \frac{128 \eta (l - \Delta l)}{\pi (d + \Delta d)^4} = \frac{128 \eta l}{\pi d^4} \times \frac{l - \Delta l}{l} \times \frac{d^4}{(d + \Delta d)^4}$$

$$R_{LH} \approx R_L \times \frac{1 - \bar{\ell}_p}{1 + 4 \bar{v}_H} \approx R_L \times \frac{1 - \bar{\ell}_p}{1 + 2 \bar{v}_H + 2 \bar{\ell}_p}$$

kde: $\bar{\ell}_p$ - poměrná změna délky hadice

$$\bar{v}_H = \frac{\Delta V}{V_0} - \text{poměrná změna vnitřního objemu hadice}$$

Z experimentálních výsledků máme např. pro hadice

Js 10 PNT 028046 : při pracovním tlaku 4 MPa, získáme
 $\bar{\ell}_p = 0,01$; $v_H = 0,06$, bude tedy:

$$R_{LH} = R_L \times \frac{1 - \bar{\ell}_p}{1 + 2v_H + 2\bar{\ell}_p} = \frac{1 - 0,01}{1 + 0,12 + 0,02} = 0,86 R_L$$

Při pracovním tlaku 8 MPa bude:

$$\bar{\ell}_p = 0,016 ; v_H = 0,069 ; R_{LH} = 0,84 R_L$$

Při pracovním tlaku 12 MPa bude:

$$\bar{\ell}_p = 0,02 ; v_H = 0,077 ; R_{LH} = 0,85 R_L$$

Odtud vyplývá, že vlivem deformace bude odpor R_H u hadice menší než u trubky stejného rozměru. Tento rozdíl je kolem 15%.

4.4.3. Vliv deformace na kapacitu u hadice :

Pro turbulentní proudění máme:

Při vyšetřování chování hydraulického mechanismu se často používá tzv. R_T , která je opačnou hodnotou odporu proti deformaci

$$R_T = \frac{8 \xi \lambda_T \ell}{\pi^2 d^5}$$

Provedeme-li linearizaci, dostaneme např. :

Z experimentantu dostáváme, např. pro trubku Js10, $\ell = 1$ m :

$$R_{T2} = \frac{4 \eta \ell}{\pi d^4} \lambda_T \cdot Re \quad (\text{tato hodnota je příslušná výsledku vypočítanému})$$

Postupujeme podobně a dostaneme podobné výsledky jako u laminární proudění.

4.4.2. Vliv deformace na odpor proti zrychlení H u hadice:

Podobným způsobem jako u odporu R připočítáme vliv deformace na odpor H_H u hadice navíc.

U trubky máme:

$$H = \frac{m}{A^2} = \frac{\xi V_0}{A^2} = \frac{\xi \cdot A \cdot \ell}{A^2} = \frac{\xi \cdot \ell}{A} = \frac{\xi \cdot \ell^2}{V_0}$$

U hadice stejného rozměru při pracovním přetlaku p , který činí deformaci $\Delta \ell$ a ΔV bude:

$$H_H = \frac{\xi (\ell - \Delta \ell)^2}{V_0 + \Delta V} = \frac{\xi \ell^2}{V_0} \left[\frac{(\ell^2 - 2\ell \cdot \Delta \ell + \Delta \ell^2) \cdot V_0}{(V_0 + \Delta V) \cdot \ell^2} \right]$$

hadice a u trubky.

Již jsme v kapitole 4.4.2. uvedli dva druhy odporů. Víme, že se ve vedení nebo v hydraulickém systému vyskytují současně tři druhy odporů. Přistoupíme proto k vyšetřování všech tří druhů odporů.

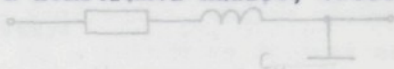
Podobně z experimentálních výsledků máme:

$$p = 4 \text{ MPa}, \bar{\ell}_p = 0,01, v_H = 0,06 \rightarrow H_H = 0,92 \text{ H}$$

$$p = 8 \text{ MPa}, \bar{\ell}_p = 0,016, v_H = 0,069 \rightarrow H_H = 0,91 \text{ H}$$

$$p = 12 \text{ MPa}, \bar{\ell}_p = 0,02, v_H = 0,077 \rightarrow H_H = 0,89 \text{ H}$$

Odtud vyplývá, že vlivem deformace bude odpor H_H u hadice menší než u trubky stejného rozměru. Rozdíl mezi nimi závisí na rozměru a konstrukci hadice, všeobecně je kolem 10%.



4.4.3. Vliv deformace na kapacitu u hadice :

Při vyšetřování chování hydraulického mechanismu se často používá t.zv. kapacita, která je opačnou hodnotou odporu proti deformaci D :

$$C = \frac{1}{D} = \frac{dV}{dp}$$

Z experimentantu dostáváme, např. pro trubku Js10, $\ell = 1 \text{ m}$:

$$C = \frac{1}{D} = 0,05759 [10^{-6} \text{ m}^3 \text{ MPa}^{-1}] \text{ (tato hodnota je příslušná výsledku vypočtovému).}$$

Pro hadici stejného rozměru Js10 PNT 028046 experimentantem máme $C_H = \frac{1}{D_H} = 0,1652 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ MPa}^{-1}$.

Vidíme, že je tady C_H větší než C u trubky téměř třikrát (u hadice OPTIMIT je ještě větší).

Pokud jde o chování hydraulického mechanismu, je jasné, že vliv hadice na chování mechanismu je v podstatě vliv stoupání kapacity (ve srovnání s kapacitou trubky) a je mnohem větší než vliv způsobený rozdílem odporu proti pohybu a proti zrychlení u hadice a u trubky. Tento závěr byl ověřen v kap. 7.

Jinak řečeno, při vyšetřování vlivu vlastností hadice na chování hydraulického mechanismu, vlivy rozdílem mezi odpory R a H u trubky a u hadice jsou velmi malé a zanedbatelné ve srovnání s vlivem způsobeným rozdílem kapacit u

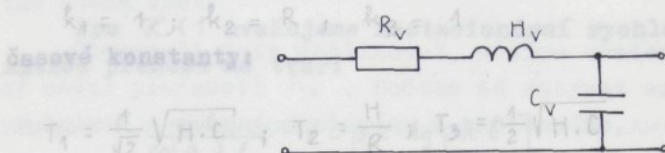
hadice a u trubky.

Již jsme vyšetřili jednotlivé druhy odporů. Víme, že se ve vedení nebo v hydraulickém obvodu vyskytují současně tři druhy odporů. Přistoupíme proto k vyšetřování všech tří druhů odporů ve vedení současně.

4.5. Odporů ve vedení :

Odporů R , H a D vedení uvažujeme jako:

a) soustředěné parametry:



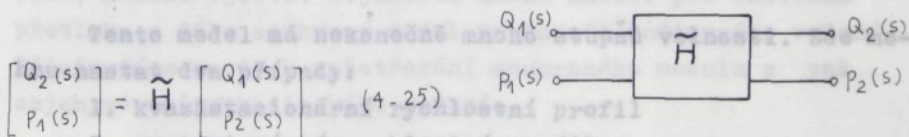
Obr. 4 - 6

pro $\lambda_v > l$ $\frac{R}{\sqrt{C}} = \sqrt{C}$; $a_3 = \frac{R}{\sqrt{C}}$
 kde λ_v je vlnová délka tlakových změn v potrubí určovaná vztahem: $k_4(T_4 s + 1) = C \cdot s$

$\lambda_v = \frac{a}{f}$, kde a je rychlost šíření tlakových vln
 f je frekvence tlakových vln

Tento model má jeden stupeň volnosti. Změny tlaku a proudu probíhají v celém potrubí současně. Při řešení předpokládáme kvazistacionární rychlostní profil.

Potrubí můžeme chápat z hlediska přenosu tlaku a proudu za čtyřčlen (obr. 4-7).



Obr. 4 - 7

Považujeme-li za vstupní hodnoty $Q_1(s)$ a $P_2(s)$ a za výstupní hodnoty $Q_2(s)$ a $P_1(s)$ pak lze přenos potrubí popsat seriově paralelní maticí přenosu $\tilde{H}$, která má tvar:

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1(T_1^2 s^2 + 2a_1 T_1 s + 1)} ; \frac{k_2(T_2 s + 1) k_3(T_3^2 s^2 + 2a_3 T_3 s + 1)}{k_1(T_1^2 s^2 + 2a_1 T_1 s + 1)} \\ \frac{k_4(T_4 s + 1)}{k_1(T_1^2 s^2 + 2a_1 T_1 s + 1)} ; \frac{1}{k_1(T_1^2 s^2 + 2a_1 T_1 s + 1)} \end{bmatrix}$$

kde pro těsné potrubí jsou konstanty:

$k_1 = 1$; $k_2 = R$; $k_3 = 1$
časové konstanty:

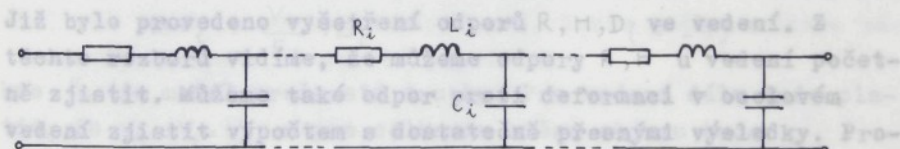
$$T_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{H \cdot C} ; T_2 = \frac{H}{R} ; T_3 = \frac{1}{2} \sqrt{H \cdot C}$$

součinitelé poměrného tlumení:

$$a_1 = \frac{R}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{C}{H}} ; a_3 = \frac{R}{4} \sqrt{\frac{C}{H}}$$

a přenos $k_4(T_4 s + 1) = C \cdot S$

b) Rozložené parametry :



Obr. 4 - 8

Tento model má nekonečně mnoho stupňů volnosti. Zde mohou nastat dva případy:

1. kvazistacionární rychlostní profil
2. nestacionární rychlostní profil

O tom, který rychlostní profil budeme uvažovat, rozhoduje parametr $\chi = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$

Pro $\chi > 10$ uvažujeme kvazistacionární rychlostní profil a přenosová matice $\tilde{H}$ má tvar:

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cosh \lambda l} & ; & z \tanh \lambda l \\ \frac{1}{z} \tanh \lambda l & ; & \frac{1}{\cosh \lambda l} \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

kde $\lambda = \sqrt{(H_1 s + R_1) \cdot (C_1 s + G_1)}$ $z = \sqrt{\frac{H_1 s + R_1}{C_1 s + G_1}}$

pozn. H_1 , C_1 , R_1 a G_1 se nazývají jednotlivé parametry vztažené na jednotku délky potrubí.

Pro $\mathcal{R} < 1$ uvažujeme nestacionární rychlostní profil a matice přenosu má tvar:

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\cos \beta \lambda l} & ; & -\beta z \tanh \beta \lambda l \\ -\frac{1}{\beta z} \tanh \beta \lambda l & ; & \frac{1}{\cos \beta \lambda l} \end{bmatrix} \quad (4-28)$$

Jednotlivé prvky matice jsou kromě již známých parametrů λ , z ještě závislé na bezrozměrovém součiniteli β .
/1,23/

Již bylo provedeno vyšetření odporů R, H, D ve vedení. Z těchto rozborů vidíme, že můžeme odpory R, H u vedení početně zjistit. Můžeme také odpor proti deformaci v ocelovém vedení zjistit výpočtem s dostatečně přesnými výsledky. Proti tomu ještě nemáme dodnes výraz na výpočet odporu proti deformaci u hadicového vedení, který dává výsledky vyhovující skutečnosti. Abychom zjistili odpor D u hadicového vedení, musíme zjistit objemovou změnu hadice při vnitřním přetlaku a dále souhrnný modul pružnosti hadicového vedení. Přistoupíme proto k vyšetřování souhrnného modulu a pak objemové změny hadicového vedení. (5-3)

Modul pružnosti trubky nyní odvodíme z teorie tlustostěnných nádob.

Máme danou tlustostěnnou nádobu, namáhanou vnitřním přetlakem p (viz. obr. 5-1).

5. SOUHRNNÝ MODUL PRUŽNOSTI VEDENÍ :

V praxi se někdy vyskytuje problém, jak zjistit modul pružnosti nějakého hydraulického vedení. Je zřejmé, že tento modul pružnosti nebude totožný s modulem pružnosti protékající kapaliny, ani s modulem pružnosti nosné části, jež tvoří vedení.

Lze předpokládat, že na objemové změně hydraulického vedení se budou podílet obě složky vedení, tedy jak kapalina tak nosná část.

Chceme-li toto postihnout, musíme uvažovat tzv. souhrnný modul pružnosti K_s . Budeme se zabývat souhrnným modulem pružnosti u vedení ocelového a hadicového, (obr. 5-1b)

Rovnice rovnováhy do radiálního směru pak má tvar:

5.1. Souhrnný modul pružnosti ocelového vedení :

Jak bylo již dříve uvedeno, platí pro změnu objemu kapaliny podle vztahu (2-10) :

$$\Delta V_K = \frac{V_K}{K} \cdot \Delta p$$

Uvažíme-li ekvivalentní vztah pro změnu objemu trubky, dostaneme: Uvažujeme-li případ pro stěvnou tlakovou nádobu, pak

$$\Delta V_t = \frac{V_t}{E_t} \cdot \Delta p \quad (5-1)$$

kde E_t je modul pružnosti trubky. Pro vedení dále bude platit, že $V_K = V_t = V_o$ a pro celkovou změnu objemu bude: (5-5)

$$\Delta V = \Delta V_K + \Delta V_t \quad (5-2)$$

čímž po dosazení dostaneme:

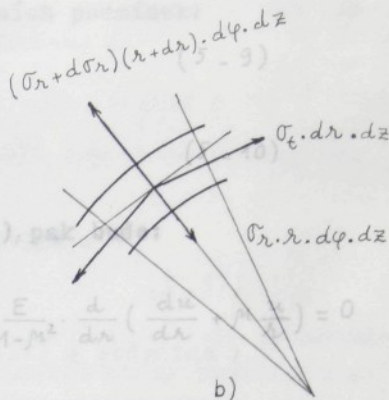
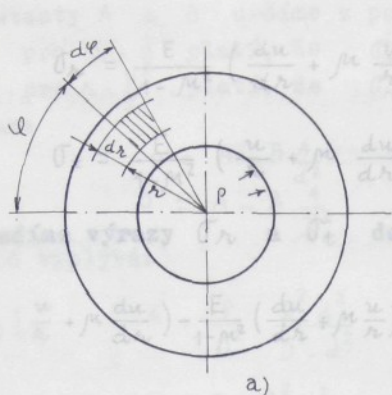
$$\Delta V = \frac{V_o}{K} \cdot \Delta p + \frac{V_o}{E_t} \cdot \Delta p$$

nebo

$$\Delta V = V_o \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{E_t} \right) \cdot \Delta p \quad (5-3)$$

Modul pružnosti trubky nyní odvodíme z teorie tlustostěnných nádob.

Máme danou tlustostěnnou nádobu, namáhanou vnitřním přetlakem p (viz. obr. 5-1).



Obr. 5 - 1

Vyjměme z ní element o rozměrech $dr, dz, r d\varphi$ (obr. 5-1b)
Rovnice rovnováhy do radiálního směru pak má tvar:

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr) d\varphi \cdot dz - \sigma_r \cdot r d\varphi - \sigma_t \cdot dr \cdot d\varphi = 0$$

Po úpravě obdržíme:

$$\sigma_t - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0 \quad (5-4)$$

Uvažujeme-li případ pro otevřenou tlakovou nádobu, pak $\sigma_o = 0$ a jde o rovinnou napjatost, takže podle Hookova zákona pro jednotlivá napětí platí:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_r + \mu \epsilon_t) \quad (5-5)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} (\epsilon_t + \mu \epsilon_r) \quad (5-6)$$

kde ϵ_r je radiální prodloužení, pro které platí:

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (5-7)$$

du je délková změna elementu $dr, dz, r d\varphi$.

ϵ_t je obvodové prodloužení, pro které platí:

$$\epsilon_t = \frac{u}{r} \quad (5-8)$$

Po dosazení (5-7), (5-8) do (5-5) a (5-6) obdržíme:

Konstanty A a B určíme z počátečních podmínek:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right) \quad (5-9)$$

potom:

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} \right) \quad (5-10)$$

dosadíme výrazy σ_r a σ_t do (5-4), pak bude:

tedy vyplývá:

$$\frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} \right) - \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right) - r \cdot \frac{E}{1-\mu^2} \cdot \frac{d}{dr} \left(\frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right) = 0$$

Po úpravě obdržíme diferenciální rovnici:

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{1}{r^2} u = 0 \quad (5-11)$$

Předpokládáme řešení ve tvaru $u = c \cdot r^\lambda$; z charakteristické rovnice dostaneme $\lambda_{1,2} = \pm 1$, takže rovnice (5-11) má tvar řešení:

$$c_2 = \frac{B}{E} (1+\mu) \quad u = \frac{P}{4E} \left(c_1 r + c_2 \frac{1}{r} \right) \quad (5-12)$$

Dosadíme (5-12) do (5-7) a (5-8) obdržíme:

potom dosazením do vztahu (5-12):

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} = c_1 - c_2 \frac{1}{r^2}$$

$$\text{anebo: } \varepsilon_t = \frac{u}{r} = c_1 + c_2 \frac{1}{r^2}$$

Po dosazení do (5-5) a (5-6) obdržíme:

Je-li vlnová délka $\lambda = \frac{D-d}{2}$, můžeme psát:

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left[c_1 (1+\mu) - c_2 (1-\mu) \frac{1}{r^2} \right] \quad (5-13)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \left[c_1 (1+\mu) + c_2 (1-\mu) \frac{1}{r^2} \right] \quad (5-14)$$

Označíme-li $\frac{E c_1}{1-\mu} = A$ a $\frac{E c_2}{1+\mu} = B$, pak:

$$\sigma_r = A - B \frac{1}{r^2} ; \quad \sigma_t = A + B \frac{1}{r^2}$$

Konstanty A a B určíme z počátečních podmínek:

pro $h = \frac{d}{2}$ platí, že $\sigma_h = -P$

pro $h = \frac{D}{2}$ platí, že $\sigma_h = 0$

potom:

$$-P = A - B \frac{4}{d^2}$$

$$0 = A - B \frac{4}{D^2}$$

odtud vyplývá:

$$A = \frac{P}{D^2} \cdot \frac{D^2 d^2}{D^2 - d^2} \quad (5-17)$$

$$B = \frac{P}{4} \cdot \frac{D^2 d^2}{D^2 - d^2} \quad (5-18)$$

Z konstant A a B určíme konstanty C_1 a C_2 :

$$C_1 = \frac{A}{E} (1 - \mu) = \frac{P}{E D^2} \cdot \frac{D^2 d^2}{D^2 - d^2} (1 - \mu)$$

$$C_2 = \frac{B}{E} (1 + \mu) = \frac{P}{4E} \cdot \frac{D^2 d^2}{D^2 - d^2} (1 + \mu)$$

potom dosazením do vztahu (5-12):

$$u = \frac{P d}{2 E} \left[\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu \right]$$

anebo:

$$u = \frac{P \cdot d}{2 E} \left[\frac{D^2 + d^2}{(D-d)(D+d)} + \mu \right]$$

Je-li tloušťka stěny $h = \frac{D-d}{2}$, můžeme psát:

$$u = \frac{P \cdot d}{2 E} \left[\frac{D^2 + d^2}{2 h (D+d)} + \mu \right] \quad (5-21)$$

Ze vztahu (5-21) můžeme též vytvořit poměr:

Vyjádříme-li vnitřní objem trubky:

$$V_t = \frac{\pi d^2}{4} \cdot l$$

můžeme přibližně psát: hydraulická kapacita C_A .

Převrácená hodnota hydraulické kapacity se nazývá odpor proti de

$$\Delta V_t \approx \frac{\pi(d+2u)^2 - \pi d^2}{4} \cdot l \approx \pi \cdot d \cdot u \cdot l$$

Podle vztahu (5-1) platí, že

$$E_t = \frac{V_t \cdot \Delta p}{\Delta V_t}$$

Po dosazení V_t a ΔV_t do (5-1) obdržíme :

$$\frac{1}{E_t} = \frac{4u}{d \cdot p} \quad (5-17)$$

Dosadíme u ze vztahu (5-16) do (5-17) a obdržíme :

$$\frac{1}{E_t} = \frac{2}{E} \left[\frac{D^2 + d^2}{2h(D+d)} + \mu \right] \quad (5-18)$$

Pro náš případ tenkostěnné trubky můžeme uvažovat $D \approx d$, pak pro $\mu = 1/4$ dostaneme:

$$\frac{1}{E_t} = \frac{2}{E} \left[\frac{2d^2}{4 \cdot h \cdot d} + \frac{1}{4} \right]$$

a odtud modul pružnosti tenkostěnné trubky

$$E_t = \frac{E \cdot h}{d} \quad (5-19)$$

Po dosazení (5-19) do (5-3) dostaneme :

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot h} \right) \cdot \Delta p \quad (5-20)$$

Srovnáme-li vztah (5-20) se vztahy (2-10) a (5-1), vidíme, že souhrnný modul pružnosti K_s pro tenkostěnné trubky můžeme napsat ve tvaru :

$$K_s = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot h}} \quad (5-21)$$

Ze vztahu (5-21) můžeme též vytvořit poměr :

$$\frac{\Delta V}{\Delta p} = V_0 \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot h} \right) \quad (5-22)$$

a tento poměr se nazývá hydraulická kapacita C_h .

Převrácená hodnota hydraulické kapacity se nazývá odpor proti deformaci, který již byl výše zmíněn.

5.2. Souhrnný modul pružnosti hadicového vedení :

Jak bylo již dříve uvedeno, platí pro změnu objemu hadicového vedení vztah (3-4) :

$$\Delta V_H = \Delta V_K + \Delta V_S = V_0 \left[\frac{1}{K} + g(m_i) \right] \cdot \Delta p$$

kde $g(m_i)$ je funkce vyjadřující vliv materiálových, geometrických, konstrukčních a výrobních parametrů stěny hadice, uza-
vírající geometrický objem V_0 , na působícím tlaku.

Srovnáme-li tento vztah se vztahy (2-10) a (5-1), můžeme jej rovněž napsat ve tvaru:

$$\Delta V_H = \frac{V_0}{K_{SH}} \cdot \Delta p \quad (5-23)$$

kde K_{SH} je souhrnný modul pružnosti hadicového vedení určený vztahem:

$$K_{SH} = \frac{1}{\frac{1}{K} + g(m_i)} \quad (5-24)$$

Pro výpočet K_{SH} je nutno znát funkci $g(m_i)$, kterou dosud nemáme k dispozici a nemůžeme matematicky zjistit. Souhrnný modul pružnosti hadicového vedení proto zjistíme experimentálně.

5.3. Zjištění souhrnného modulu pružnosti :

Podle vztahů (5-20), (5-21), (5-23) a (5-24) máme:
Pro ocelové vedení:

$$K_S = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot h}} = V_0 \cdot \frac{\Delta p}{\Delta V}$$

Pro hadicové vedení:

$$K_{SH} = \frac{1}{\frac{1}{K} + g(m_i)} = V_{0H} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta V_H}$$

Z toho vyplývá, že princip měření K_S nebo K_{SH} , který platí pro vedení ocelové a hadicové, by spočíval ve zjišťování změny tlaku p kapaliny uzavřené ve vedení, v závislosti na změně objemu V . Potom, podle výše uvedených vztahů můžeme při známém objemu V_0 a naměřených příslušných hodnotách ΔV a Δp vypočítat souhrnný modul pružnosti vedení.

Jinak řečeno, zjištění souhrnného modulu pružnosti vedení se redukuje na měření a zjištění změny objemu vedení při vnitřním přetlaku. Zařízení a uspořádání měření K_S nebo K_{SH} jsou proto totožná jako zařízení a uspořádání měření objemové změny vedení, což bude provedeno v další kapitole. I tyto experimentální. V experimentální části této práce budou srovnány výsledky měření na ocelovém vedení s vypočítanými výsledky podle (5-20), čímž bude vykonána kontrola.

Obdobně pro hadicové vedení podle (3-2) platí:

$$\Delta V = V_0 \left[\frac{\Delta p}{K} + f(M, p) \right]$$

Z tohoto vztahu však nemůžeme vypočítat ΔV , poněvadž nemáme k dispozici $f(M, p)$.

Odvoďme-li závislost změny objemu hadice na změně úhlu β , kde β je úhel mezi spirálou a osou nebo úhlem a směrem k osě k hadici, za předpokladu homogenního tlaku (viz. kap. 3.2.) můžeme podle (3-10) psát:

$$\Delta V_S = V_0 \cdot \left(2 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \beta_0} - \frac{\sin \beta}{\sin \beta_0} - 3 \right)$$

Tady je β zase funkcí nepřírodných parametrů hadice. Jinak řečeno, nemáme dosud způsob výpočtu, který dává shodné výsledky se skutečností. Abychom zjistili objemovou změnu hadice, museli bychom tedy používat experimentální způsob.

V další části budeme experimentálně vyšetřovat celkovou objemovou změnu, změnu objemu pouhé stěny hadice a změnu geometrických parametrů (vnějšího průměru a délky) hadice při působení vnitřního tlaku pomocí různých metod.

6.1. Experimentální zjištění objemových změn hadice
měření vyteklého množství kapaliny z hadice :

6. OBJEMOVÁ ZMĚNA HADICOVÉHO VEDENÍ :

Jak bylo již uvedeno, při působení vnitřního přetlaku, který se přenáší na stěny hadice pomocí dopravované látky, dochází k deformaci vedení a vzhledem k určité poddajnosti přepravované látky i k deformaci této látky. Budeme-li předpokládat, že převovaná látka je kapalina, potom můžeme pro celkovou objemovou změnu u ocelové trubky podle (5-20) psát:

$$\Delta V = V_0 \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot h} \right) \Delta p$$

Tento výraz dává dost shodné výsledky ve srovnávání s výsledky experimentálními. V experimentální části této práce budou srovnány výsledky měření na ocelovém vedení s vypočítanými výsledky podle (5-20), čímž bude vykonána kontrola.

Obdobně pro hadicové vedení podle (3-2) platí:

$$\Delta V = V_0 \left[\frac{\Delta p}{K} + f(m_i, p) \right]$$

Z tohoto vztahu však nemůžeme vypočítat ΔV , poněvadž nemáme k dispozici $f(m_i, p)$.

Odvodíme-li závislost změny objemu hadice na změně úhlu β , kde β je úhel mezi spirálou příze nebo drátu a směrem kolmým k ose hadice, za některých předpokladů (viz. kap.3.2.) můžeme podle (3-10) psát:

$$\Delta V_s = V_0 \cdot \left(2 \cdot \frac{\cos \beta}{\cos \beta_0} + \frac{\sin \beta}{\sin \beta_0} - 3 \right)$$

Tady je β zase funkcí neznámých parametrů hadice. Jinak řečeno, nemáme dosud způsoby výpočtu, které dávají shodné výsledky se skutečností. Abychom zjistili objemovou změnu hadice, museli bychom tedy používat experimentálního způsobu.

V další části budeme experimentálně vyšetřovat celkovou objemovou změnu, změnu objemu pouhé stěny hadice a změnu geometrických parametrů (vnějšího průměru a délky) hadice při působení vnitřního tlaku pomocí různých metod.

6.1. Experimentální zjišťování objemových změn hadice měřením vyteklého množství kapaliny z hadice :

Podle tohoto způsobu budou hodnoty celkových objemových změn hadice získané měřením vyteklého množství kapaliny z hadice zatížené vnitřním přetlakem. Naměřené výsledky nám dávají závislost $\Delta V = f(\Delta p)$.

Podle (3-3) můžeme pro celkovou objemovou změnu hadice psát:

$$\Delta V = \Delta V_K + \Delta V_S$$

kde: ΔV_K : objemová změna kapaliny

ΔV_S : objemová změna pouhé stěny hadice.

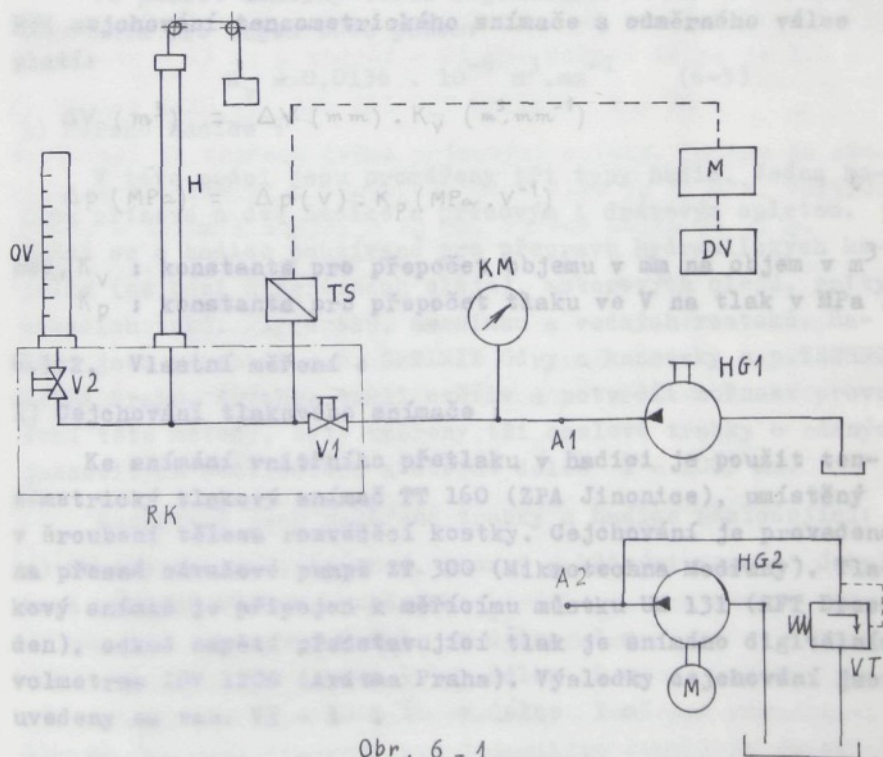
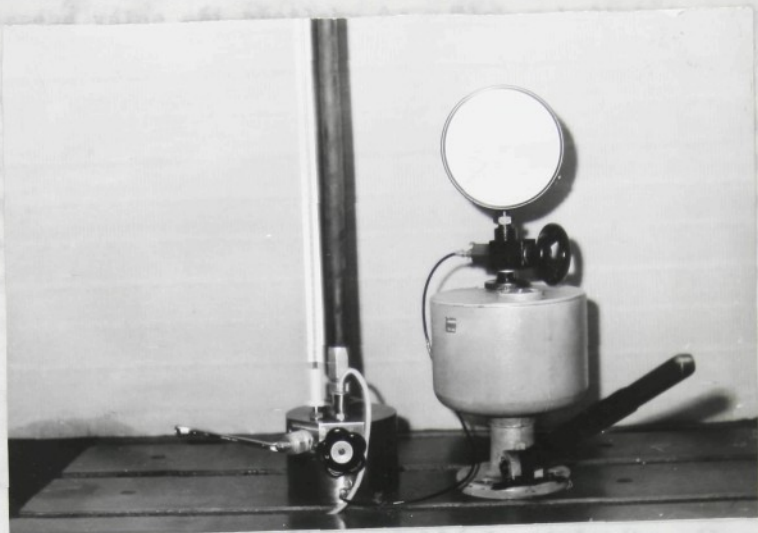
Můžeme závislost $\Delta V_K = f(\Delta p)$ vypočítat podle vztahu (2-10), potom dostaneme závislost $\Delta V_S = f(\Delta p)$ tím, že od naměřené závislosti $\Delta V = f(\Delta p)$ odečteme závislost $\Delta V_K = f(\Delta p)$.

6.1.1. Princip měření :

Princip měření spočívá v měření konečných objemových změn vedení a kapaliny se změnami působícího tlaku. K měření bylo použito zařízení znázorněné na obr. 6-1.

Pracovní obvod na obr. 6-1 se skládá z rozváděcí kostky (RK), která obsahuje přívodní ventil (V1) a vypouštěcí ventil (V2), šroubení M 8x1 pro zdroje tlaku, šroubení pro připojení měřeného objektu (hadice), šroubení pro připojení snímače tlaku (TS) a nástavec pro odměrný válec (OV). Obvod je vybaven ještě kontrolním manometrem (KM). Napájení obvodu bude buď ručním hydrogenerátorem (HG1) nebo hydrogenerátorem s elektromotorem (HG2).

Při vlastním měření postupujeme následovně. Nejprve naplníme rozváděcí kostku hydraulickou kapalinou tak, aby nikde nedošlo k uzavření určitého vzduchu. Všechny ventily jsou otevřeny. Po naplnění rozváděcí kostky uzavřeme ventil V2, přichytíme koncovku hadice na rozváděcí kostku a ručním hydrogenerátorem pomalu naplňujeme objem hadice. Po zaplnění celého objemu hadice, přišroubovujeme druhou koncovku hadice ke šroubu napínacího lanka. Ručním generátorem zvyšujeme tlak. Hadici natlakujeme na určitý přetlak a zavřeme ventil V1. Potom postupně otevíráme ventil V2 a odpouštíme do odměrného válce určité množství kapaliny odpovídající pře-



Obr. 6 - 1

tlaku v hadici. Měříme tedy množství kapaliny V_T vyteklé do odměrného válce při přetlaku Δp . Tlak v hadici je snímán tenzometrickým snímačem a přes měřicí můstek je jeho hodnota ukazována digitálním volmetrem. Naměřené hodnoty Δp a V_T jsou odečítány ve voltech a v milimetrech stupnice odměrného válce. Proto je pro zpracování výsledků nutno ocejchovat tenzometrický snímač a odměrný válec. Dále je potom nutno přepočítat množství kapaliny vyteklé do odměrného válce V_T na množství kapaliny v hadici ΔV . Potom platí:

$$\Delta V_i = V_{Tmax} - V_{Ti}$$

kde

ΔV_i : množství kapaliny natlačené do hadice při působení měřícího přetlaku Δp_i

V_{Tmax} : celkové (maximální) množství kapaliny vyteklé do válce, odpovídající přetlaku $\Delta p = 0$

V_{Ti} : množství kapaliny vyteklé do odměrného válce, odpovídající přetlaku Δp_i

Při cejchování tenzometrického snímače a odměrného válce platí:

$$\Delta V (m^3) = \Delta V (mm) \cdot K_V (m^3 \cdot mm^{-1})$$

$$\Delta p (MPa) = \Delta p (V) \cdot K_p (MPa \cdot V^{-1})$$

kde, K_V : konstanta pro přepočet objemu v mm na objem v m^3

K_p : konstanta pro přepočet tlaku ve V na tlak v MPa.

6.1.2. Vlastní měření :

1) Cejchování tlakového snímače :

Ke snímání vnitřního přetlaku v hadici je použit tenzometrický tlakový snímač TT 160 (ZPA Jinonice), umístěný v šroubení tělesa rozváděcí kostky. Cejchování je provedeno na přesné závažové pumpě ZT 300 (Mikrotechna Močřany). Tlakový snímač je připojen k měřicímu můstku UM 131 (RFT Dresden), odkud napětí představující tlak je snímáno digitálním volmetrem IDV 1200 (Aritma Praha). Výsledky cejchování jsou uvedeny na tab. VI - 1.

P(MPa)	U (V)	U (V)	U (V)
2,5	0,0300	0,0298	0,0300
5,0	0,0595	0,0597	0,0597
7,5	0,0902	0,0900	0,0902
10,0	0,1200	0,1197	0,1200
12,5	0,1510	0,1506	0,1517
15,0	0,1820	0,1820	0,1825

Tab. VI - 1

Ze zjištěných hodnot při cejchování byl pomocí metody nejmenších čtverců vypočítán převod mezi odečítanou hodnotou ve voltech a tlakem:

$$K_p = 82,2 \text{ MPa.V}^{-1} \quad (6-4)$$

2) Cejchování odměrného válce :

Je použit odměrný válec cejchovaný v /32/. Převodní konstanta pro objem bude potom:

$$K_v = 0,0136 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3.\text{mm}^{-1} \quad (6-5)$$

3) Měření hadice :

V této práci jsou proměřeny tři typy hadic. Jedna hadice přízová a dvě hadice s přízovým i drátovým opletem. Jedná se o hadice používané pro přepravu hydraulických kapalin (na bázi minerálních olejů), motorových olejů, nafty, mazacích tuků, glycerinu, amoniaku a vodných roztoků. Hadice jsou výrobkem n.p. OPTIMIT Odry a koncovky n.p. TECHNOMETRA Praha. Abychom mohli ověřit a potvrdit možnost provedení této metody, byly změřeny tři ocelové trubky o různých jmenovitých světlostech a stejné délce $l = 1000 \text{ mm}$.

Konkrétně jsou naměřené trubky a hadice následující:

- Trubky ocelové, bezešvé, přesné s běžnými mezními úchylkami ČSN 42 6710 v rozměrech: 6×1 v délce 1 m v jmenovitých světlostech (Js6, Js8, Js10) a 8×1 v délce 1 m měřené hodnoty pak byly srovnány s výpočtem 10×1 v délce 1 m měřené návinosti ΔV na Δp byly vyneseny pro jednotlivé trubky do grafů

b) Hadice Js10 272 326 3 10 21 10PNT 028406 VIII.76 :
hadice s drátovým opletem a se dvěma oplety přízovými, je
určená pro tlaky až 16 MPa. Poruchový tlak je 45 MPa. Vnitř-
ní průměr 10 mm a vnější 21 mm. Měřená délka je 1 m.

c) Hadice OPTIMIT 8/17 PND 21/416-81 IX . 82 :

vnitřní vrstva (duše) je pryžová. Vyztužení je tvořeno dvěma
přízovými oviny a jedním drátěným opletem. Hadice je stavěna
na přetlak 21 MPa. Poruchový tlak je 63 MPa. Vnitřní průměr
- 8 mm a vnější - 17 mm. Měřená délka je 1,25 m.

d) Hadice OPTIMIT 10/21 PND 21/338-81 III . 82 :

konstrukce je totožná jako u hadice c). Hadice je stavěna na
přetlak 15 MPa. Poruchový tlak je 45 MPa. Vnitřní průměr -
10 mm a vnější - 21 mm. Měřená délka je 1,6 m.

e) Hadice OPTIMIT 13/25 PND 21/340-81 :

konstrukce je totožná jako u hadic c) a d). Hadice je sta-
věna na přetlak 12,5 MPa. Poruchový tlak je 37,5 MPa. Vnitř-
ní průměr - 13 mm a vnější - 25 mm. Měřená délka je 1,0 m.

f) Hadice Js10 272 326 011 020 OPTIMIT X . 78 :

vyztužení je tvořeno dvěma přízovými oplety. Hadice je sta-
věna na přetlak 12,5 MPa. Poruchový tlak je 35 MPa. Vnitřní
průměr - 10 mm a vnější - 20 mm. Měřená délka je 1 m.

4) Hydraulická kapalina :

Pro vlastní měření je použito hydraulické kapaliny
OT T3C. Jedná se o minerální olej, jehož modul pružnosti je
v rozsahu prováděného měření konstantní a má velikost:

$$K_K = 1,662669 \cdot 10^3 \text{ MPa} \quad /30/$$

6.1.3. Zpracování naměřených výsledků a zhodnocení :

1) Pro ocelové trubky :

Jak bylo řečeno, s účelem ověřit možnosti metody byly
změřeny tři ocelové trubky o různých jmenovitých světlostech
(Js6, Js8, Js10) a stejné délce 1 m. Naměřené hodnoty pak
byly srovnány s vypočítanými výsledky. Naměřené závislosti
 ΔV na Δp byly vyneseny pro jednotlivé trubky do grafů

(viz. obr. 6-2 v příloze). Jak je z obrázku patrné, závislosti u jednotlivých ocelových trubek jsou lineární. Víme, že lze hodnotu deformace ocelové trubky matematicky vyčíslit z již uvedeného vztahu:

$$\Delta V = \Delta V_K + \Delta V_T = V_0 \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot s} \right) \cdot \Delta P$$

Při známých parametrech $K_K = 1,66 \cdot 10^3$ MPa, $d = 10$ mm, $E = 2,1 \cdot 10^5$ MPa, $s = 1$ mm, lze spočítat deformaci trubky o délce 1000 mm, např. při přetlaku 10 MPa.

Při srovnání s příslušnými naměřenými hodnotami u stejného přetlaku vidíme, že grafické záznamy jsou dostatečně přesné (chyba je kolem 7%). Navíc lze průběh deformace ocelové trubky považovat za průběh stlačení kapaliny. Deformace trubky totiž činí okolo 7% celkové deformace. Vynesením této závislosti do grafů hadic si lze vytvořit představu o ovlivnění závislosti deformace hadice při zanedbání stlačitelnosti v ní uzavřeného objemu kapaliny.

Z uvedených výsledků tedy vyplývá možnost měření objemových změn na sestaveném zařízení.

2) Hadice Js10 272 326 3 1021 10PNT 628406 VIII . 76 :

Abychom zjistili objemovou změnu hadice a současně vliv času a rychlosti měření na naměřené hodnoty, měření bylo provedeno tak, že při měření hadice byly ponechány jak mezi jednotlivými dílčími měřeními, tak i mezi jednotlivými měřeními různé časové intervaly:

1/ jednotlivá měření byla provedena rychle za sebou a v závěru se nenechala hadice relaxovat (viz. obr. 6-3 v příloze),

2/ měření je obdobné jako u 1/ , ale mezi skončeným měřením a opětným natlakováním hadice byl ponechán časový interval ≈ 15 min. (viz. obr. 6-4 v příloze),

3/ mezi jednotlivými dílčími měřeními byl ponechán interval ≈ 3 min. , po skončení měření byla hadice ihned natlakována a měření se opakovalo (viz. obr. 6-5 v příloze),

4/ mezi jednotlivými dílčími měřeními byl ponechán časový interval ≈ 3 min. , mezi skončeným měřením a opětným

natlakováním byl ponechán interval ≈ 15 min. (viz. obr. 6-6 v příloze).

Každé měření bylo prováděno 3x. Z uvedených výsledků vidíme, že naměřené hodnoty téměř nezávisí na času a rychlosti měření nebo tato souvislost je zanedbatelná. To znamená, že lze měřit rychle za sebou a nemusíme nechat hadice relaxovat.

Kromě toho vidíme také, že odchylka mezi jednotlivými měřeními je malá a chyba nepřekročila 5%. Z toho vyplývá, že pro každou hadici stačí provádět měření třikrát.

Při srovnání s výsledky zjištěnými u ocelové trubky docházíme k tomu, že pro tento typ hadice činí deformace kapaliny okolo 8% celkové deformace a tento poměr se mění se klesáním přetlaku.

Na obr. 6-7 v příloze jsou provedeny závislosti poměrné změny objemu hadic 272 326 PNT 628406 různých geometrických parametrů (Js10 délky 1000 mm, 500 mm a 1500 mm; Js8 délky 1000 mm) na vnitřním přetlaku. Jak je z obrázku patrné, geometrické parametry hadice mají značný vliv na její objemovou změnu a tato souvislost není lineární, ale je dost složitá. Ještě se vrátíme k tomuto problému.

3) Hadice OPTIMIT PND : mají zhruba tvar daný na obr. 6-12

Pro tento druh hadice byla prováděna měření tří hadic o různých geometrických parametrech a výsledky byly uvedeny na grafech (v příloze) :

obr. 6-8 : hadice OPTIMIT 8/17 PND 21/416-81 IX-82, $l=1,25$ m

obr. 6-9 : hadice OPTIMIT 10/21 PND 21/338-81, III-82, $l=1,6$ m

obr. 6-10 : hadice OPTIMIT 13/25 PND 21/340-81 $l=1,0$ m.

Abychom zjistili, jaký je rozdíl objemových změn mezi hadicemi stejného druhu a stejného geometrického rozměru, byla prováděna pro každý druh hadice měření na pěti hadicích stejného rozměru. Každé měření bylo prováděno třikrát.

Z uvedených grafů vidíme, že rozdíl při měření různých hadic stejného rozměru není moc velký. Chyba při měření u

přetlaku 4 MPa je $(6 \pm 15)\%$, u přetlaku 8 MPa je $(8 \pm 12)\%$ a u přetlaku 12 MPa je $(5 \pm 7)\%$. Z toho vyplývá, že při měření změny objemu hadice nebo obecně při vyšetřování vlastností hadice je potřeba provádět měření na několika hadicích stejného druhu a rozměru a odtud zjišťovat střední hodnoty. Tímto způsobem lze snížit chybu při měření na menší než 8%.

4) Hadice Js10 272 326 011 020 OPTIMIT X-78, $l = 1$ m :

Bylo prováděno měření hadice Js10 OPTIMIT, u níž je objemová změna mnohem větší ve srovnání s objemovou změnou u hadice PNT a PND. Výsledky byly uvedeny na obr. 6-11 v příloze.

Měřením zjištěné hodnoty deformací nebudou přesně odpovídat skutečným hodnotám při provozu hadice. Odchylka je způsobena montáží hadice při měření proto vzniká v hadici axiální složka napětí, která částečně velikost deformací ovlivňuje.

Odečítáme-li objemovou změnu kapaliny v hadici od celkové změny objemu, obdržíme změnu objemu stěny hadice, což nám umožňuje odstranit vliv kapaliny při vyšetřování vlastností hadice.

Skutečné závislosti změny objemu stěny hadice na vnitřním přetlaku $\Delta V_s = f(\Delta p)$ mají zhruba tvar daný na obr. 6-12. Výrazná nelineární závislost v okolí bodu Δp_{12} je způsobena změnou vlastností hadice při deformaci, především změnou modulu pružnosti tlakové vložky jako celku.

V rozsazích tlaků $(0 \text{ až } \Delta p_1)$ a $(\Delta p_2 \text{ až } \Delta p_3)$ je však závislost přibližně lineární. Proto je možné nahradit závislost $\Delta V_s = f(\Delta p)$ v těchto intervalech dvěma lineárními závislostmi.

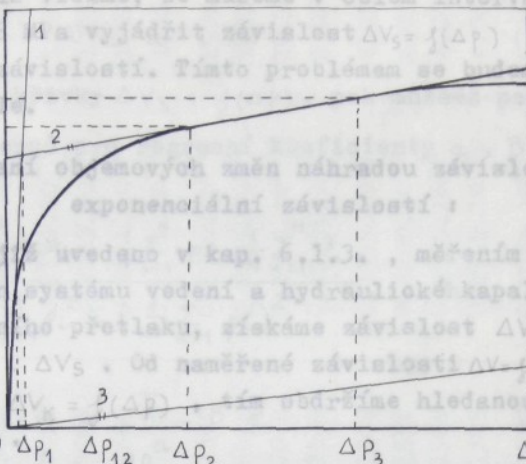
Vzhledem ke skutečnosti, že deformace podle přímky 1 probíhá pouze v malém počátečním rozsahu a tudíž je pro uživatele hadice nezajímavá (pozn. směrnice přímky 1 je úměrná velikostem modulu pružnosti pryže a tlakové vložky v nezátěženém stavu). Pro výpočet však lze předpokládat, že deformace zde probíhá především deformací pryže duše.

V oblasti nelineární je směrnice tečny ke křivce

z obr. 6-12 vidíme, že můžeme v celém intervalu přetlaku od 0 do Δp_3 vyjádřit závislost $\Delta V_s = f(\Delta p)$ přibližně exponenciální závislostí. Tímto problémem se budeme zabývat v další kapitole.

6.1.4. Vyjádření objemových změn náhradou závislosti exponenciální závislostí :

Jak bylo již uvedeno v kap. 6.1.3., měření konečných objemových změn systému vedení a hydraulické kapaliny při působení vnitřního přetlaku, získáme závislost $\Delta V = f(\Delta p)$, kde $\Delta V = \Delta V_K + \Delta V_s$. Od naměřené závislosti $\Delta V = f(\Delta p)$ odečteme závislost $\Delta V_K = f(\Delta p)$, čímž získáme hledanou závislost $\Delta V_s = f(\Delta p)$.



Vidíme, že takto získaná závislost je nelineární a lze ji v určitém intervalu nahradit exponenciální závislostí.

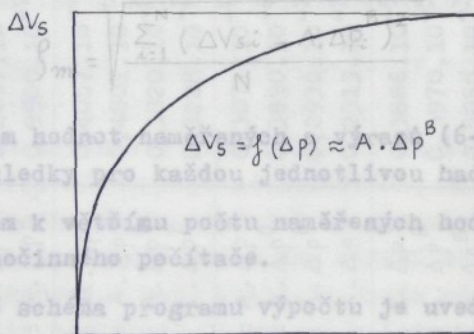
$\Delta V_s = f(\Delta p)$ úměrná souhrnnému modulu pružnosti hadice. Ten je z největší části určen souhrnným modulem pružnosti tlakové vložky. Souhrnný modul tlakové vložky je charakterizován modulem pružnosti materiálu tlakové vložky a úhlem vinutí šroubovice vláken. Při působení a změně vnitřního přetlaku dochází ke změně úhlu vinutí a tím ke změně souhrnného modulu pružnosti. Dále může ke změně souhrnného modulu pružnosti dojít změnou modulu pružnosti materiálu s působícím tlakem. To se vyjadřuje zřetelněji v případech, kdy je tlaková vložka tvořena viskoelastickými materiály. Proto je v případě přízových hadic nelineární oblast výraznější než u hadic drátových, což odpovídá získaným výsledkům při měření. Potom hodnota úhlu vinutí dosáhne hodnoty blízké úhlu neutrálnímu a tedy deformace hadice bude ovlivňován pouze změnou modulu pružnosti materiálu tlakové vložky. Od určitého tlaku již ke změně souhrnného modulu nedochází, bude platit pro deformaci Hookův zákon a hodnota souhrnného modulu bude úměrná směrnici přímky 2. To se dá vysvětlit domněnkou, že materiál bude "tvrdnout" vlivem dostatečně velkého přetlaku, jeho struktura bude "zpevňována", modul pružnosti materiálu se stane skoro konstantním a tím bude skoro konstantní také souhrnný modul pružnosti hadice.

nebo z obr. 6-12 vidíme, že můžeme v celém intervalu přetlaku od 0 do 16 MPa vyjádřit závislost $\Delta V_S = f(\Delta p)$ (přibližně exponenciální závislostí. Tímto problémem se budeme zabývat v další kapitole.

6.1.4. Vyjádření objemových změn náhradou závislosti exponenciální závislostí :

Jak bylo již uvedeno v kap. 6.1.3. , měření konečných objemových změn systému vedení a hydraulické kapaliny při působení vnitřního přetlaku, získáme závislost $\Delta V = f(\Delta p)$, kde $\Delta V = \Delta V_K + \Delta V_S$. Od naměřené závislosti $\Delta V = f(\Delta p)$ odečteme závislost $\Delta V_K = f(\Delta p)$, tím obdržíme hledanou závislost $\Delta V_S = f(\Delta p)$.

Vidíme, že takto získaná závislost je nelineární a lze ji v určitém intervalu nahradit exponenciální závislostí (obr. 6-13).



Obr. 6-13

Potom můžeme psát:

$$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B \quad (6-6)$$

kde A a B jsou regresní koeficienty. K jejich stanovení použijeme lineární regrese. To znamená, že exponenciální závislost nejprve linearizujeme zlogaritmováním a potom regresi získané koeficienty, vyjadřující směrnici a úsek na ose $\log \Delta V_S$ převedeme na regresní koeficienty exponenciály. Platí tedy:

$$\log \Delta V_S = \log A + B \log \Delta p$$

neboli

$$v = a + B \cdot p \quad (6-7)$$

Máme-li N bodů křivky $\Delta V_s = f(\Delta p)$, pak můžeme podle metody nejmenších čtverců pro regresní koeficienty a , B , A psát:

$$B = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i v_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \right)^2} \quad (6-8)$$

$$a = \bar{v} - B \bar{p} \quad (6-9)$$

$$A = 10^a \quad (6-10)$$

Při výpočtu regresních koeficientů podle vztahů (6-8), (6-9) a (6-10) můžeme pro střední kvadratickou chybu psát:

$$s_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta V_{si} - A \cdot \Delta p_i^B)^2}{N}} \quad (6-11)$$

Použitím hodnot naměřených a výrazů (6-8) až (6-11) obdržíme výsledky pro každou jednotlivou hadici.

Vzhledem k většímu počtu naměřených hodnot, je vhodné používat samočinného počítače.

Blokové schéma programu výpočtu je uvedeno zjednodušeně na obr. 6-14 v příloze. Program je napsán v jazyku FORTRANu a vyřešen na počítači EC 1033.

Podobně lze tímto programem zjistit exponenciální závislosti na přetlaku objemové změny vedení ΔV (změny objemu stěn + kapaliny) nebo poměrné objemové změny vedení:

$$\Delta V = A_1 \cdot \Delta p^{B_1} ; v = A_2 \cdot \Delta p^{B_2} ; v_A = A_3 \cdot \Delta p^{B_3}$$

$$\text{kde } v = \frac{\Delta V}{V_0} ; v_A = \frac{\Delta V_s}{V_0}$$

Těchto výsledků bude používáno při zhodnocení a srovnání výsledků zjištěných různými experimentálními způsoby, které budou představeny v dalších kapitolách. Získané výsledky pro jednotlivý typ hadice jsou uvedeny v tab. VI - 2

Hadice	Vztah	Koeficient A	Koeficient B	$\sum m$	ρ_m [%]
OPTIMIT 8/17 PND 21/416 81 IX-1982	$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$	0,5969.10 ⁻⁶	0,5404	0,4372.10 ⁻⁷	4,5%
	$\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	0,6393.10 ⁻⁶	0,5831	0,6065.10 ⁻⁷	4,0%
	$v = A \cdot \Delta p^B$	0,1017.10 ⁻¹	0,5831	0,9656.10 ⁻³	4,5%
	$v_\lambda = A \cdot \Delta p^B$	0,9500.10 ⁻²	0,5404	0,6959.10 ⁻³	4,0%
OPTIMIT 10/21 PND 21/338 81 III-1982	$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$	0,4057.10 ⁻⁶	0,7328	0,2790.10 ⁻⁷	1,5%
	$\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	0,4801.10 ⁻⁶	0,7886	0,3793.10 ⁻⁷	1,5%
	$v = A \cdot \Delta p^B$	0,3820.10 ⁻²	0,7886	0,3021.10 ⁻³	1,5%
	$v_\lambda = A \cdot \Delta p^B$	0,3228.10 ⁻²	0,7328	0,2220.10 ⁻³	1,5%
OPTIMIT 13/25 PND 21/340 81	$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$	0,3071.10 ⁻⁶	0,7386	0,3380.10 ⁻⁷	2,5%
	$\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	0,3890.10 ⁻⁶	0,8048	0,2323.10 ⁻⁷	1,0%
	$v = A \cdot \Delta p^B$	0,2930.10 ⁻²	0,8048	0,1754.10 ⁻³	1,0%
	$v_\lambda = A \cdot \Delta p^B$	0,2313.10 ⁻²	0,7386	0,2545.10 ⁻³	2,0%
Js10 272 326 3 1021 10 PNT 628406	$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$	0,3886.10 ⁻⁵	0,1309	0,1535.10 ⁻⁶	4,5%
	$\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	0,3970.10 ⁻⁵	0,1568	0,2280.10 ⁻⁶	4,0%
	$v = A \cdot \Delta p^B$	0,5055.10 ⁻¹	0,1568	0,2903.10 ⁻²	4,0%
	$v_\lambda = A \cdot \Delta p^B$	0,4948.10 ⁻¹	0,1309	0,1955.10 ⁻²	4,0%
Js10 272 326 011 020 OPTIMIT X.78	$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$	0,5167.10 ⁻⁵	0,2980	0,1079.10 ⁻⁶	1,0%
	$\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	0,5243.10 ⁻⁵	0,3096	0,1438.10 ⁻⁶	1,5%
	$v = A \cdot \Delta p^B$	0,6675.10 ⁻¹	0,3096	0,1832.10 ⁻²	1,5%
	$v_\lambda = A \cdot \Delta p^B$	0,6579.10 ⁻¹	0,2980	0,1374.10 ⁻²	1,0%

Tab. VI - 2

$(\Delta V [10^{-6} \text{ m}^3], \Delta V_s [10^{-6} \text{ m}^3], \Delta v [\%], v_s [\%] \text{ a } \Delta p [\text{MPa}])$

Středem uvedených výsledků vidíme, že chyba při náhradě závislosti $\Delta V_s = f(\Delta p)$ závislostí $\Delta V_s = A \cdot \Delta p^B$ je poměrně malá, a proto můžeme v určitém intervalu počítat ΔV_s podle vyhledaných výsledků. Tento závěr platí i pro vztahy $\Delta V = f(\Delta p)$ nebo vztahy mezi v , v_s a Δp .

Při měření změn objemu při vyšších tlacích již nebylo odečítání Δp a ΔV_s tak přesné jako při tlacích nižších. Bylo to způsobeno rychlým poklesem tlaku vzhledem k netěsnostem v obvodu.

Stanovení exponenciální závislosti $\Delta V_s = A \cdot \Delta p^B$ znamená dosti velké množství výpočtů. Na druhé straně, při vyšetřování chování celého mechanismu je často třeba docházet k linearizování závislosti ΔV_s na Δp . V těchto případech není vhodné používat exponenciální závislosti. V další kapitole zkusíme vypočítat a zjistit linearizované závislosti ΔV_s na Δp v určitém intervalu pracovního přetlaku.

6.1.5. Linearizace závislosti $\Delta V_s = f(\Delta p)$ v určitém intervalu přetlaků:

Jak bylo uvedeno v kap. 6.1.3. a na obr. 6-2, v rozsahu tlaku Δp_2 až Δp_3 je závislost ΔV_s na Δp přibližně lineární. Víme také, že obvykle ve skutečnosti není pracovní přetlak hadice menší než 4 MPa a není větší než 16 MPa (pro hadice měřené v kap. 6.1.3.). Proto nás napadá, zda je možné nahradit závislost ΔV_s na Δp v intervalu přetlaků (4 + 16) MPa lineární závislostí a jaké velikosti dosáhne chyba při této náhradě.

Při linearizaci máme vztah:

$$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p \quad (6-12)$$

kde koeficienty A a B zjišťujeme zase pomocí experimentálních výsledků a metody nejmenších čtverců:

$$B = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta V_{si} \cdot \Delta p_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta p_i \cdot \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta V_{si}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta p_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta p_i \right)^2} \quad (6-13a)$$

$$A = \overline{\Delta V_S} - B \cdot \overline{\Delta p} \quad (6-13b)$$

Střední kvadratická chyba bude:

$$\beta_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [\Delta V_{Si} - (A + B \cdot \Delta p_i)]^2}{N}} \quad (6-13c)$$

kde N je počet naměřených údajů v intervalu $(4 + 16)$ MPa .

Je vhodné používat podobného programu výpočtu, jehož blokové schéma je uvedeno na obr. 6-14 s příslušnými opravami. Řešíme program také na počítači EC 1033 a obdržíme výsledky uvedené v tab. VI - 3 . V tabulce byly také uvedeny výsledky $\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$ napsané již v tab. VI - 2 s takovým účelem, že můžeme lehce srovnat přesnosti mezi dvěma metodami, t.j. náhradou exponenciální závislosti a náhradou linearizovanou závislostí. Podobně byly v tab. VI - 4 vyneseny exponenciální a linearizované závislosti ΔV na Δp .

Z výsledků v tabulkách je patrné, že lze v intervalu přetlaku (4 až 16) MPa nahradit závislosti $\Delta V_S = f(\Delta p)$ a $\Delta V = f(\Delta p)$ linearizovanými závislostmi ΔV_S a ΔV na Δp s dostatečně malou chybou. To platí pro hadice s tlakovou vložkou drátovou i přízovou. Chyba při této náhradě je ekvivalentní ve srovnávání s chybou při náhradě exponenciální závislosti a výpočet je snadnější . Z toho vyplývá, že lze linearizovaných závislostí ΔV a ΔV_S na Δp používat při vyšetřování vlastností hadice v intervalu $(4 + 16)$ MPa. Na druhé straně, jak bylo řečeno, máme pro hadice vztahy výpočtu souhrnného modulu pružnosti a kapacity:

$$K_{SH} = \frac{V_0 \cdot \Delta p}{\Delta V} = V_0 \frac{dp}{dV}$$

$$C_H = \frac{1}{D_H} = \frac{\Delta V}{\Delta p} = \frac{dV}{dp}$$

Používáme-li linearizované závislosti, bude platit:

$$C_H = \frac{d(A + B \cdot \Delta p)}{dp} = B$$

a pak:

$$K_{SH} = \frac{V_0}{C_H} = \frac{V_0}{B}$$

Hadice	Vztah	Koeficient A	Koeficient B	β_m	β_m [%]
OPTIMIT 8/17 PND 21/416 81 IX-1982	$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V_s = A \cdot \Delta p^B$	0,8433.10 ⁻⁶ 0,5969.10 ⁻⁶	0,1579.10 ⁻⁶ 0,5404	0,5853.10 ⁻⁷ 0,4372.10 ⁻⁷	4,6% 4,5%
OPTIMIT 10/21 PND 21/338 81 III-1982	$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V_s = A \cdot \Delta p^B$	0,4975.10 ⁻⁶ 0,4975.10 ⁻⁶ 0,4057.10 ⁻⁶	0,1671.10 ⁻⁶ 0,7328	0,3933.10 ⁻⁷ 0,2790.10 ⁻⁷	2,0% 1,5%
OPTIMIT 13/25 PND 21/340 81	$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V_s = A \cdot \Delta p^B$	0,4638.10 ⁻⁶ 0,3071.10 ⁻⁶	0,1180.10 ⁻⁶ 0,7386	0,4055.10 ⁻⁷ 0,3380.10 ⁻⁷	3,0% 2,5%
Js10 272 326 3 1021 10 PNT 628406	$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V_s = A \cdot \Delta p^B$	0,4088.10 ⁻⁵ 0,4088.10 ⁻⁵ 0,3886.10 ⁻⁵	0,1179.10 ⁻⁶ 0,1309	0,8778.10 ⁻⁷ 0,1535.10 ⁻⁶	2,5% 4,5%
Js10 272 326 011 020 OPTIMIT X.78	$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V_s = A \cdot \Delta p^B$	0,6433.10 ⁻⁵ 0,6433.10 ⁻⁵ 0,5167.10 ⁻⁵	0,3753.10 ⁻⁶ 0,2980	0,1024.10 ⁻⁶ 0,1079.10 ⁻⁶	1,0% 1,0%

Tab. VI - 4
Tab. VI - 3

Hadice	Vztah	Koeficient A	Koeficient B	ρ_m	ρ_m [%]
OPTIMIT 8/17 PND 21/416 81 IX-1982	$\Delta V = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	$0,8433 \cdot 10^{-6}$ $0,6394 \cdot 10^{-6}$	$0,1579 \cdot 10^{-6}$ $0,5873$	$0,5853 \cdot 10^{-7}$ $0,6073 \cdot 10^{-7}$	4,0% 4,0%
OPTIMIT 10/21 PND 21/338 81 III-1982	$\Delta V = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	$0,4975 \cdot 10^{-6}$ $0,4801 \cdot 10^{-6}$	$0,2428 \cdot 10^{-6}$ $0,7886$	$0,3393 \cdot 10^{-7}$ $0,3793 \cdot 10^{-7}$	1,5% 1,5%
OPTIMIT 13/25 PND 21/340 81	$\Delta V = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	$0,4638 \cdot 10^{-6}$ $0,3890 \cdot 10^{-6}$	$0,1980 \cdot 10^{-6}$ $0,8048$	$0,4055 \cdot 10^{-7}$ $0,2323 \cdot 10^{-7}$	2,0% 1,0%
Jsl0 272 326 3 1021 10 PNT 628406	$\Delta V = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	$0,4088 \cdot 10^{-5}$ $0,3970 \cdot 10^{-5}$	$0,1652 \cdot 10^{-6}$ $0,1568$	$0,8778 \cdot 10^{-7}$ $0,2280 \cdot 10^{-6}$	2,0% 4,0%
Jsl0 272 326 011 020 OPTIMIT X.78	$\Delta V = A + B \cdot \Delta p$ $\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	$0,6433 \cdot 10^{-5}$ $0,5243 \cdot 10^{-5}$	$0,4226 \cdot 10^{-6}$ $0,3096$	$0,1024 \cdot 10^{-6}$ $0,1438 \cdot 10^{-6}$	1,0% 1,5%

Tab. VI - 4

Zde koeficient B ve výrazu $\Delta V = A + B \cdot \Delta p$ přímo vyjadřuje kapacitu hadice a odtud lze vypočítat souhrnný modul pružnosti hadice. To ukazuje také že můžeme při vyšetřování vlastností hadice a zjišťování vlivu vlastností hadice na chování hydraulického mechanismu považovat kapacitu a souhrnný modul pružnosti hadice za konstantní, což činí chybu menší než 5% v intervalu (4 až 16) MPa. V tab. VI - 5 byly vyneseny hodnoty C_H a K_{SH} pro 5 naměřených hadic.

Hadice	C_H [$10^{-6} \cdot m^3 \cdot MPa^{-1}$]	V_0 [$10^{-6} \cdot m^3$]	K_{SH} [MPa]
OPTIMIT 8/17 PND 21/416 81 IX-1982	0,1579	62,8318	397,92
OPTIMIT 10/21 PND 21/338 81 III-1982	0,2428	125,6637	517,56
OPTIMIT 13/25 PND 21/340 81	0,198	132,7323	670,4
Jsl0 272 326 3 10 21 10 PNT 628406	0,1652	78,5398	475,42
Jsl0 272 326 011 020 OPTIMIT X.78	0,4226	78,5398	185,85

Tab. VI - 5

Všechny výsledky v kap. 6.1. byly získány pomocí experimentálního zjišťování objemových změn hadice měřením vyteklého množství kapaliny z hadice zatížené vnitřním přetlakem. Lze říci, že tato metoda dává dostatečně přesné výsledky, kterých se dá dobře používat při vyšetřování vlastností hadice a jejího vlivu na chování hydraulického mechanismu.

Nedostatek metody spočívá v tom, že někdy při měření dlouhých nebo hodně poddajných hadic je objem odměrného válce nedostačující. Rovněž odečítání objemu v milimetrech není

příliš vhodné. Proto by bylo výhodné převádět množství vyteklé kapaliny na elektrický signál. To by šlo realizovat např. pomocí indukčního snímače.

Množství nerozpuštěného vzduchu v kapalině ovlivňuje přesnost metody, musíme proto při měření vyloučit vzduch z kapaliny co nejlépe.

Měřením zjištěné hodnoty deformací nebudou přesně odpovídat skutečným hodnotám deformací při provozu hadice. Odchylka je způsobena montáží hadice při měření a proto při měření vzniká v hadici axiální složka napětí, která částečně ovlivňuje velikost deformací.

Kromě toho, tento způsob není vhodný při vyšetřování dynamických vlastností hadice nebo vyšetřování chování celého hydraulického systému, kde hadice je jeho součástí. V těchto případech dochází k velmi rychlé časové změně vnitřního přetlaku a nesmíme vypustit kapalinu z hadice. Proto by bylo vhodnější, kdybychom vyšetřovali a zjišťovali objemové změny hadice měřením vnějších geometrických parametrů hadice a odtud vypočítali vnitřní objemové změny hadice při vnitřním přetlaku.

S tímto cílem jdeme nejdříve k vyšetřování závislosti ΔV_s na vnitřních geometrických parametrech hadice.

6.2. Vyšetřování závislosti ΔV_s na geometrických parametrech hadice :

Podle vztahu (3-42) platí:

$$\Delta V_s = F(\rho_0, L, h, n, d, t, \mu_p, \Delta p)$$

To znamená, že ΔV_s je funkcí geometrických parametrů hadice (d a l) i parametrů konstrukčních a materiálových. Známe d a l hadice, Δp můžeme zjistit měřením. Ostatní parametry však obvykle nemáme k dispozici.

Odtud vyplývá otázka, jaká je závislost ΔV_s na parametrech d , l hadice, zda se z toho stanoví experimentální formule výpočtu ΔV_s . Dojdeme k vyšetřování této otázky použitím výsledků při stanovení exponenciální závislosti $\Delta V_s = A \cdot \Delta p^B$.

Získané výsledky uvedené v kap. 6.1.2. dávají regresní koeficienty, které platí pro určitý druh hadice o určitém rozměru.

Máme pro hadice HVT 272 326 OPTIMIT X.78 o různých průměrech a délkách koeficienty A a B, které jsou uvedeny v tab. VI - 6. /30/

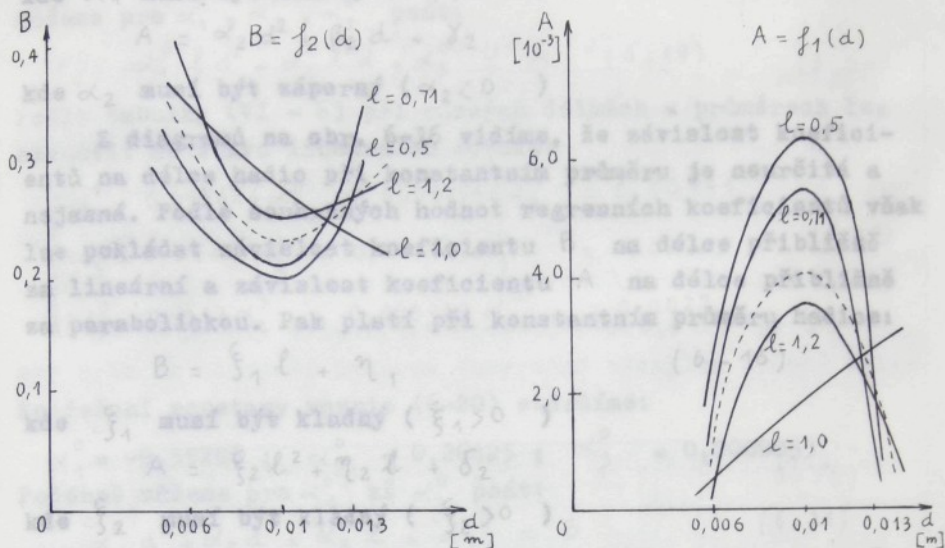
Průměr hadice m	koef.	dílní hodnoty regresních koeficientů			
		$l = 0,5m$	$l = 0,71m$	$l = 1,0m$	$l = 1,2m$
0,006	B	0,26	0,29	0,35	0,38
	A	$2,32 \cdot 10^{-3}$	$1,44 \cdot 10^{-3}$	$5,50 \cdot 10^{-4}$	$3,77 \cdot 10^{-4}$
0,01	B	0,20	0,21	0,28	0,25
	A	$6,43 \cdot 10^{-3}$	$5,55 \cdot 10^{-3}$	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$
0,013	B	0,26	0,30	0,24	0,27
	A	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$9,11 \cdot 10^{-4}$	$2,70 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-3}$

Tab. VI - 6

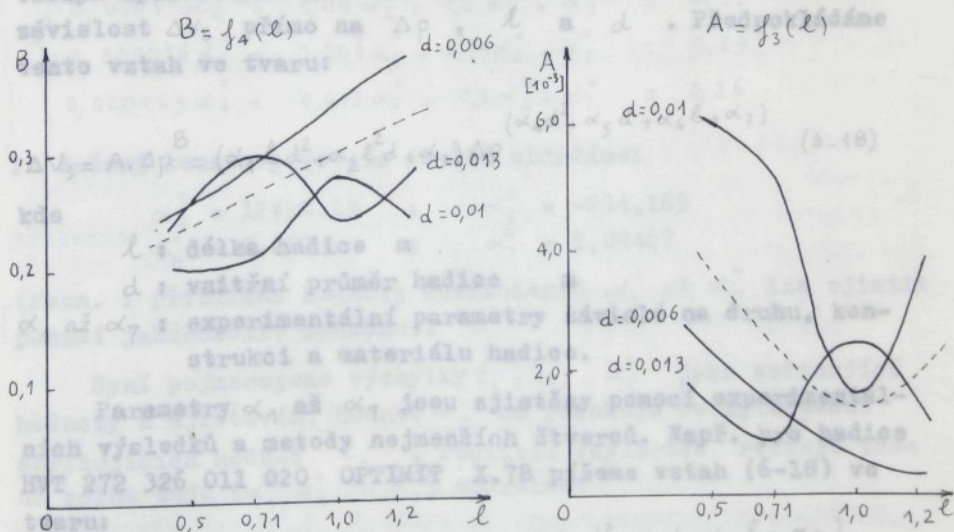
Z výsledků v tabulce vyplývá, že se koeficienty A a B mění v souvislosti na měně průměru a délky hadice. Jinak řečeno, můžeme A a B považovat za funkce průměru a délky hadice. Abychom zjistili závislosti A a B na rozměrech hadice, museli bychom z hodnot v tabulce nakreslit diagramy vyjadřující závislosti koeficientů na průměru hadice při určitých délkách a závislosti na délce při určitých průměrech. Diagramy $A = f_1(d)$ a $B = f_2(d)$ jsou nakresleny na obr. 6-15 a diagramy $A = f_3(l)$ a $B = f_4(l)$ na obr. 6-16.

Z diagramů na obr. 6-15 můžeme předpokládat, že lze při určitých délkách a v určitém intervalu průměrů přibližně považovat závislosti koeficientů A a B na průměru za parabolické:

$$B = \alpha_1 d^2 + \beta_1 d + \gamma_1 \quad (6-14)$$



Obr. 6 - 15



Obr. 6 - 16

kde α_1 musí být kladný ($\alpha_1 > 0$), $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ a α_7

$$A = \alpha_2 d^2 + \beta_2 d + \gamma_2$$

kde α_2 musí být záporný ($\alpha_2 < 0$)

Z diagramů na obr. 6-16 vidíme, že závislost koeficientů na délce hadice při konstantním průměru je neurčitá a nejasná. Podle souhrnných hodnot regresních koeficientů však lze pokládat závislost koeficientu B na délce přibližně za lineární a závislost koeficientu A na délce přibližně za parabolickou. Pak platí při konstantním průměru hadice:

$$B = \xi_1 l + \eta_1 \quad (6-16)$$

kde ξ_1 musí být kladný ($\xi_1 > 0$)

$$A = \xi_2 l^2 + \eta_2 l + \delta_2$$

kde ξ_2 musí být kladný ($\xi_2 > 0$)

Ve skutečnosti se vliv průměru a délky hadice na změnu objemu hadice (t.j. na koeficienty A a B) uplatňuje současně. Kombinací vlivu l a d na koeficienty a matematickým zpracováním lze odvodit všeobecný vzorec vyjadřující závislost ΔV_5 přímo na Δp , l a d . Předpokládáme tento vztah ve tvaru:

$$\Delta V_5 = A \cdot \Delta p^B = (\alpha_1 l d^2 + \alpha_2 l^2 d + \alpha_3) \Delta p^{(\alpha_4 d^2 + \alpha_5 d + \alpha_6 l + \alpha_7)} \quad (6-18)$$

kde

l : délka hadice m

d : vnitřní průměr hadice m

α_1 až α_7 : experimentální parametry závislé na druhu, konstrukci a materiálu hadice.

Parametry α_1 až α_7 jsou zjistěny pomocí experimentálních výsledků a metody nejmenších čtverců. Např. pro hadice HVT 272 326 011 020 OPTIMIT X.78 píšeme vztah (6-18) ve tvaru:

$$V = (\alpha_1 l d^2 + \alpha_2 l^2 d + \alpha_3) p^{(\alpha_4 d^2 + \alpha_5 d + \alpha_6 l + \alpha_7)} \quad (6-23)$$

Nejprve zjistíme přibližné hodnoty $\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0, \alpha_4^0, \alpha_5^0, \alpha_6^0$ a α_7^0 .
Můžeme pro $\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0$ psát:

$$\alpha_1^0 l d^2 + \alpha_2^0 l^2 d + \alpha_3^0 = A \quad (6-19)$$

Podle tabulky (VI - 6) při různých délkách a průměrech lze stanovit soustavu lineárních rovnic:

$$\begin{cases} \alpha_3^0 + 0,003024 \alpha_2^0 + 0,00002556 \alpha_1^0 = 0,00144 \\ \alpha_3^0 + 0,0144 \alpha_2^0 + 0,00012 \alpha_1^0 = 0,00355 \\ \alpha_3^0 + 0,013 \alpha_2^0 + 0,000169 \alpha_1^0 = 0,0027 \end{cases} \quad (6-20)$$

Po řešení soustavy rovnic (6-20) obdržíme:

$$\alpha_1^0 = -9,59286; \quad \alpha_2^0 = 0,26425; \quad \alpha_3^0 = 0,0008853$$

Podobně můžeme pro α_4^0 až α_7^0 psát:

$$\alpha_4^0 d^2 + \alpha_5^0 d + \alpha_6^0 l + \alpha_7^0 = B \quad (6-21)$$

Pak máme soustavu lineárních rovnic:

$$\begin{cases} 0,000036 \alpha_4^0 + 0,006 \alpha_5^0 + 1,0 \alpha_6^0 + \alpha_7^0 = 0,35 \\ 0,0001 \alpha_4^0 + 0,01 \alpha_5^0 + 1,2 \alpha_6^0 + \alpha_7^0 = 0,25 \\ 0,000036 \alpha_4^0 + 0,006 \alpha_5^0 + 0,71 \alpha_6^0 + \alpha_7^0 = 0,29 \\ 0,000169 \alpha_4^0 + 0,013 \alpha_5^0 + 0,5 \alpha_6^0 + \alpha_7^0 = 0,26 \end{cases} \quad (6-22)$$

Po řešení soustavy rovnic (6-22) obdržíme:

$$\begin{aligned} \alpha_4^0 &= 12426,19; & \alpha_5^0 &= -234,169 \\ \alpha_6^0 &= 0,207; & \alpha_7^0 &= 1,09467 \end{aligned}$$

(Pozn.: přibližné hodnoty koeficientů α_1^0 až α_7^0 lze zjistit pomocí jakéhokoli způsobu).

Nyní pojmenujeme výchylky $\varepsilon_i = \alpha_i - \alpha_i^0$ jako seřizující hodnoty a zjišťování hodnot α_i se redukuje na zjišťování seřizujících hodnot ε_i . Použitím Taylorova rozvoje těsně kolem bodu $(\alpha_1^0, \alpha_2^0, \dots, \alpha_7^0)$ obdržíme:

$$f(p, d, l; \alpha_1 \div \alpha_7) \approx f(p, d, l; \alpha_1^0 \div \alpha_7^0) + \sum_{i=1}^7 \frac{\partial f(p, d, l; \alpha_1^0 \div \alpha_7^0)}{\partial \alpha_i} \varepsilon_i \quad (6-23)$$

lze programovat a počítat na počítači. Hodnoty α_i lze počítat podle vztahu:

kde:

$$\varphi(p, d, l; \alpha_1 \dots \alpha_7) = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial f(p, d, l; \alpha_1^0 \dots \alpha_7^0)}{\partial \alpha_i} \varepsilon_i \quad (6-24)$$

Označíme-li:

$$V_i = v_i - f(p_i, d_i, l_i; \alpha_1^0 \dots \alpha_7^0) \quad (i = 1 \div n)$$

Pak bude platit:

$$V_i \approx \varphi(p_i, d_i, l_i; \alpha_1 \dots \alpha_7) \quad (i = 1 \div n) \quad (6-25)$$

Podle metody nejmenších čtverců zvolíme α_1 až α_7 tak, aby byla co nejmenší poměrná čtverečná odchylka určená vztahem:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [V_i - \varphi(p_i, d_i, l_i; \alpha_1 \dots \alpha_7)]^2} \quad (6-26)$$

Pomocí metody nejmenších čtverců obdržíme soustavu lineárních rovnic pro ε_1 až ε_7 ve tvaru:

$$\begin{cases} [f'_{\alpha_1}, f'_{\alpha_1}] \varepsilon_1 + [f'_{\alpha_1}, f'_{\alpha_2}] \varepsilon_2 + \dots + [f'_{\alpha_1}, f'_{\alpha_7}] \varepsilon_7 = [V, f'_{\alpha_1}] \\ [f'_{\alpha_2}, f'_{\alpha_1}] \varepsilon_1 + [f'_{\alpha_2}, f'_{\alpha_2}] \varepsilon_2 + \dots + [f'_{\alpha_2}, f'_{\alpha_7}] \varepsilon_7 = [V, f'_{\alpha_2}] \\ \dots \dots \dots \\ [f'_{\alpha_7}, f'_{\alpha_1}] \varepsilon_1 + [f'_{\alpha_7}, f'_{\alpha_2}] \varepsilon_2 + \dots + [f'_{\alpha_7}, f'_{\alpha_7}] \varepsilon_7 = [V, f'_{\alpha_7}] \end{cases} \quad (6-27)$$

přičemž:

$$[f'_{\alpha_n}, f'_{\alpha_s}] = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f(p_i, d_i, l_i; \alpha_1^0 \dots \alpha_7^0)}{\partial \alpha_n} \times \frac{\partial f(p_i, d_i, l_i; \alpha_1^0 \dots \alpha_7^0)}{\partial \alpha_s} \right] \quad (6-28)$$

$$[V, f'_{\alpha_n}] = \sum_{i=1}^n V_i \frac{\partial f(p_i, d_i, l_i; \alpha_1^0 \dots \alpha_7^0)}{\partial \alpha_n} \quad (6-29)$$

kde hodnoty v_i , p_i , d_i , l_i máme od experimentálních výsledků. Dosazením hodnot $[f'_{\alpha_n}, f'_{\alpha_s}]$ a $[V, f'_{\alpha_n}]$ do soustavy rovnic (6-27) a řešením této soustavy obdržíme hodnoty ε_1 až ε_7 . Tady můžeme programovat a počítat na počítači. Hodnoty α_i lze počítat podle vztahu:

$$\alpha_i = \alpha_i^0 + \varepsilon_i \quad (i=1 \div 7) \quad (6-30)$$

Vzorec (6-18) nám názorně dává závislost ΔV_5 na Δp , d a l . Je to obecný vzorec. Koefficienty α_3 a α_7 můžeme považovat za koefficienty vyjadřující závislost ΔV_5 na konstrukčních a materiálových parametrech hadice. Pro každý druh (sortiment) hadice se musí formulovat jednotlivý vzorec (způsob stanovení je totožný jako stanovení vzorce $\Delta V_5 = A \cdot \Delta p^B$ co do množství měření, jejich přesnost je stejná ale výpočet je složitější).

Nedostatek vzorce spočívá v tom, že stanovení a použití vzorce jsou náročná, komplikovaná a je nutno používat samostatného počítače.

Z uvedených vyšetřování vidíme, že objemová změna vedení je závislá na jeho geometrických parametrech. To znamená, že při změně vnitřního přetlaku dojde ke změně geometrických vnitřních i vnějších parametrů hadice. Z toho vzniká problém, zda můžeme objemovou změnu hadice zjistit proměřením geometrických vnějších parametrů hadice. V další kapitole se budeme tímto problémem zabývat.

6.3. Zjišťování objemových změn hadice proměřením geometrických parametrů hadice :

Z měření vyplývá, že při působení vnitřního přetlaku dochází ke změně průměru a délky hadice. Tyto změny závisí rovněž na konstrukci hadice, zejména na opletu či ovinutí kostry hadice. Jde nám o problém, jak zjistíme deformaci hadice pomocí měření změn geometrických parametrů, t.j. vnějšího průměru a délky hadice, jaký je vztah mezi změnami vnějšího a vnitřního objemu hadice a zda proměřením geometrických parametrů hadice vypočítáme a zjistíme kapacitní vlastnosti hadice.

V této kapitole bude ukázána a zhodnocena možnost měření objemových deformací hadicového vedení proměřením jeho geometrických parametrů, t.j. vnějšího průměru a délky. Změny vnějšího průměru a délky hadice naměřené při statickém zatížení hadice vnitřním přetlakem budou použity pro výpočet změny objemu hadice, resp. poměrné změny objemu.

6.3.1. Snímání změny vnějšího průměru a délky hadice - uspořádání měřicího zařízení :

Změna vnějšího průměru byla snímána pomocí indukčního snímače polohy IWT 102 (RFT Dresden) s talířkovým dotekem (IS2 na obr. 6-18), jehož celkové uspořádání je zřejmé z obr. (6-17a, b). Z uspořádání držáku snímače rovněž vyplývá, že je nutno měřenou výchylku Δy přepočíst na změnu průměru ΔD .

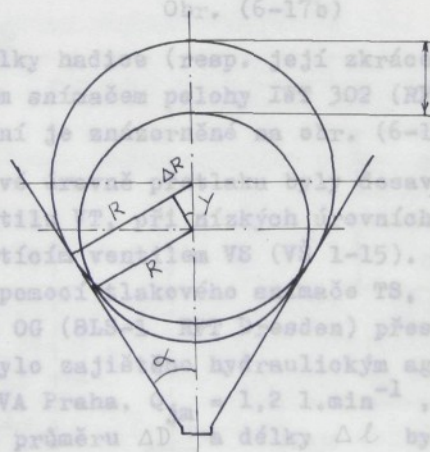
Přepočet výchylky Δy na změnu vnějšího průměru hadice ΔD provedeme dle obr. (6-17a). Změna měřená snímačem je dána změnou poloměru ΔR a posunutím středu kružnice y :

$$\Delta y = \Delta R + y \quad (6-31)$$

Posunutí středu kružnice y lze psát z obr. (6-17a) :

$$y = \Delta R \frac{1}{\sin \alpha} \quad (6-32)$$

Obr. (6-17a)



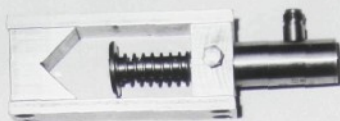
Obr. (6 - 17a)

Odtud lze vyjádřit změnu poloměru, resp. průměru hadice: při měření.

$$\Delta D = 2 \cdot \Delta R = 2 \frac{\Delta y}{1 + \frac{1}{\sin \alpha}} \quad (6-33)$$

6.3.2. Výpočet změny geometrického objemu hadice :

Pro úhel $\alpha = 45^\circ$ je $\sin \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2}$, pak změna průměru: metricky, t.j. vnější průměr $\Delta D = 0,828427 \cdot \Delta y$ včetně koncovek, se



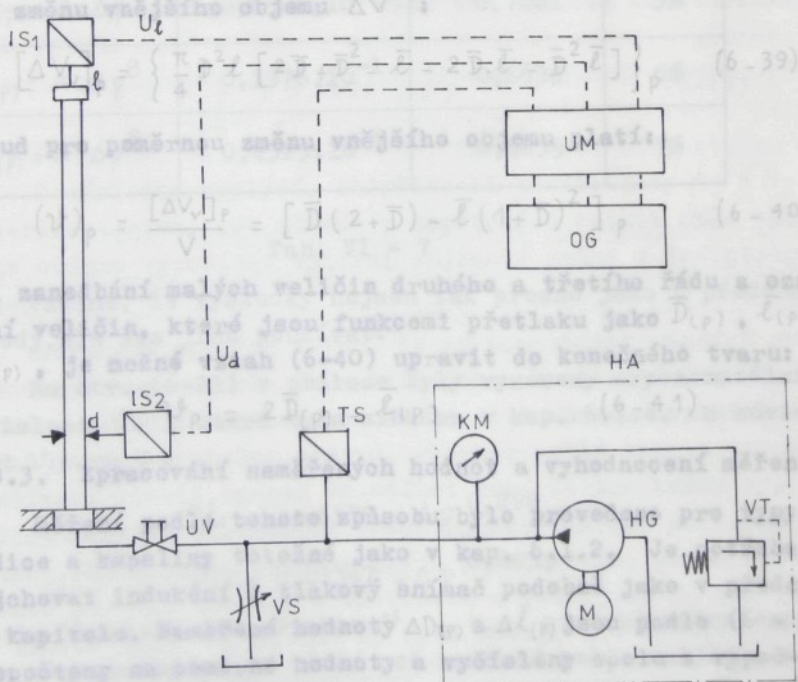
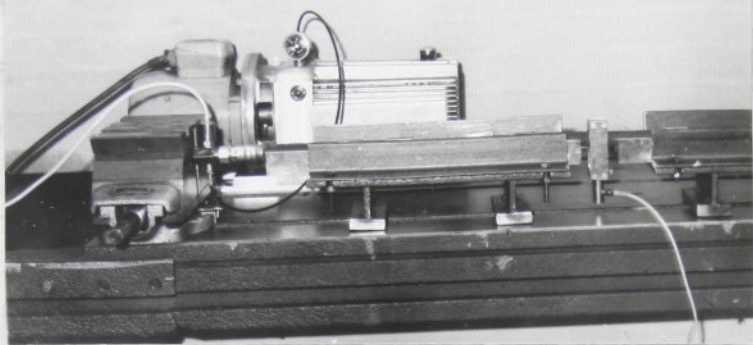
Obr. (6-17b)

Změna délky hadice (resp. její zkrácení Δl) byla snímána indukčním snímačem polohy IWT 302 (RFT Dresden). Celkové uspořádání je znázorněné na obr. (6-18).

Jednotlivé úrovně přetlaku byly dosavány nastavením tlakového ventilu VT, při nízkých úrovních přetlaku v kombinaci se škrťacím ventilem VS (VŠ 1-15). Přetlak v hadici byl odečítán pomocí tlakového snímače TS, který je připojen k oscilografu OG (8LS-1 RFT Dresden) přes můstek UM. Napájení obvodu bylo zajištěno hydraulickým agregátem HA (HA 1,2 - 200 INOVA Praha, $Q_{jm} = 1,2 \text{ l.min}^{-1}$, $p_{max} = 20 \text{ MPa}$). Hodnoty změny průměru ΔD a délky Δl byly zaznamenány pro každou úroveň zvoleného přetlaku ve dvou měřeních. Zánam hodnot ΔD a Δl byl proveden také na oscilografu OG. Hadice byla při měření položena ve vedení, které má tvar písmena "V" a proto zaručovalo její přímost a stabilitu při měření.

6.3.2. Výpočet změny geometrického objemu hadice :

Původní vnější objem hadice V , daný její geometrií, t.j. vnějším průměrem D a délkou l včetně koncovek, se



Обр. 6-18

při změně průměru ΔD a zkrácení hadice $\Delta \ell$ vlivem vnitřního přetlaku p zvětší o hodnotu ΔV . Pro objem hadice po deformaci platí:

$$[V + \Delta V]_p = \left[\frac{\pi}{4} (D + \Delta D)^2 (\ell - \Delta \ell) \right]_p$$

Po roznásobení a vytknutí hodnoty $\frac{\pi}{4} D^2 \ell = V$ obdržíme:

$$[V + \Delta V]_p = \left\{ \frac{\pi}{4} D^2 \ell \left[1 + 2 \left(\frac{\Delta D}{D} \right) + \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2 - \left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right) - 2 \left(\frac{\Delta D}{D} \right) \left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right) - \left(\frac{\Delta D}{D} \right)^2 \left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right) \right] \right\}_p \quad (6-36)$$

Označíme-li

$$\left(\frac{\Delta D}{D} \right)_p = \bar{D} \quad (6-37)$$

$$\left(\frac{\Delta \ell}{\ell} \right)_p = \bar{\ell} \quad (6-38)$$

kde: Vztah

$\bar{D}$: poměrná změna vnějšího průměru daná přetlakem p

$\bar{\ell}$: poměrná změna délky daná přetlakem p

pak po dosazení (6-37) a (6-38) do (6-36) obdržíme vztah pro změnu vnějšího objemu ΔV :

$$[\Delta V]_p = \left\{ \frac{\pi}{4} D^2 \ell [2\bar{D} + \bar{D}^2 - \bar{\ell} - 2\bar{D}\bar{\ell} - \bar{D}^2 \bar{\ell}] \right\}_p \quad (6-39)$$

Odkud pro poměrnou změnu vnějšího objemu platí:

$$(\nu)_p = \frac{[\Delta V]_p}{V} = [\bar{D}(2 + \bar{D}) - \bar{\ell}(1 + \bar{D})^2]_p \quad (6-40)$$

Při zanedbání malých veličin druhého a třetího řádu a označení veličin, které jsou funkcemi přetlaku jako $\bar{D}_{(p)}$, $\bar{\ell}_{(p)}$, $\nu_{(p)}$, je možné vztah (6-40) upravit do konečného tvaru:

$$\nu_p = 2\bar{D}_{(p)} - \bar{\ell}_{(p)} \quad (6-41)$$

6.3.3. Zpracování naměřených hodnot a vyhodnocení měření :

Měření podle tohoto způsobu bylo provedeno pro typy hadice a kapaliny totožné jako v kap. 6.1.2. Je potřeba cejchovat indukční a tlakový snímač podobně jako v předchozí kapitole. Naměřené hodnoty $\Delta D_{(p)}$ a $\Delta \ell_{(p)}$ jsou podle (6-37) přepočteny na poměrné hodnoty a vyčísleny spolu s výpočtenou poměrnou změnou objemu podle (6-41). Hodnoty $\bar{D}_{(p)}$, $\bar{\ell}_{(p)}$ a $\nu_{(p)}$ byly vyneseny v grafech (viz. obr. (6-20) až (6-23))

v příloze).

Přistoupíme k vyšetřování každé hadice.

1) Hadice Js10 272 326 011 020 OPTIMIT X.78 :

Vypočtené hodnoty z měření byly vyneseny na obr. (6-20) v příloze. Vidíme, že jejich průběh je obdobný jako průběh změny vnitřního objemu hadice (viz. kap. 6.1.). Odtud vyplývá, že je také možné vyjadřovat závislosti $\bar{D}_{(P)}$, $\bar{\ell}_{(P)}$ a $\bar{V}_{(P)}$ na přetlaku Δp náhradními exponenciálními závislostmi. Metodou nejmenších čtverců a pomocí programu výpočtu na počítači stejného jako v kap. 6.1.4. obdržíme výsledky v tab. VI - 7.

Vztah	Koeficient A	Koeficient B	$\beta_m[\%]$
$\bar{D}_{(P)} = A \cdot \Delta p^B$	$0,1144 \cdot 10^{-1}$	0,6684	4%
$\bar{\ell}_{(P)} = A \cdot \Delta p^B$	$0,8582 \cdot 10^{-2}$	0,7021	3%
$\bar{V}_{(P)} = A \cdot \Delta p^B$	$0,1376 \cdot 10^{-1}$	0,6639	8%
$\Delta V_{(P)} = A \cdot \Delta p^B$	$0,4323 \cdot 10^{-5}$	0,6639	7%

Tab. VI - 7

Vidíme, že výsledky nejsou tak přesné jako u předchozí metody, ale lze jich používat.

Na obr. (6-21) v příloze byly vyneseny exponenciální závislosti $\bar{V}_s$, která byla získána v kap. 6.1.4. a závislost $\bar{V}_{(P)}$ na Δp .

$$\bar{V}_s = 0,06579 \cdot \Delta p^{0,298}$$

$$\bar{V}_{(P)} = 0,01367 \cdot \Delta p^{0,6639}$$

Křivka $\bar{V}_{(P)}$ leží pod křivkou $\bar{V}_s$, t.j. poměrná změna vnitřního objemu hadice je větší než poměrná změna vnějšího objemu. Z toho nás zajímá, jaký je vztah mezi objemovou změnou vnitřní a vnější.

Máme vztahy:

$$V_s = A_1 \cdot \Delta p^{B_1}$$

$$V_{(P)} = A_2 \cdot \Delta p^{B_2}$$

Z toho vyplývá: V_s je malá (poměrná chyba při měření je kolem 15 až 20%). Z měřených hodnot metodou nejmenších čtverců lze tedy zjistit koeficienty A_1 a B_1 a A_2 a B_2 . Proto již nemůžeme, abychom provedli výpočty a hledali anebo: mezi objemovou změnou vnitřní a vnější.

$$V_s = V_{(P)} \cdot A_3 \cdot \Delta p^{B_3} \quad (6-42)$$

kde $A_3 = A_1/A_2$ a $B_3 = B_1 - B_2$

Výraz (6-42) dává vztah mezi poměrnou změnou vnitřního a vnějšího objemu hadice. To je zase exponenciální závislost.

U této hadice jsou velmi malé a výsledky měření jsou Použitím experimentálních hodnot a metodou nejmenších čtverců obdržíme pro hadici Jsl0 272 326 011 020 OPTIMITEE X.78 vztah: malé a jemné, proto je těžko zjistit přesně. Z

$$V_s = V_{(P)} \cdot 4,7812 \cdot \Delta p^{-0,3659} \quad (6-43)$$

($\beta_m = 0,1532 \cdot 10^{-6}$; $\beta_m [\%] = 1,5\%$)

Z výsledku vyplývá, obdržíme-li koeficienty A_3 a B_3 experimentantem, pak můžeme z naměřených hodnot změn vnějšího objemu vypočítat vnitřní objemové změny s dostatečnou přesností.

pro Návýhoda spočívá v tom, že se pro hadice různých geometrických parametrů, materiálových a konstrukčních vlastností vyskytují koeficienty A_3 a B_3 různé. Proto nemá vztah (6-43) skutečný význam. Abychom mohli tohoto vztahu používat, museli bychom to udělat tak, že pro každý typ hadice uděláme experiment oběma způsoby měření na hadicích o několika různých geometrických parametrech, potom vypočítáme střední hodnoty koeficientů a použijeme je pro hadice tohoto typu. Ta metoda by byla možná, ale vyvolá dosti velké množství experimentantů.

2) Hadice Jsl0 272 326 3 10 21 10PNT 628406 :

Podobně jako u hadice OPTIMIT obdržíme výsledky vypočtené z naměřených hodnot a vynesené na obr. (6-22) v příloze. Ve srovnání s výsledky u hadice OPTIMIT (obr. 6 - 20) vidíme, že změna objemu hadice PNT je menší zhruba dvakrát a přesnost měření je malá (poměrná chyba při měření je kolem 15 až 20%). Z měřených hodnot metodou nejmenších čtverců lze taky zjistit náhradní exponenciální závislosti $V_{(P)}$, $\bar{D}_{(P)}$ a $\bar{L}_{(P)}$ na Δp , ale poměrné chyby dosahují až (18+20)%. Proto již nemá význam, abychom provedli výpočty a hledali vztah mezi objemovou změnou vnitřní a vnější.

3) Hadice OPTIMIT 10/21 PND 21/338-81 III-1982 :

Vypočtené výsledky z naměřených hodnot pro tuto hadici byly vyneseny na obr. (6-23) v příloze.

Změny vnějšího průměru a délky, t.j. obecně vnější deformace u této hadice jsou velmi malé a výsledky měření jsou nepřesné. Používalo se zařízení měření dávacího velkou přesností, ale deformace vnějšího průměru a délky hadice jsou příliš malé a jemné, proto je těžko zjistit přesně. Z experimentálních křivek ani nemůžeme náhradné exponenciální závislosti přibližně formulovat, tedy nelze vyhledat vztah mezi deformací vnitřní a vnější, který dává dostatečnou a uživatelnou přesnost.

Ze všech výsledků v této kapitole lze předběžně udělat závěr, že se dá metoda zjišťování objemových změn hadice proměřením geometrických parametrů (vnějších) uplatnit jen pro hadice přízovým opletem, obecně pro hadice mající dostatečně velkou vnější deformaci. Měření u hadic s drátovým opletem, které mají velmi malé vnější deformace, nedává přesné výsledky proto, že při měření vnější deformace hadice má její konstrukce značnější a složitější vliv na měřené hodnoty než u měření vnitřních deformací, což způsobuje nepřesnost měření.

Potřebujeme vyhledat způsob, který nám umožňuje odstranit nebo omezit nedostatek metody měření vnějších geometrických parametrů a dává dostatečně přesné výsledky, současně umožňuje vyšetřovat i dynamické vlastnosti hadice a

jejich vliv na chování celého hydraulického mechanismu, t. zn. nemusíme při měření vypustit kapalinu z měřené hadice. Přistoupíme k vyšetřování deformace hadice souvislým měřením

6.4. Zjišťování objemových změn hadice souvislým měřením :

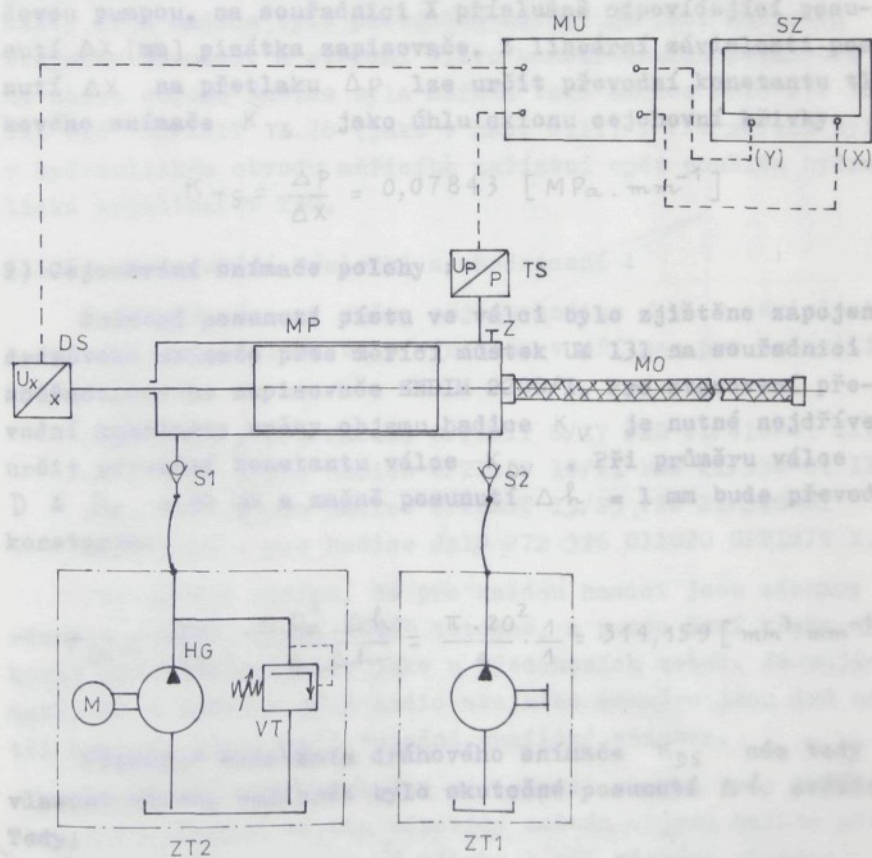
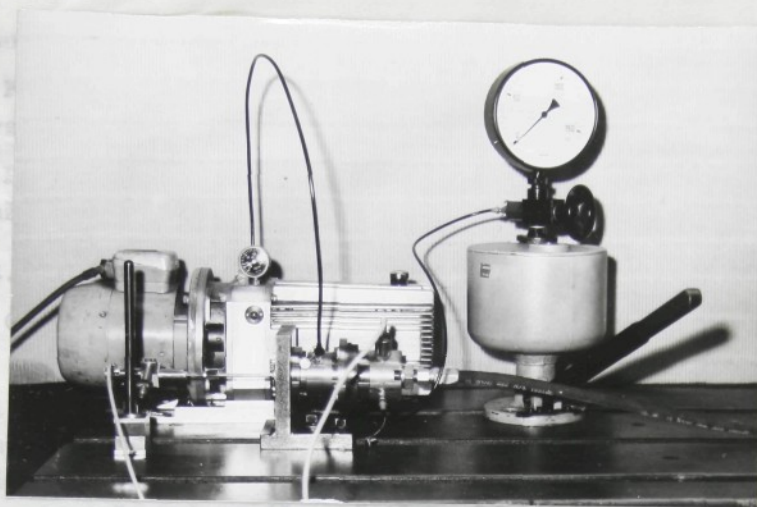
Jak bylo ukázáno, zjišťování objemových změn hadice měření vytekklého množství kapaliny z hadice zatížené vnitřním přetlakem není výhodné v případě, kdy nemůžeme vypustit kapalinu z hadice, např. při vyšetřování dynamických vlastností hadice nebo vyšetřování vlivu vlastností hadice na chování celého hydraulického mechanismu. Kromě toho, tímto způsobem lze zjišťovat objemové změny hadice jenom při snižování přetlaku v hadici.

V této kapitole se budeme zabývat zjišťováním objemových změn hadice souvislým měřením, které umožňuje vyšetřovat objemové změny hadice i při stlačování. Princip metody je znázorněn na obr. (6-24).

Hlavní částí měřicího zařízení je měřicí přípravek MP, t.j. válec a lapovaný píst o známém průměru D_p , (jeho konstrukce je znázorněna na výkresu ~~8~~-(VI-01) v příloze). Na pravou stranu válce je připojen zdroj tlaku ZT1 (ruční zkoušečka trysek spalovacích motorů - n.p. MOTORPAL JIHLAVA), který se používá k naplnění měřeného objektu MO (hadice). Na levou stranu je připojen zdroj tlaku ZT2 (HA 1,2 - 200 - np. INOVA PRAHA), který se skládá z hydrogenerátoru HG poháněného elektrickým motorem M. K odvodu vzduchu je použita zátká Z. Na válec je připojen pro snímání úrovně tlaku tenzometrický tlakový snímač TS (TT 160 - np. ZPA JINOVICE) spojený dále s můstkem MU (UM 131 - RFT - NDR) a napojený na souřadnici X u souřadnicového zapisovače SZ (ENDIM 2200/I NDR). Snímání posunutí pístu je zajištěno drahovým snímačem DS (IWT 302-RFT-NDR), který je připojen na píst a dále spojen přes můstek MU na souřadnici Y zapisovače SZ.

Postup měření :

1. Naplníme hadici MO ve svislé poloze zdrojem tlaku ZT1
2. Vyčkáme, až se obvod co nejlépe odvodu vzduchu, a lehce za-



Obr. 6.24

šroubujeme zátku na konci hadice

3. Porovnáme hadici, doplníme ruční pumpou. Po dokonalém odvzdušnění uzavřeme zátku Z a šroub na konci hadice

4. Provedeme měření při stoupání a klesání přetlaku ve válci použitím zdroje tlaku ZT2.

6.4.1. Vlastní měření :

1) Cejchování snímače tlaku : $10^{-7} [m^3 \cdot mm^{-1}]$

Pro snímání úrovně vnitřního přetlaku v měřené hadici byl použit tenzometrický tlakový snímač TT 160. Při cejchování byl tlakový snímač připojen na přesnou laboratorní závažovou pumpu ZT 300 (MIKROTECHNA - MODŘANY). Na souřadnici Y zapisovače byl vynášen přetlak Δp [MPa] vyvozený závažovou pumpou, na souřadnici X příslušně odpovídající posunutí ΔX [mm] pisátka zapisovače. Z lineární závislosti posunutí ΔX na přetlaku Δp lze určit převodní konstantu tlakového snímače K_{TS} jako úhlu sklonu cejchovní křivky:

$$K_{TS} = \frac{\Delta p}{\Delta X} = 0,07843 [MPa \cdot mm^{-1}]$$

2) Cejchování snímače polohy :

Snímání posunutí pístu ve válci bylo zjištěno zapojením dráhového snímače přes měřicí můstek UM 131 na souřadnici Y souřadnicového zapisovače ENDIM 2200/I. Pro stanovení převodní konstanty změny objemu hadice K_V je nutné nejdříve určit převodní konstantu válce K_{OV} . Při průměru válce $D \approx D_p = 20$ mm a změně posunutí $\Delta h = 1$ mm bude převodní konstanta:

$$K_{OV} = \frac{\Delta V}{\Delta h} = \frac{\pi \cdot D_p^2 \cdot \Delta h}{4 \cdot \Delta h} = \frac{\pi \cdot 20^2 \cdot 1}{4 \cdot 1} = 314,159 [mm^3 \cdot mm^{-1}]$$

Převodní konstanta dráhového snímače K_{DS} nám tedy vlastně udává, kolikrát bylo skutečné posunutí Δh zvětšeno. Tedy: 6-29. Spodní křivka odpovídá změně objemu hadice při stoupání přetlaku a horní křivka - při klesání přetlaku.

$$K_{Ds} = \frac{\Delta V}{\Delta h} = \frac{71}{10} = 7,1 \text{ [mm} \cdot \text{mm}^{-1}]$$

Výsledná převodní konstanta změny objemu hadice K_V odpovídající posunutí písátka o 1 mm bude:

$$K_V = \frac{\Delta V}{\Delta Y} = \frac{K_{OV}}{K_{Ds}} = \frac{314,159}{7,1} \text{ [mm}^3 \cdot \text{mm}^{-1}]$$

$$K_V = 0,4425 \cdot 10^{-7} \text{ [m}^3 \cdot \text{mm}^{-1}]$$

Ke zpracování naměřených výsledků používáme středních hodnot z naměřených záznamů. Metodika a postup výpočtů jsou stejné jako v kapitole 6.1.4. Používáme před-

Pro ověření metody byly proměřeny tři druhy hadice PND, které již byly naměřeny metodou v kap. 6.1. Jako dříve pro každý druh hadice byla prováděna měření na pěti hadicích stejného rozměru. K ověření vlivu konstrukčních parametrů na změnu objemu hadice byla měřena také hadice Js10 272 326 011 020 OPTIMIT X.78 (jako v kap. 6.1.). Při měření byla v hydraulickém obvodu měřicího zařízení opět použita hydraulická kapalina OT T3C.

6.4.2. Zpracování výsledků a zhodnocení :

Grafické záznamy změny objemu hadice ΔV v závislosti na působícím přetlaku byly vyneseny v příloze pro jednotlivé hadice:

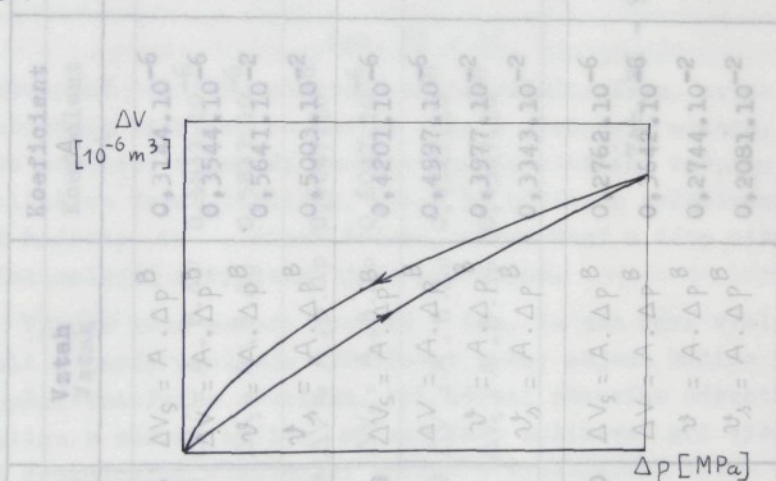
- Obr. 6-25 : pro hadice OPTIMIT 8/17 PND 21/416-81 IX.82
- obr. 6-26 : pro hadice OPTIMIT 10/21 PND 21/338-81 III.82
- obr. 6-27 : pro hadice OPTIMIT 13/25 PND 21/340-81
- obr. 6-28 : pro hadice Js10 272 326 011020 OPTIMIT X.78

Při měření vidíme, že pro každou hadici jsou záznamy různých pokusů měření téměř totožné, a proto není třeba opakovat měření několikrát jako u předchozích metod. Je zajímavé, že z každých pěti hadic stejného rozměru jsou dvě nebo tři hadice, které mají totožné grafické záznamy.

V grafech mají skutečné závislosti zhruba tvar daný na obr. 6-29. Spodní křivka odpovídá změnám objemu hadice při stoupání přetlaku a horní křivka - při klesání přetlaku.

Rozdíl mezi nimi se dá vysvětlit deformační hysteresí hadice: změna objemu hadice při stoupajícím přetlaku nedosahuje okamžitě hodnoty změny objemu odpovídající okamžitému přetlaku, ale je vždy menší. Proti tomu, při klesajícím přetlaku je okamžitá změna objemu hadice vždy větší. To vyjadřuje konstrukční a materiálové vlastnosti hadice. Z výsledků měření pro hadice PND a OPTIMIT lze předběžně vyvodit, že u hadice s přízovým opletem je tento rozdíl výraznější než u hadice s drátovým opletem.

Ke zpracování naměřených výsledků používáme středních hodnot získaných z grafických záznamů. Metodika a postup výpočtu jsou stejné jako v kapitole 6.1.4. Používáme předchozího programu výpočtu a pomocí počítače EC 1033 obdržíme závislosti ΔV , ΔV_5 , v , v_5 na Δp a hodnoty C_H , K_{SH} uvedené postupně v tab. VI - 8, VI - 9 a VI - 10.



Obr. 6 - 29

Chyba při výpočtu je poměrně malá (zhruba $3 + 8\%$). Ve srovnání s výsledky v kap. 6.1.4. je chyba větší. Příčina spočívá v tom, že tady se počítá se středními hodnotami při stoupání a snížení přetlaku, zatímco v kap. 6.1.4. se počítal jenom při snížení přetlaku.

Vidíme, že změny objemu získané tímto způsobem jsou vždy menší než hodnoty získané v kap. 6.1.4. Při měření

Hadice Hadice	Vztah Vztah	Koeficient Koeficient A	Koeficient Koeficient B	β_m	β_m [%]
OPTIMIT 8/17 PND 21/416 OPTIMIT 8/17 PND 21/416 81 IX-1982 IX-1982	$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$	$0,3144 \cdot 10^{-6}$	0,7359	$0,1329 \cdot 10^{-6}$	7,6%
	$\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	$0,3544 \cdot 10^{-6}$	0,7713	$0,1297 \cdot 10^{-6}$	6,2%
	$v = A \cdot \Delta p^B$	$0,5641 \cdot 10^{-2}$	0,7713	$0,2065 \cdot 10^{-2}$	6,2%
	$v_s = A \cdot \Delta p^B$	$0,5003 \cdot 10^{-2}$	0,7359	$0,2116 \cdot 10^{-2}$	7,6%
OPTIMIT 10/21 PND 21/338 OPTIMIT 10/21 PND 21/338 81 III-1982	$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$	$0,4201 \cdot 10^{-6}$	0,6711	$0,1215 \cdot 10^{-6}$	6,1%
	$\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	$0,4997 \cdot 10^{-6}$	0,7374	$0,1243 \cdot 10^{-6}$	4,6%
	$v = A \cdot \Delta p^B$	$0,3977 \cdot 10^{-2}$	0,7374	$0,9893 \cdot 10^{-3}$	4,6%
	$v_s = A \cdot \Delta p^B$	$0,3343 \cdot 10^{-2}$	0,6711	$0,9665 \cdot 10^{-3}$	6,1%
OPTIMIT 13/25 PND 21/340 OPTIMIT 13/25 PND 21/340 81	$\Delta V_S = A \cdot \Delta p^B$	$0,2762 \cdot 10^{-6}$	0,7674	$0,1334 \cdot 10^{-6}$	7,9%
	$\Delta V = A \cdot \Delta p^B$	$0,3642 \cdot 10^{-6}$	0,8222	$0,1310 \cdot 10^{-6}$	5,4%
	$v = A \cdot \Delta p^B$	$0,2744 \cdot 10^{-2}$	0,8222	$0,9867 \cdot 10^{-3}$	5,4%
	$v_s = A \cdot \Delta p^B$	$0,2081 \cdot 10^{-2}$	0,7674	$0,1005 \cdot 10^{-2}$	7,9%

Tab. VI - 8

Hadice	Vztah	Koeficient A	Koeficient B	ρ_m	ρ_m [%]
OPTIMIT 8/17 PND 21/416 IX-1982 81	$\Delta V = A + B \cdot \Delta p$	$0,5833 \cdot 10^{-6}$	$0,1477 \cdot 10^{-6}$	$0,1093 \cdot 10^{-6}$	3,3%
	$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$	$0,5833 \cdot 10^{-6}$	$0,1098 \cdot 10^{-6}$	$0,1093 \cdot 10^{-6}$	3,9%
OPTIMIT 10/21 PND 21/338 III-1982	$\Delta V = A + B \cdot \Delta p$	$0,6047 \cdot 10^{-6}$	$0,2096 \cdot 10^{-6}$	$0,1043 \cdot 10^{-6}$	3,9%
	$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$	$0,6047 \cdot 10^{-6}$	$0,1339 \cdot 10^{-6}$	$0,1043 \cdot 10^{-6}$	5,2%
OPTIMIT 13/25 PND 21/340 81	$\Delta V = A + B \cdot \Delta p$	$0,4327 \cdot 10^{-6}$	$0,1967 \cdot 10^{-6}$	$0,1225 \cdot 10^{-6}$	5,0%
	$\Delta V_s = A + B \cdot \Delta p$	$0,4327 \cdot 10^{-6}$	$0,1168 \cdot 10^{-6}$	$0,1225 \cdot 10^{-6}$	7,3%

Tab. VI - 9

Hadice	C_H [$10^{-6} \text{ m}^3 \text{ MPa}^{-1}$]	V_0 [10^{-6} m^3]	K_{SH} [MPa]
OPTIMIT 8/17 PND	0,1477	62,8318	425,4015
OPTIMIT 10/21 PND	0,2096	125,6637	559,5405
OPTIMIT 13/25 PND	0,1967	132,7323	674,7956

Tab. VI - 10

je stoupání přetlaku působené zatlačováním pístu, avšak ne vtlačováním kapaliny do hadice jako v předchozí metodě, a proto nepůsobí stoupání množství nerozpuštěného vzduchu v kapalině ve formě bublinek, které je příčinou zvětšování získané hodnoty ΔV . Jinak řečeno, odvzdušení u této metody je dokonalejší a výsledky jsou přesnější.

Výhoda této metody spočívá v tom, že nám dává výsledky rychle a navíc umožňuje vyšetřovat změny objemu hadice i při stoupání vnitřního přetlaku. Při měření nemusíme odpustit kapalinu z měřené hadice, můžeme tedy aplikovat při vyšetřování dynamických vlastností hadice a vyšetřování vlivu hadice na chování celého hydraulického mechanismu. Tato metoda umožňuje dosáhnout automatizace měření a zjišťování výsledků. Je-li na můstek připojen navíc nějaký elektrický číslicový zapisovač, obdržíme současně grafický záznam i číslicové hodnoty měření, které dodáváme do programu výpočtu a pomocí samočinného počítače zjistíme výsledky rychle.

Měřicí schopnost zařízení je závislá na průměru pístu a rozsahu snímače dráhy DS ($\pm 10 \text{ mm}$). Zvětšením průměru pístu a válce můžeme rozšířit schopnost měření zařízení. Např.

v našem případě, pístem o průměru 20 mm můžeme pro hadici Jslo 272 326 011 020 OPTIMIT X-78 (l = 1,0 m) měřit jenom do přetlaku kolem 10 MPa. Kdyby bylo nutno naměřit do tlaku 16 MPa, bylo by potřeba používat pístu a válce o průměru 30 mm.

Již jsme teoreticko-experimentálně vyšetřovali objemové změny hadice různými metodami. V další kapitole přistoupíme k rozboru chyb metodiky při vyšetřování objemových změn hadicového vedení.

6.5. Rozbor chyb metodiky vyšetřování objemových změn hadicového vedení :

Hadicové vedení vykazuje nelineární závislost objemových změn působených deformací stěn hadice na působícím vnitřním přetlaku. Nelze tedy pro určení objemových změn hadicového vedení užít vztahy obdobné vztahu pro vedení tvořené ocelovou tenkostěnnou trubkou. Podle vztahu (5-20) můžeme pro poměrnou objemovou změnu takového vedení psát:

$$\nu = \frac{\Delta V}{V_0} = \left(\frac{1}{K} + \frac{d}{E \cdot s} \right) \cdot p \quad (6-47)$$

Dosažením tohoto vztahu do (3-3) dostaneme:

Pro hadicové vedení lze pro poměrnou objemovou změnu vedení psát:

$$\nu = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{p}{K} + \nu_H(p) \quad (6-48)$$

kde $\nu_H(p)$ je poměrná objemová změna způsobená pouze deformací stěn hadice.

Poměrná objemová změna stěn hadice bude kromě působícího vnitřního přetlaku záviset rovněž na daných materiálových a konstrukčních parametrech hadice. Podle dosavadních zkušeností a výsledků se vyjadřuje obecnou exponenciální závislostí (viz. kap. 6.1.) při aproximaci naměřených hodnot metodou nejmenších čtverců:

$$\nu_H(p) = \frac{\Delta V_s}{V_0} = \frac{1}{V_0} \cdot A \cdot p^\beta$$

Vyšetření objemových změn hadicového vedení není tedy jednoduché. Praktické metody vycházejí z měření absolutní objemové změny vedení ΔV , která je dána součtem absolutních objemových změn kapaliny ΔV_K a stěn hadice ΔV_H , t.j. podle (3-3):

$$\Delta V = \Delta V_K + \Delta V_H \quad (6-53)$$

Po vydělení rovnice geometrickým objemem vedení při atmosférickém tlaku (V_0) lze pro poměrnou objemovou změnu psát:

$$v = v_K + v_H \quad (6-49)$$

Poměrnou objemovou změnu stěn hadice lze určit odečtením poměrné objemové změny kapaliny v_K od celkové poměrné objemové změny vedení v .

Víme, že objemová změna kapaliny, resp. její stlačitelnost, závisí kromě působícího tlaku p a modulu pružnosti K ještě na skutečném, t.j. okamžitém objemu kapaliny, takže ve vztahu (3-3) bude pro ΔV_K platit:

$$\Delta V_K = (V_0 + \Delta V_H) \cdot \frac{p}{K} \quad (6-50)$$

Dosazením tohoto vztahu do (3-3) dostaneme:

$$\Delta V = V_0 \frac{p}{K} + \Delta V_H \left(\frac{p}{K} + 1 \right) \quad (6-51)$$

Pro poměrnou objemovou změnu platí: $v = \frac{\Delta V}{V_0}$, bude relativní chyba metody δv řádově pod 10^{-2} , t.j. nepřekročí 1%.

$$v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{p}{K} + \left(1 + \frac{p}{K} \right) v_H \quad (6-52)$$

Odkud bude poměrná objemová změna stěn hadice:

$$v_H = \frac{v - \frac{p}{K}}{1 + \frac{p}{K}} \quad (6-53)$$

Z odměřené celkové objemové změny vypočteme tedy poměrnou objemovou změnu stěn hadice podle (6-53) nejpřesněji.

Metoda používaná dosud při vyšetřování kapacitních

vlastností hadicového vedení byla založena na určování poměrné objemové změny stěny hadice z celkové poměrné objemové změny odečítáním poměrné objemové změny kapaliny, určené ovšem z geometrického objemu vedení při atmosférickém tlaku. Jaké chyby se dopustíme při této metodě oproti přesnému určení, jehož výsledkem je vztah (6-53) ?

Zde pro stlačitelnost kapaliny platí:

$${}^1\Delta V_K = V_0 \cdot \frac{P}{K} \quad (6-54)$$

pro poměrnou objemovou změnu kapaliny bude:

$${}^1v_K = \frac{{}^1\Delta V_K}{V_0} = \frac{P}{K} \quad (6-55)$$

Ze vztahu (6-55) bud' pro celkovou poměrnou objemovou změnu hadice platí: poměrná objemová změna stěny hadice pak dosazením (6-55) do (6-49) bude:

$${}^1v_H = v - \frac{P}{K} \quad (6-56)$$

Pro relativní chybu této metody užitím vztahů (6-53) a (6-56) platí:

$${}^1\varepsilon = \frac{{}^1v_H - v_H}{v_H} = \frac{P}{K} \quad (6-57)$$

V našem případě, kdy měřený rozsah tlaku je $P \in \langle 0,16 \rangle$ MPa a modul pružnosti kapaliny lze vzít $K = 1,66 \cdot 10^3$ MPa (jeho závislost na tlaku lze zanedbat /16/), bude relativní chyba metody ${}^1\varepsilon$ řádově pod 10^{-2} , t.j. nepřekročí 1%.

Zkusme dále zanedbat stlačitelnost kapaliny zcela. Naměřenou objemovou změnu vedení přisoudíme tedy deformaci stěny hadice:

$$\Delta V = {}^2\Delta V_H \quad (6-58)$$

Pro poměrnou objemovou změnu hadice zde platí:

$${}^2v_H = v \quad (6-59)$$

Vypočteme relativní chybu této velmi zjednodušené metody použitím vztahů (6-59) a (6-53) :

$$^2\varepsilon = \frac{^2v_H - v_H}{v_H} = \frac{P}{K} \cdot \frac{v+1}{v - \frac{P}{K}} = ^1\varepsilon \cdot \frac{v+1}{v - \frac{P}{K}} \quad (6-60)$$

Vyjádříme relativní chybu $^2\varepsilon$ jako A - násobek relativní chyby $^1\varepsilon = \frac{P}{K}$:

$$^2\varepsilon = \frac{P}{K} \cdot \frac{v+1}{v - \frac{P}{K}} = \frac{P}{K} \cdot A \quad (6-61)$$

Odtud vyplývá rovnost:

$$\frac{v+1}{v - \frac{P}{K}} = A \quad (6-62)$$

Ze vztahu (6-62) bude pro celkovou poměrnou objemovou změnu hadice platit:

$$v = \frac{A \cdot \frac{P}{K} + 1}{A - 1} \quad (6-63)$$

Poměr $\frac{P}{K}$, jak bylo dříve uvedeno (platí pro $P = 16 \text{ MPa}$), je přibližně roven $10^{-2} = 1\%$. Konstanta A nám tedy dle (6-61) přímo udává relativní chybu v %. Celkové poměrné objemové změny vedení odpovídající různým chybám, daným konstantou A , jsou vypočteny v tab. VI - 8.

$A \approx ^2\varepsilon [\%]$	1	2	4	6	8	10	15	20
$v [1]$	∞	1,02	0,317	0,212	0,154	0,122	0,082	0,036

Tab. VI - 8

Z tabulkových hodnot celkové poměrné objemové změny v je zřejmé, že u hadice s přízovým opletem, kde celková poměrná objemová změna v dosahuje asi 15%, by poměrná chyba neměla překročit 10%. U hadice s ocelovým opletem však dochází k menším deformacím a stlačitelnost kapaliny u nich lze zanedbat na úkor větší nepřesnosti metody měření.

7. Již bylo provedeno vyšetřování vlastností hadice. Je jasné, že vlastnosti hadice závisí na její parametrech geometrických, konstrukčních, materiálových i výrobních. V další kapitole nás zajímá, na jaké míře se chování celého hydraulického obvodu ovlivňuje vlastnostmi hadice, zejména kapacitními. Přistoupíme k vyšetřování vlivu hadice na chování hydraulického mechanismu.
motoru, hydromotoru a celého mechanismu, a také na parametry kmitání v obvodu. Deformace určují velikost a charakter znečištění namáhání ústrojí mechanismu, vliv zatížení na rychlost motoru proto, že dynamické charakteristiky mechanismu závisí na jeho tuhosti.

Kvůli vlastním charakterům hadice, zejména značně větší deformaci u hadice než u trubky, má hadice značný vliv na chování, konkrétně na přesnost, tuhost i na dynamické vlastnosti hydraulického mechanismu.

V této kapitole budeme zkoumat, jaký je vliv hadice na chování hydraulického mechanismu. Abychom zjistili vliv hadice, vyšetřovali bychom nejjednodušší obvod znázorněný na obr. 7-1. Protože a podstatné podmínky řešení úloh můžeme shrnout takto:

1/ hydrostatický mechanismus SPK uvažujeme jako součást kombinovaného mechanismu. Účinek hnací části a hnané části mechanismu na "hydraulický člen" respektujeme redukovánými hmotami a silami na píst generátoru a motoru. Pohybující se hmotnosti považujeme za konstantní a odpovídají základní poloze pístu motoru a generátoru,

2/ dynamické parametry vyjadřujeme pomocí odporů proti přenosu tlakové energie, t.j. odporu proti pohybu R , odporu proti zrychlení M (hydraulické indukčnosti), odporu proti deformaci D (jehož převrácenou hodnotou je hydraulická kapacita C). Objemové stráty postihneme syrovým odporem R_s či syrovou propustností G_s . Hydraulické kapacity považujeme za konstantní. Odpory R a R_s jsou lineární,

3/ podmínky proudění kapaliny (oleje) považujeme za izotermické,

7. VLIV HADICE NA CHOVÁNÍ HYDRAULICKÉHO MECHANISMU :

Vedení, jak bylo řečeno výše, je jedna z součástí hydraulického mechanismu a jeho vlastnosti ovlivňují chování celého mechanismu. Pružné deformace vedení (obsahujícího kapalinu a stěny vedení) mají vliv množství kapaliny protékající hydromechanismem, na dynamické charakteristiky generátoru, hydromotoru a celého mechanismu, a také na parametry kmitání v obvodu. Deformace určují velikost a charakter změn namáhání ústrojí mechanismu, vliv zatížení na rychlost motoru proto, že dynamické charakteristiky mechanismu závisí na jeho tuhosti.

Kvůli vlastním charakterům hadice, zejména značně větší deformaci u hadice než u trubky, má hadice značný vliv na chování, konkrétně na přesnost, tuhost i na dynamické vlastnosti hydraulického mechanismu.

V této kapitole budeme zkoumat, jaký je vliv hadice na chování hydraulického mechanismu. Abychom zjistili vliv hadice, vyšetřovali bychom nejjednodušší obvod znázorněný na obr. 7-1. Formu a podstatné podmínky řešení úloh můžeme shrnout takto:

1/ hydrostatický mechanismus SPK uvažujeme jako součást kombinovaného mechanismu. Účinek hnací části a hnané části mechanismu na "hydraulický člen" respektujeme redukovánými hmotami a silami na píst generátoru a motoru. Pohybující se hmotnosti považujeme za konstantní a odpovídají základní poloze pístu motoru a generátoru,

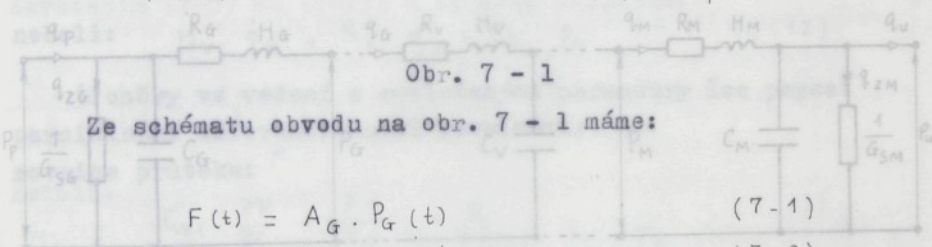
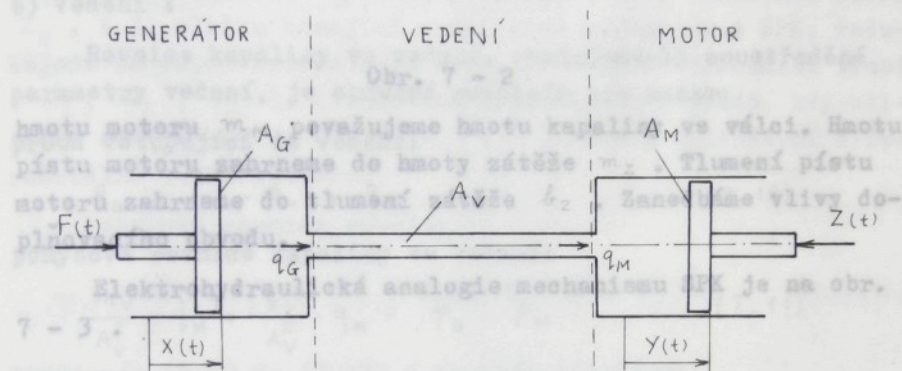
2/ dynamické parametry vyjadřujeme pomocí odporů proti přenosu tlakové energie, t.zn. odporu proti pohybu R , odporu proti zrychlení H (hydraulické indukčnosti), odporu proti deformaci D (jehož převrácenou hodnotou je hydraulická kapacita C). Objemové ztráty postihneme svodovým odporem R_s či svodovou propustností G_s . Hydraulické kapacity považujeme za konstantní. Odpory R a R_s jsou lineari- zované,

3/ podmínky proudění kapaliny (oleje) považujeme za izotermické,

Generátory 4/ jednotlivé úlohy budou při daných předpokladech řešeny lineárním, resp. linearizovaným oborem s využitím Laplaceovy transformace, operátorových a frekvenčních přenosu.

7.1. Rovnice popisující chování hydraulického mechanismu:

Jednofázový jednoduchý mechanismus SPK představuje dynamickou soustavu s více stupni volnosti, a jeho schéma je znázorněné na obr. 7 - 1.



Ze schématu obvodu na obr. 7 - 1 máme:

$$F(t) = A_G \cdot P_G(t) \quad (7-1)$$

$$X(t) = X_0 \sin \omega t \quad (7-2)$$

$$Z(t) = A_M \cdot P_M(t) \quad (7-3)$$

$$y(t) = y_0 \sin(\omega t + \varphi) \quad (7-4)$$

Dynamické schéma soustavy je naznačeno na obr. 7 - 2 .

U vedení můžeme uvažovat buď rozložené parametry, t.j. kontinuum hmotné s nekonečně mnoha stupni volnosti, nebo soustředěné parametry (1 stupeň volnosti).

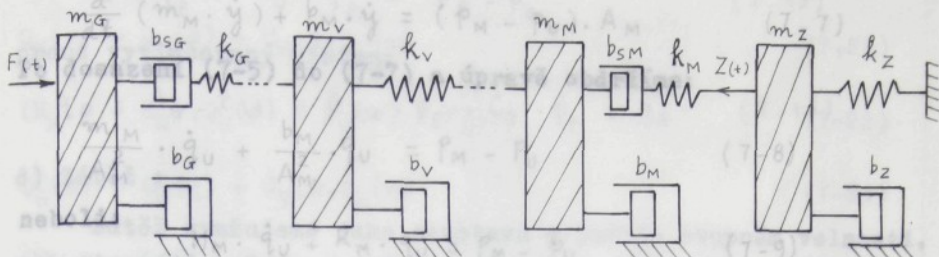
Pro řešení uvažujeme následující úpravy:
Místa vtoku do válců zahrneme do generátoru nebo motoru. Za

Generátor

Vedení

Motor

Zátěž



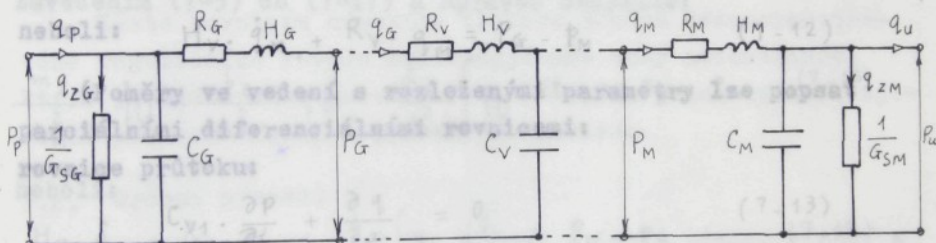
b) Vedení :

Obr. 7 - 2

hmotu motoru m_M považujeme hmotu kapaliny ve válci. Hmotu pístu motoru zahrneme do hmoty zátěže m_z . Tlumení pístu motoru zahrneme do tlumení zátěže b_z . Zanedbáme vlivy doplňovacího obvodu.

Elektrohydraulická analogie mechanismu SPK je na obr.

7 - 3



Obr. 7 - 3

Tuto soustavu můžeme popsat soustavou diferenciálních rovnic jednotlivých prvků:

a) Motor :

užitečný proud:

$$q_v = A_M \cdot \dot{y} \quad (7-5)$$

proud vstupující do motoru:

$$q_M = G_{SM} \cdot p_u + C_M \cdot \dot{p}_u + q_v \quad (7-6)$$

pohybová rovnice kapaliny v motoru:

$$\frac{d}{dt} (m_M \cdot \dot{y}) + b_M \cdot \dot{y} = (p_M - p_U) \cdot A_M \quad (7-7)$$

Po dosazení (7-5) do (7-7) a úpravě obdržíme:

$$\frac{m_M}{A_M^2} \cdot \dot{q}_U + \frac{b_M}{A_M^2} \cdot q_U = p_M - p_U \quad (7-8)$$

neboli:

$$H_M \cdot \dot{q}_U + R_M \cdot q_U = p_M - p_U \quad (7-9)$$

b) Vedení :

Rovnice kapaliny ve vedení, uvažujeme-li soustředěné parametry vedení, je obdobná rovnicím pro motor:

průd vstupující do vedení: $Z_V(y)$, vede k nelineární diferenciální rovnici (7-10).

$$q_G = C_V \cdot \dot{p}_M + q_M \quad (7-10)$$

pohybová rovnice kapaliny ve vedení:

$$\frac{m_V}{A_V^2} \cdot \dot{q}_M + \frac{b_V}{A_V^2} \cdot q_M = p_G - p_M \quad (7-11)$$

Zavedením (7-5) do (7-11) a úpravou obdržíme:

$$\text{neboli: } H_V \cdot \dot{q}_M + R_V \cdot q_M = p_G - p_M \quad (7-12)$$

2 (Poměry ve vedení s rozloženými parametry lze popsat parciálními diferenciálními rovnicemi:

rovnice průtoků:

$$\text{neboli: } C_{V1} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0 \quad (7-13)$$

pohybová rovnice:

$$H_{V1} \cdot \frac{\partial q}{\partial t} + R_{V1} \cdot q + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (7-14)$$

kde H_{V1} , R_{V1} a C_{V1} jsou parametry vedení vztažené na jednotku délky). Řešitelné, je střena zjednodušené považovat koeficienty za konstanty. Další zjednodušení rovnic

c) Generátor :

Píst generátoru je nuceně veden pohonovým mechanismem (vačka, kulisa), proto jeho parametry nezahrnujeme do parametrů generátoru. Z toho vyplývá, že generátor je popsán stejnými rovnicemi jako motor:

pohybová rovnice kapaliny v generátoru:

$$H_G \cdot \dot{q}_P + R_G \cdot q_P = p_P - p_G \quad (7-20)$$

proud vytlačovaný pístem:

$$q_P = A_G \cdot \dot{x}(t) = G_{SG} \cdot p_P + C_G \cdot \dot{p}_P + q_G \quad (7-22)$$

d) Zátěž :

Zátěž uvažujeme jako soustavu s jedním stupněm volnosti, což odpovídá možnému využití mechanismu SPK. Užitečnou složku Z_U , t.j. složku konající práci mimo mechanismus SPK, redukuje na odpor setrvačných hmot, pružiny a viskozního tření (m_Z , k_Z , b_Z). (Uvažování konkrétních případů, kdy užitečná složka zátěže $Z_U = Z_U(y)$, vede k nelineární diferenciální rovnici zátěže).

$$H_Z \cdot \ddot{y} + b_Z \cdot \dot{y} + p_n \cdot A_M + k_Z \cdot y = p_U \cdot A_M \quad (7-27)$$

Zavedením (7-5) do (7-17) a úpravou obdržíme:

$$\frac{m_Z}{A_M^2} \cdot \dot{q}_U + \frac{b_Z}{A_M^2} \cdot q_U + \frac{k_Z}{A_M^2} \int q_U \cdot dt = p_U - p_n \quad (7-18)$$

neboli:

$$H_Z \cdot \dot{q}_U + R_Z \cdot q_U + \frac{1}{C_Z} \cdot \int q_U \cdot dt = p_U - p_n \quad (7-19)$$

Získané rovnice, popisující mechanismus SPK, lze obecně řešit za předpokladu, že se jedná o lineární diferenciální rovnice s konstantními koeficienty. Ve skutečnosti jsou koeficienty rovnic funkcemi parametrů proměnných s časem. Aby byly získané rovnice řešitelné, je třeba zjednodušeně považovat koeficienty za konstantní. Další zjednodušení rovnic spočívá v tom, že můžeme zanedbat svodové propustnosti

a) První případ: $G_{SG} = G_{SG} = 0$

Jedním ze způsobů řešení je převedení rovnic (7-5), (7-6), (7-9), (7-10), (7-12), (7-15), (7-16) a (7-19) do operátorového tvaru pomocí Laplaceovy transformace:

$$Q_U(s) = A_M \cdot s \cdot Y(s) \quad (7-20)$$

$$Q_M(s) = Q_U(s) + C_M \cdot s \cdot P_U(s) \quad (7-21)$$

$$(H_M \cdot s + R_M) \cdot Q_U(s) = P_M(s) - P_U(s) \quad (7-22)$$

$$Q_G(s) = Q_M(s) + C_V \cdot s \cdot P_M(s) \quad (7-23)$$

$$(H_V \cdot s + R_V) \cdot Q_M(s) = P_G(s) - P_M(s) \quad (7-24)$$

$$(H_G \cdot s + R_G) \cdot Q_P(s) = P_P(s) - P_G(s) \quad (7-25)$$

$$Q_P(s) = Q_G(s) + C_G \cdot s \cdot P_P(s) \quad (7-26)$$

$$(H_Z \cdot s + R_Z + \frac{1}{C_Z \cdot s}) \cdot Q_U(s) = P_U(s) - P_n(s) \quad (7-27)$$

$$Q_P(s) = A_G \cdot s \cdot X(s) \quad (7-28)$$

Těmito rovnicím odpovídá blokové schéma dvoupřístrojového regulačního obvodu znázorňujícího celý mechanismus, které je znázorněno na obr. 7-4. V dalším přistoupíme k zjištění přenosů řízení a poruchy mechanismu.

7.2. Určení přenosů :

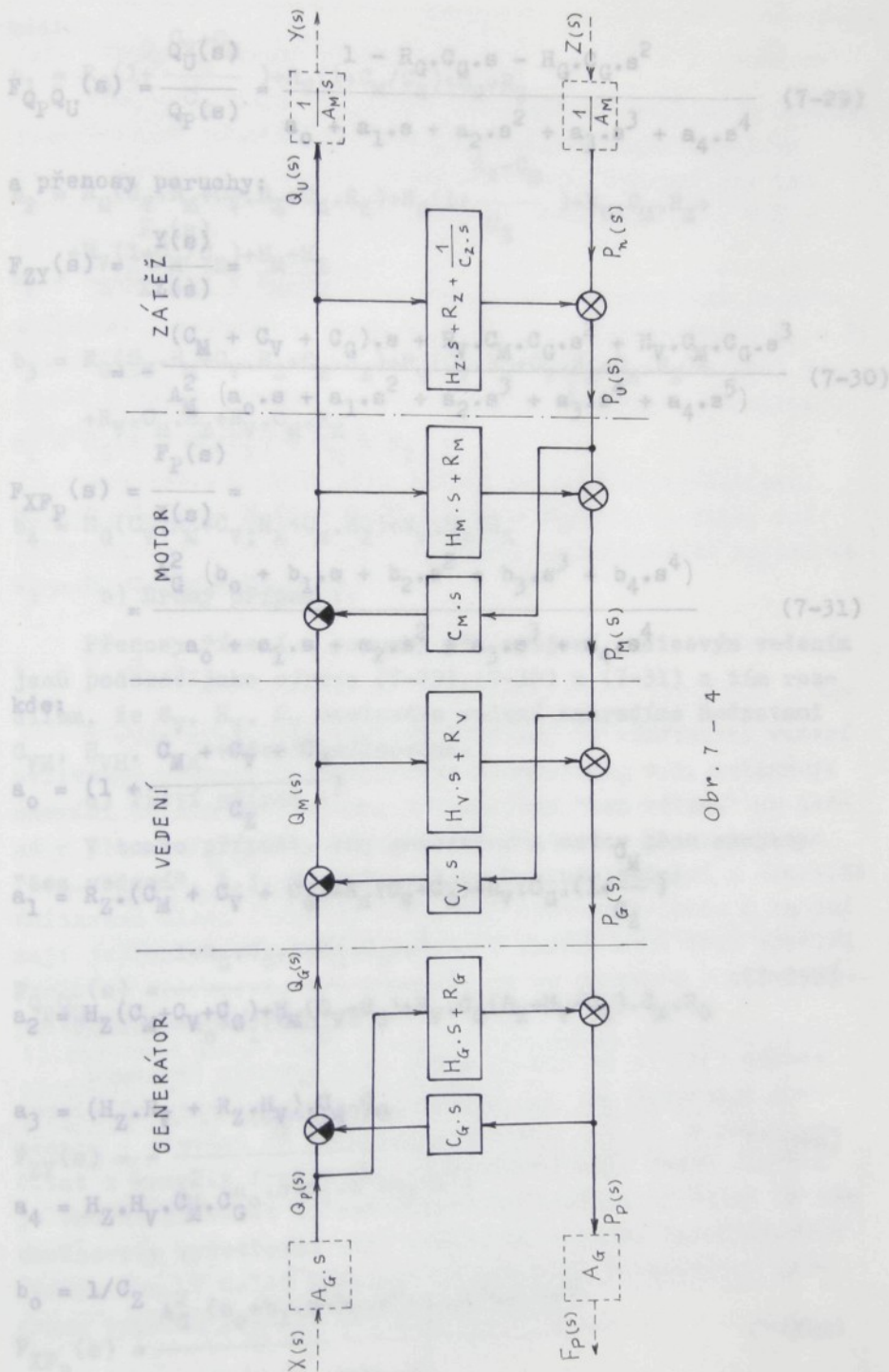
Ze schématu na obr. 7-4 můžeme zjistit přenos řízení a poruchy mechanismu. Abychom zjistili vliv hadicového vedení na chování mechanismu, budeme vyšetřovat tři případy:

- Generátor je s motorem spojen vedením ocelovým
- Generátor je s motorem spojen vedením hadicovým
- Generátor je "bezprostředně" spojen s motorem.

Postupně provedeme k určení přenosů pro každý jednotlivý případ:

a) První případ:

Ze schématu na obr. 7-4 při spojení trubkou, která má kapacitu C_V , odpor proti zrychlení H_V a odpor proti pohybu R_V , vyplývá přenos řízení:



Obr. 7 - 4

$$F_{Q_P Q_U}(s) = \frac{Q_U(s)}{Q_P(s)} = \frac{1 - R_G \cdot C_G \cdot s - H_G \cdot C_G \cdot s^2}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3 + a_4 \cdot s^4} \quad (7-29)$$

a přenosy poruchy:

$$F_{ZY}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = - \frac{(C_M + C_V + C_G) \cdot s + R_V \cdot C_M \cdot C_G \cdot s^2 + H_V \cdot C_M \cdot C_G \cdot s^3}{A_M^2 (a_0 \cdot s + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s^3 + a_3 \cdot s^4 + a_4 \cdot s^5)} \quad (7-30)$$

$$F_{XP}(s) = \frac{F_P(s)}{X(s)} = \frac{A_G^2 (b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + b_3 \cdot s^3 + b_4 \cdot s^4)}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3 + a_4 \cdot s^4} \quad (7-31)$$

Přenosy $a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3 + a_4 \cdot s^4$ jsou podobné jako výrazy (7-29), (7-30) a (7-31) a tím roz-
kde:

$$a_0 = (1 + \frac{C_M + C_V + C_G}{C_Z})$$

$$a_1 = R_Z \cdot (C_M + C_V + C_G) + R_M (C_V + C_G) + R_V \cdot C_G \cdot (1 + \frac{C_M}{C_Z})$$

$$a_2 = H_Z (C_M + C_V + C_G) + H_M (C_V + C_G) + H_V \cdot C_G (R_Z + H_V / C_Z) \cdot C_M \cdot C_G \quad (7-29a)$$

$$a_3 = (H_Z \cdot R_V + R_Z \cdot H_V) \cdot C_M \cdot C_G \quad (7-30a)$$

$$a_4 = H_Z \cdot H_V \cdot C_M \cdot C_G$$

$$b_0 = 1/C_Z \quad (7-31a)$$

$$F_{XP}(s) = \frac{A_G^2 (b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + b_3 \cdot s^3 + b_4 \cdot s^4)}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2 + a_3 \cdot s^3 + a_4 \cdot s^4}$$

kde:

$$b_1 = R_G \left(1 + \frac{C_V + C_M}{C_Z} \right) + R_V (1 + C_M / C_Z) + R_M + R_Z$$

$$b_2 = R_G (C_V \cdot R_M + C_V \cdot R_Z + C_M \cdot R_Z) + H_G \left(1 + \frac{C_V + C_M}{C_Z} \right) + R_V \cdot C_M \cdot R_Z + H_V (1 + C_M / C_Z) + H_M + H_Z$$

$$b_3 = R_G (C_V \cdot H_M + C_V \cdot H_Z + C_M \cdot H_Z) + H_G (C_V \cdot R_M + C_V \cdot R_Z + C_M \cdot R_Z) + R_V \cdot C_M \cdot H_Z + H_V \cdot C_M \cdot R_Z$$

$$b_4 = H_G (C_V \cdot H_M + C_V \cdot H_Z + C_M \cdot H_Z) + H_V \cdot C_M \cdot H_Z$$

b) Druhý případ :

Přenosy řízení a poruchy při spojení hadicovým vedením jsou podobné jako výrazy (7-29), (7-30) a (7-31) s tím rozdílem, že C_V , H_V , R_V ocelového vedení nahradíme hodnotami C_{VH} , H_{VH} , R_{VH} vedení hadicového.

c) Třetí případ :

V tomto případě, kdy generátor a motor jsou spojeny "bez vedení", t.j. $C_V = H_V = R_V = 0$, budentedy: ni a odpovídá

$$F_{Q_P Q_U}(s) = \frac{1 - R_G \cdot C_G \cdot s - H_G \cdot C_G \cdot s^2}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2} \quad (7-29a)$$

$$F_{ZY}(s) = - \frac{(C_M + C_G) \cdot s}{A_M^2 (a_0 \cdot s + a_1 \cdot s^2 + a_2 \cdot s^3)} \quad (7-30a)$$

$$F_{X_F P}(s) = \frac{A_G^2 (b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot s^2 + b_3 \cdot s^3 + b_4 \cdot s^4)}{a_0 + a_1 \cdot s + a_2 \cdot s^2} \quad (7-31a)$$

kde:

7.3. Program PŘENOS :

$$a_0 = 1 + \frac{C_M + C_G}{C_Z}$$

Program PŘENOS (v jazyku PFI-PORTAN) realizuje výpočet frekvenčních přenosů a odtud příslušných logaritmických amplitudových a fázových charakteristik. Schématicky lze přenosové charakteristiky tohoto programu znázornit obr. 7-5 v příloze.

$$a_2 = H_Z(C_M + C_G) + H_M \cdot C_G$$

Pro výpočet vlnového vedení za bezstrátové se soustředěnými parametry, t.j. H_V a C_V jsou konstantní a $R_V = 0$.

$b_0 = 1/C_Z$ odpory způsobené změnou průřezného průřezu mezi vedením a válci považujeme za odpory proti proudění kapaliny u

$$b_1 = R_G(1 + C_M/C_Z) + R_M + R_Z$$

Abychom zjistili vliv hadice na chování mechanismu,

$$b_2 = R_G \cdot C_M \cdot R_Z + H_G(1 + C_M/C_Z) + H_M + H_Z$$

kapacity hadice, což bude charakterizováno peněm kapacit hadicového vedení ke

$$b_3 = R_G \cdot C_M \cdot H_Z + H_G \cdot C_M \cdot R_Z$$

$$\delta = \frac{C_H}{C_M} \quad (7-32)$$

$$b_4 = H_G \cdot C_M \cdot H_Z$$

kte poměry mají hodnoty od 5 do 3000, které vyplývají z experimentálních měření.

Z výše získaných výsledků vidíme, že vlastnosti vedení ovlivňují přenosy hydraulického mechanismu, t.j. ovlivňují chování celého mechanismu. Při spojení "bez vedení" se jedná o přenos $F_{Q_P Q_U}(s)$ odpovídající kmitavému členu druhého řádu. Vlivem parametrů vedení se přenos mění a odpovídá kmitavému členu čtvrtého řádu. Při spojení trubkou a hadicí mají jejich přenosy podobný tvar a rozdíl mezi nimi spočívá jenom ve velikosti, což znamená, že se soustava v obou případech chová podobně.

Obrazové přenosy $F(s)$ podle (7-29) až (7-31a) můžeme zavedením ryze imaginární proměnné $j\omega$ za komplexní proměnnou s převést na frekvenční přenosy $F(j\omega)$ a pak vypočítat a kreslit frekvenční charakteristiky. Tento výpočet je vhodné provádět na samočinném počítači a výsledky by nám umožňovaly vyšetřovat vliv hadice na chování hydraulického mechanismu. V další kapitole přistoupíme k sestavení programu výpočtu přenosů a charakteristik.

7.3. Popis programu PŘENOS :

Program PŘENOS (v jazyku FEL-FORTRAN) realizuje výpočet frekvenčních přenosů a odtud příslušných logaritmických amplitudových a fázových charakteristik. Schématicky lze jednodušené blokové schéma programu znázornit obr. 7-5 v příloze.

Při výpočtu považujeme vedení za bezeztrátové se soustředěnými parametry, t.j. H_V a C_V jsou konstantní a $R_V = 0$. Místní odpory způsobené změnou průtočného průřezu mezi vedením a válci považujeme za odpory proti pohybu kapaliny u motoru R_M a u generátoru R_G .

Abychom zjistili vliv hadice na chování mechanismu, provedeme výpočty pro různé hodnoty kapacity hadice, což bude charakterizováno poměrem kapacity hadicevého vedení ke kapacitě motoru, tak že:

$$\delta = \frac{C_H}{C_M} \quad (7-32)$$

kde poměry mají hodnoty od 5 do 3000, které vyplývají z experimentálních výsledků získaných v kapitole 6.

Hlavní program provádí čtení vstupních dat a výpočty jednotlivých konstant přenosů. Oba podprogramy pak provádějí výpočet bodů frekvenčních charakteristik.

Význam vstupních údajů uvádí tabulka VII - 1.

Výstupní údaje obsahují hodnoty pro přenosy řízení a poruchy:

- a) kruhové frekvence
- b) reálné a imaginární složky frekvenčních charakteristik
- c) amplitudy (absolutní hodnoty)
- d) amplitudové logaritmické frekvenční charakteristiky
- e) fázové logaritmické frekvenční charakteristiky

Výsledky výpočtů podle programu jsou uvedeny v diagramech (VII - 1a,b), (VII - 2a,b) a (VII - 3a,b), pomocí nichž můžeme v další kapitole vyšetřovat vliv hadice na chování celého hydraulického mechanismu.

Označení		Význam	Hodnota
Text.	Progr.		
	DM	průměr pístu motoru	0,02 [m]
	DG	průměr pístu generátoru	0,02 [m]
	DV	světlost ocelového vedení	0,01 [m]
	DH	světlost hadicového vedení	0,01 [m]
C_M	CM	kapacita motoru	$0,948 \cdot 10^{-14}$
			[m ⁵ N ⁻¹]
C_V	CV	kapacita ocelového vedení	$0,528 \cdot 10^{-13}$
			[m ⁵ N ⁻¹]
m_M	MM	hmotnost kapaliny v motoru	0,01 [kg]
m_G	MG	hmotnost kapaliny v generátoru	0,01 [kg]
m_V	MV	hmotnost kapaliny v ocel. vedení	0,069 [kg]
m_H	MH	hmotnost kapaliny v had. vedení	0,069 [kg]
m_Z	MZ	pohybová hmotnost zátěže	0,3 [kg]
b_V	BV	součinitel tlumení ve vedení	0
b_M	BM	součinitel tlumení v motoru	$0,42 [\text{Nm}^{-1}\text{s}]$
b_G	BG	součinitel tlumení v generátoru	$0,42 [\text{Nm}^{-1}\text{s}]$
b_Z	BZ	součinitel tlumení v zátěži	0
k_Z	KZ	konstanta tuhosti pružiny v zátěži	$2,885 \cdot 10^{-14}$
		/změřeno/	[Nm ⁻¹]
	N	počet bodů frekvenční charakteristiky a počet poměru DELTA(J)	42
$\omega(I)$	OMEGA(I)	otáčky budicího hřídele generátoru	$(1 \cdot 10^4) [\text{Hz}]$
$\delta(J)$	DELTA(J)	poměry kapacity hadicového vedení ke kapacitě motoru	$(5 + 3000)$

Tab. VII - 1

$$X(s) = \frac{Q_P(s)}{A_G \cdot s}$$

$$Y(s) = \frac{Q_U(s)}{A_M \cdot s}$$

a pak obdržíme:

$$F_{xy}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Q_U(s) \cdot A_G \cdot s}{A_M \cdot s \cdot Q_P(s)} = \frac{A_G}{A_M} \cdot F_{Q_P Q_U}(s) \quad (7-33)$$

7.4. Rozbor vlivu hadice na chování mechanismu :

Na diagramech jsou znázorněny amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky pro mechanismus spojený "bez vedení" (tlusté křivky značené písmenem (B) na diagr.), ocelovým vedením (tlusté křivky (T)) a pro mechanismus spojený hadicovým vedením s různými hodnotami poměru δ (určeného vztahem 7 - 32), t.j. s různými hodnotami kapacity hadice. Tlusté křivky (H) vyjadřují charakteristiky odpovídající poměru $\delta = 17,4$, t.j. pro hadici Js10 272 326 3 10 21 10PNT 628406 světlosti 10 mm a délky 1 m, jejíž kapacita je považována za konstantní v intervalu přetlaku $(4 + 16)$ MPa.

Pomocí diagramů lze názorně vidět a postihnout vliv hadice na chování mechanismu (konkrétně na dynamickou vlastnost, přesnost a tuhost celého mechanismu). Za tímto účelem dochází k postupnému vyšetřování jednotlivých přenosů a charakteristik.

7.4.1. Přenos $F_{Q_P Q_U}(s)$:

Přenos řízení který je zjištěn výrazem (7-29)

$$F_{Q_P Q_U}(s) = \frac{Q_U(s)}{Q_P(s)}$$

vyjadřuje vztah mezi vstupním a výstupním proudem kapaliny v mechanismu, a tím nám umožňuje vyšetřovat dynamické vlastnosti mechanismu. Z hlediska reprodukce pohybu pomocí mechanismu SPK mezi dvěma členy mechanismu spojené přímo nebo vedením, nás zajímá vztah mezi vstupem X a výstupem Y posunutí pístu generátoru a motoru (viz. obr. 7-1). Lze říci, že přenos řízení $F_{Q_P Q_U}(s)$ vyjadřuje také vztah mezi X a Y , poněvadž podle (7-20) a (7-28) máme:

$$X(s) = \frac{Q_P(s)}{A_G \cdot s} ; \quad Y(s) = \frac{Q_U(s)}{A_M \cdot s}$$

a pak obdržíme:

$$F_{XY}(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Q_U(s) \cdot A_G \cdot s}{A_M \cdot s \cdot Q_U(s)} = \frac{A_G}{A_M} \cdot F_{Q_P Q_U}(s) \quad (7-33)$$

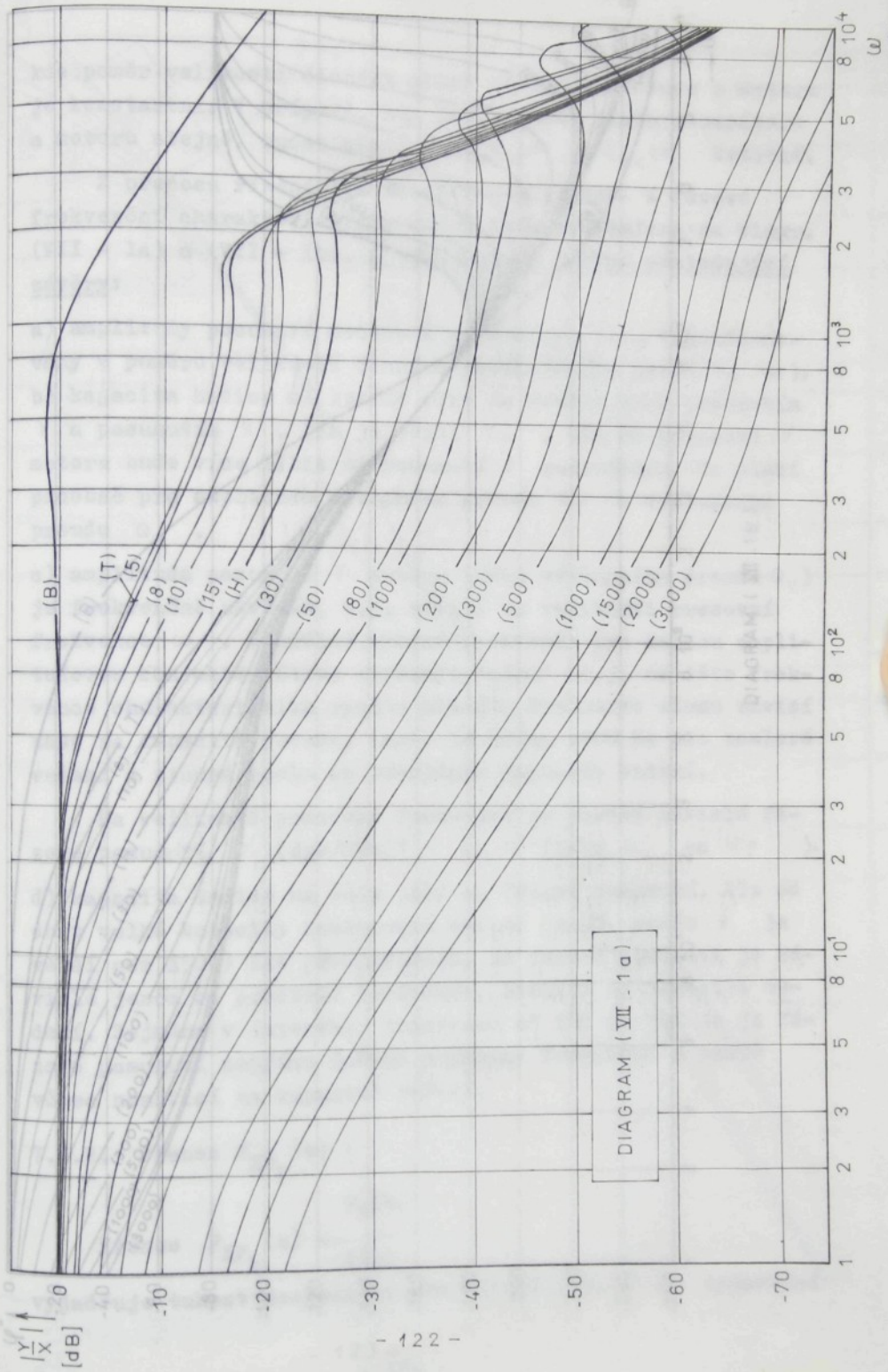


DIAGRAM (VII - 1a)

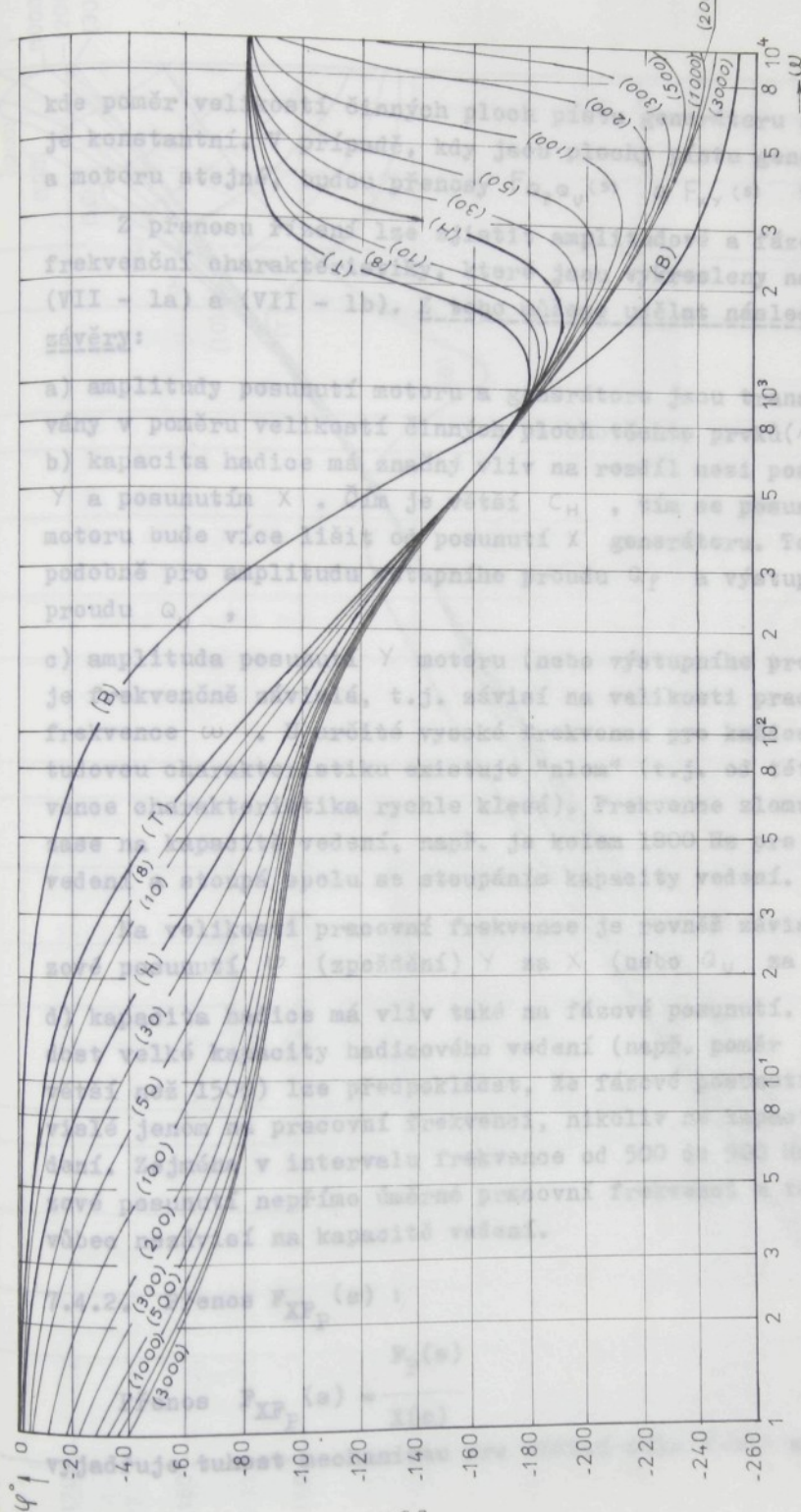


DIAGRAM (VII - 1b)

kde poměr velikostí činných ploch pístu generátoru a motoru je konstantní. V případě, kdy jsou plochy pístu generátoru a motoru stejné, budou přenosy $F_{Q_P Q_U}(s)$ a $F_{X_Y}(s)$ totožné.

Z přenosu řízení lze zjistit amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky, které jsou vykresleny na diagr. (VII - 1a) a (VII - 1b). Z toho můžeme udělat následující závěry:

a) amplitudy posunutí motoru a generátoru jsou transformovány v poměru velikostí činných ploch těchto prvků (A_G/A_M),
 b) kapacita hadice má značný vliv na rozdíl mezi posunutím Y a posunutím X . Čím je větší C_H , tím se posunutí Y motoru bude více lišit od posunutí X generátoru. To platí podobně pro amplitudu vstupního proudu Q_P a výstupního proudu Q_U ,

c) amplituda posunutí Y motoru (nebo výstupního proudu Q_U) je frekvenčně závislá, t.j. závisí na velikosti pracovní frekvence ω . U určité vysoké frekvence pro každou amplitudovou charakteristiku existuje "zlom" (t.j. od této frekvence charakteristika rychle klesá). Frekvence zlomu závisí zase na kapacitě vedení, např. je kolem 1800 Hz pro ocelové vedení a stoupá spolu se stoupáním kapacity vedení.

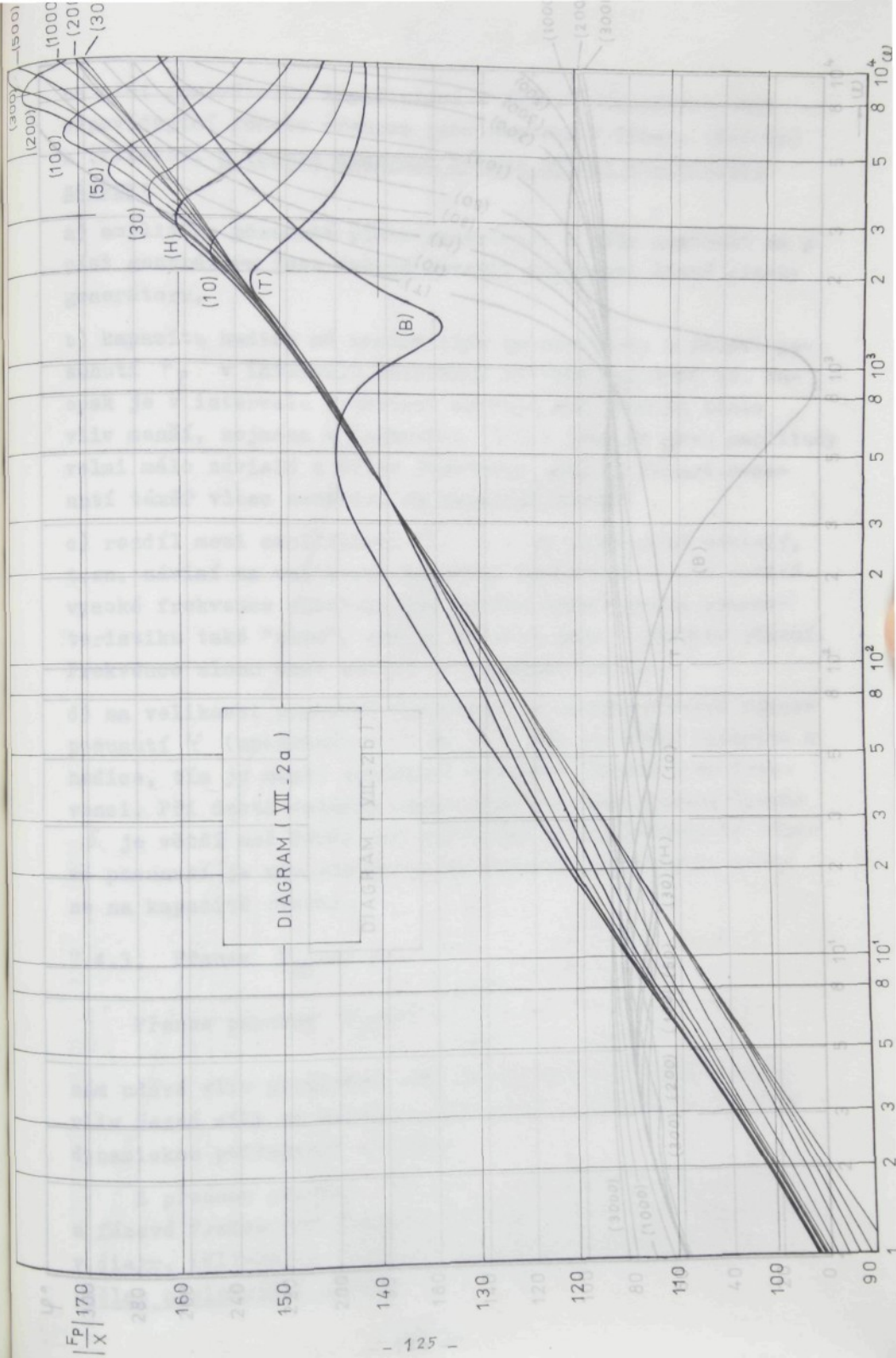
Na velikosti pracovní frekvence je rovněž závislé fázové posunutí φ (zpoždění) Y za X (nebo Q_U za Q_P),

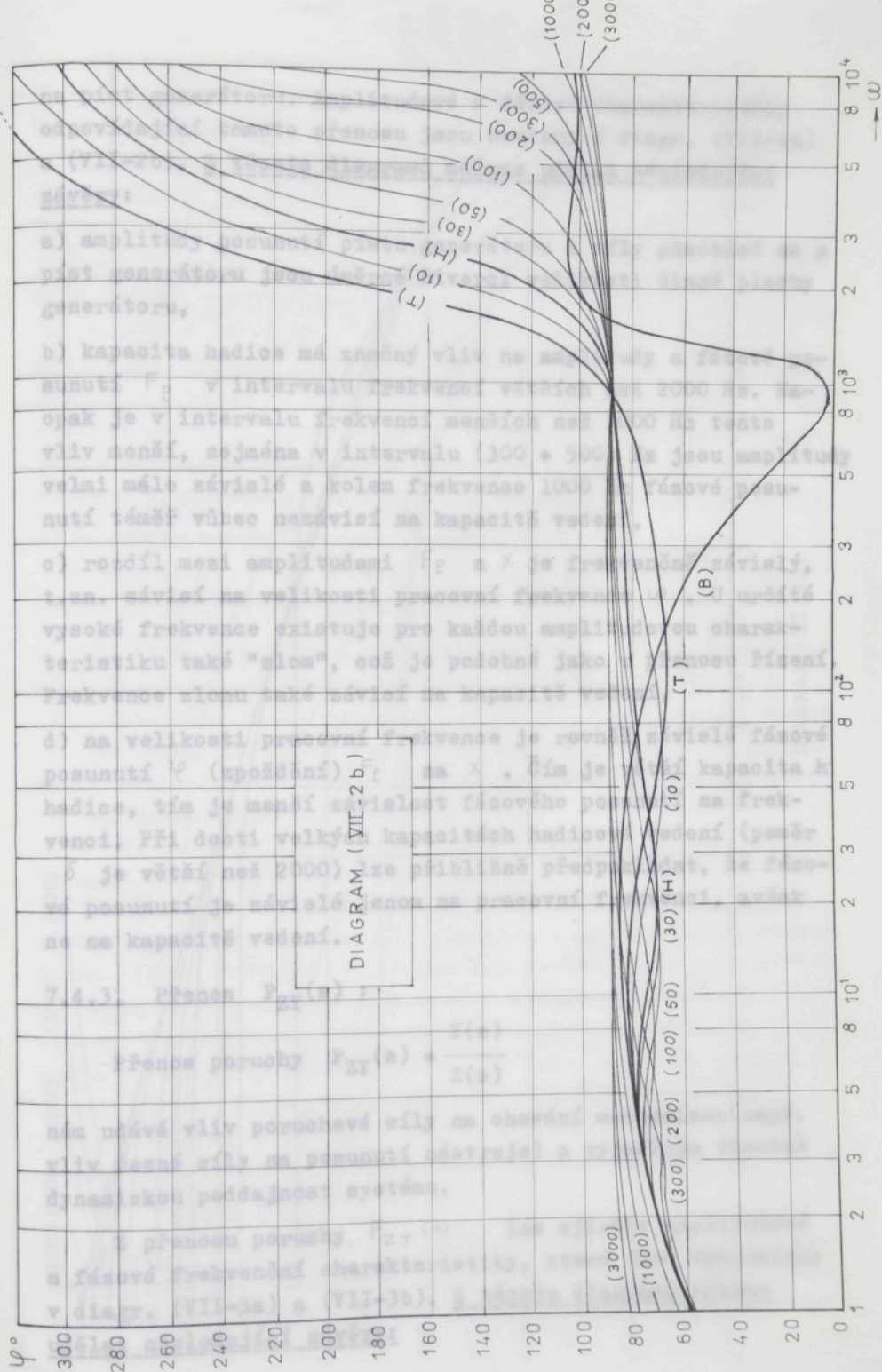
d) kapacita hadice má vliv také na fázové posunutí. Ale od dost velké kapacity hadicového vedení (např. poměr δ je větší než 1500) lze předpokládat, že fázové posunutí je závislé jenom na pracovní frekvenci, nikoliv na kapacitě vedení. Zejména v intervalu frekvence od 500 do 900 Hz je fázové posunutí nepřímě úměrné pracovní frekvenci a téměř vůbec nezávisí na kapacitě vedení.

7.4.2. Přenos $F_{X F_P}(s)$:

$$\text{Přenos } F_{X F_P}(s) = \frac{F_P(s)}{X(s)}$$

vyjadřuje tuhost mechanismu pro řídicí sílu $F(t)$ způsobící





na píst generátoru. Amplitudové a fázové charakteristiky odpovídající tomuto přenosu jsou uvedeny v diagr. (VII-2a) a (VII-2b). Z těchto diagramů můžeme udělat následující závěry:

- a) amplitudy posunutí pístu generátoru a síly působící na píst generátoru jsou úměrné čtverci velikosti činné plochy generátoru,
- b) kapacita hadice má značný vliv na amplitudy a fázové posunutí F_P v intervalu frekvencí větších než 2000 Hz. Naopak je v intervalu frekvencí menších než 1000 Hz tento vliv menší, zejména v intervalu (300 + 500) Hz jsou amplitudy velmi málo závislé a kolem frekvence 1000 Hz fázové posunutí téměř vůbec nezávisí na kapacitě vedení,
- c) rozdíl mezi amplitudami F_P a $\times$ je frekvenčně závislý, t.zn. závisí na velikosti pracovní frekvence ω . U určité vysoké frekvence existuje pro každou amplitudovou charakteristiku také "zlom", což je podobné jako u přenosu řízení. Frekvence zlomu také závisí na kapacitě vedení,
- d) na velikosti pracovní frekvence je rovněž závislé fázové posunutí φ (zpoždění) F_P za $\times$. Čím je větší kapacita k hadice, tím je menší závislost fázového posunutí na frekvenci. Při dosti velkých kapacitách hadicové vedení (poměr δ je větší než 2000) lze přibližně předpokládat, že fázové posunutí je závislé jenom na pracovní frekvenci, avšak ne na kapacitě vedení.

7.4.3. Přenos $F_{ZY}(s)$:

$$\text{Přenos poruchy } F_{ZY}(s) = \frac{Y(s)}{Z(s)}$$

nám udává vliv poruchové síly na chování mechanismu (např. vliv řezné síly na posunutí nástroje) a vyjadřuje vlastně dynamickou poddajnost systému.

Z přenosu poruchy $F_{ZY}(s)$ lze zjistit amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky, které jsou vykresleny v diagr. (VII-3a) a (VII-3b). Z těchto diagramů můžeme udělat následující závěry:

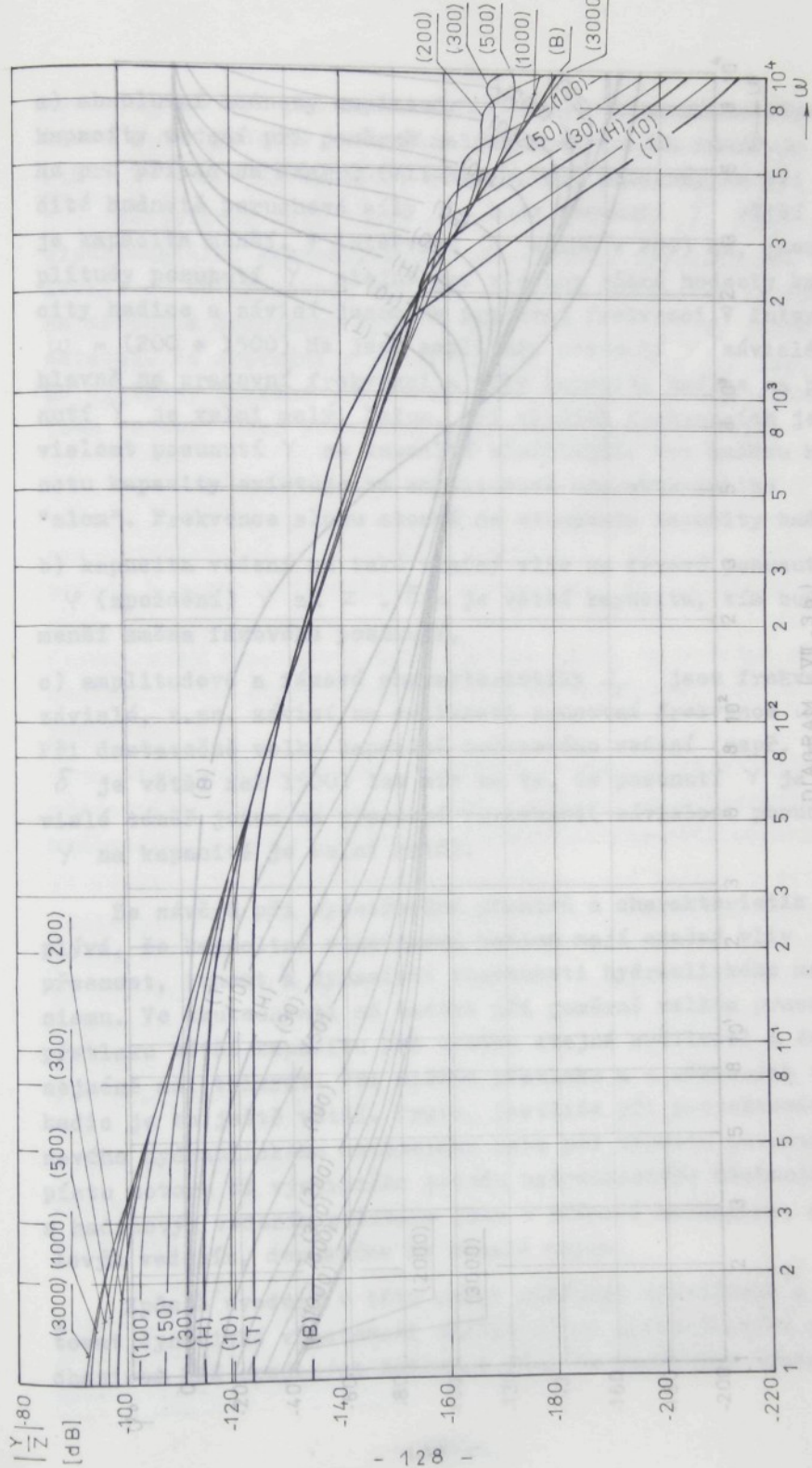
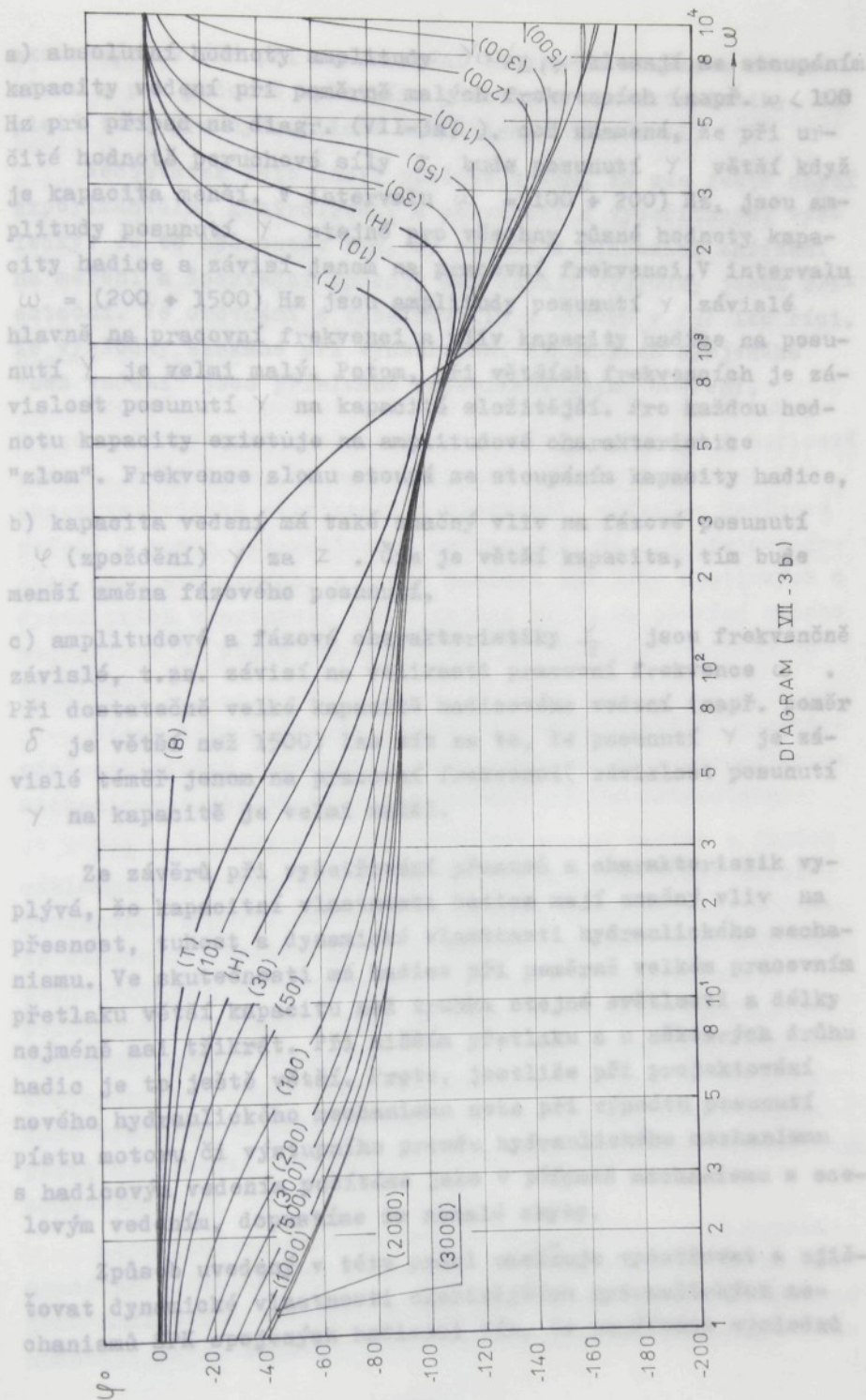


DIAGRAM (VII - 3a)



- a) absolutní hodnoty amplitudy $Y(s)/Z(s)$ klesají se stoupáním kapacity vedení při poměrně malých frekvencích (např. $\omega < 100$ Hz pro případ na diagr. (VII-3a)), což znamená, že při určité hodnotě poruchové síly Z bude posunutí Y větší když je kapacita menší. V intervalu $\omega = (100 + 200)$ Hz, jsou amplitudy posunutí Y stejné pro všechny různé hodnoty kapacity hadice a závisí jenom na pracovní frekvenci. V intervalu $\omega = (200 + 1500)$ Hz jsou amplitudy posunutí Y závislé hlavně na pracovní frekvenci a vliv kapacity hadice na posunutí Y je velmi malý. Potom, při větších frekvencích je závislost posunutí Y na kapacitě složitější. Pro každou hodnotu kapacity existuje na amplitudové charakteristice "zlom". Frekvence zlomu stoupá se stoupáním kapacity hadice,
- b) kapacita vedení má také značný vliv na fázové posunutí φ (zpoždění) Y za Z . Čím je větší kapacita, tím bude menší změna fázového posunutí,
- c) amplitudové a fázové charakteristiky $\frac{Y}{Z}$ jsou frekvenčně závislé, t.j. závisí na velikosti pracovní frekvence ω . Při dostatečně velké kapacitě hadicového vedení (např. poměr δ je větší než 1500) lze mít za to, že posunutí Y je závislé téměř jenom na pracovní frekvenci (závislost posunutí Y na kapacitě je velmi malá).

Ze závěrů při vyšetřování přenosů a charakteristik vyplývá, že kapacitní vlastnosti hadice mají značný vliv na přesnost, tuhost a dynamické vlastnosti hydraulického mechanismu. Ve skutečnosti má hadice při poměrně velkém pracovním přetlaku větší kapacitu než trubka stejné světlosti a délky nejméně asi třikrát. Při nižším přetlaku a u některých druhů hadic je to ještě větší. Proto, jestliže při projektování nového hydraulického mechanismu nebo při výpočtu posunutí pístu motoru či výstupního proudu hydraulického mechanismu s hadicovým vedením počítáme jako v případě mechanismu s ocelovým vedením, dopustíme se nemalé chyby.

Způsob uvedený v této práci umožňuje vyšetřovat a zjišťovat dynamické vlastnosti složitějších hydraulických mechanismů SPK spojených hadicemi tím, že používáme výsledků

zkoumaných v /8/ při sestavování blokového schématu mechanismu a pak podobně vyšetříme přenosy a charakteristiky. To platí také pro hydraulické mechanismy SSK a SSPK.

Nedostatek této části spočívá v tom, že zde ještě chybí experimentální kontrolování a porovnání s vypočítanými výsledky. Je to způsobeno tím, že nemáme k dispozici zařízení na měření a dosavadní způsoby nám dávají výsledky jenom orientační. Ve srovnání s vyšetřováním a závěry v /3/ lze říci, že výsledky získané při vyšetřování mechanismu spojeného "bez vedení" jsou příslušné experimentálnímu ověření.

Vedení je součástí každého hydraulického mechanismu. V hydraulických mechanismech se používají ocelové a hadicové vedení. Díky tomu, že hadice oproti ocelové trubce má své charakteristické vlastnosti a přednosti, užívá se hadicové vedení u mnoha hydraulických mechanismů, ať již stejnosměrných, nebo střídavých, a tudíž znalost jak jeho statických a dynamických vlastností tak i jejich vlivu na chování celého mechanismu se stává nezbytnou při návrhu hydraulického mechanismu.

Cílem této práce je teoreticko-experimentální vyšetřování základních vlastností hadic používaných v hydraulickém mechanismu a jejich vlivu na chování celého mechanismu.

Při vyšetřování konstrukce, deformací hadice a jejích základních vlastností (měrný hmotnostní odpor, ochranný modulu pružnosti, odpor, kapacita, objemové měrné at.d.) vidíme, že vlastnosti hadice jsou závislé na jejích konstrukčních, geometrických, materiálových i výrobních parametrech, a přičemž nejvýraznější vliv na vlastnosti hadice mají konstrukční parametry hadice. Tyto parametry obvykle nemáme k dispozici a dosud ještě nemáme způsob výpočtu, který nám dává výsledky dostatečně odpovídající skutečnosti. Musíme proto vlastnosti hadice zjišťovat teoreticko-experimentálním způsobem.

Kapacitní vlastnosti hadice byly v této práci experimentálně zjištěny tím způsobem, že jsme zjistili měrný objemu hadice při vnitřním tlaku a poté vypočetli ostatní hodnoty (např. kapacita, ochranný modulu pružnosti).

8. ZÁVĚR :

V dnešní době, kdy se hydraulické mechanismy uplatňují téměř u všech výrobních strojů a kdy zvýšení produktivity práce bývá velmi často spojeno se zvyšováním pohybové frekvence těchto strojů, nabývají na důležitosti dynamické vlastnosti mechanismů. Pokud se vede v úvahu vyšetřování vlastností celého mechanismu, dochází především k problému zjistit vlastnosti jednotlivých součástí, z nichž je mechanismus sestaven.

Vedení je součástí každého hydraulického mechanismu. V hydraulických mechanismech se používají ocelová a hadicová vedení. Díky tomu, že hadice oproti ocelové trubce má své charakteristické vlastnosti a přednosti, užívá se hadicové vedení u mnoha hydraulických mechanismů, ať již stejnosměrných nebo střídavých, a tudíž znalost jak jeho statických a dynamických vlastností tak i jejich vlivu na chování celého mechanismu se stává nezbytnou při návrhu hydraulického mechanismu.

Cílem této práce je teoreticko-experimentální vyšetřování základních vlastností hadic používaných v hydraulickém mechanismu a jejich vlivu na chování celého mechanismu.

Při vyšetřování konstrukce, deformací hadice a jejich základních vlastností (změny úhlu opletu, souhrnný modul pružnosti, odpory, kapacita, objemové změny a.t.d.) vidíme, že vlastnosti hadice jsou závislé na jejích konstrukčních, geometrických, materiálových i výrobních parametrech, přičemž nejvýraznější vliv na vlastnosti hadice mají konstrukční parametry hadice. Tyto parametry obvykle nemáme k dispozici a dosud ještě nemáme způsob výpočtu, který nám dává výsledky dostatečně odpovídající skutečnosti. Musíme proto vlastnosti hadice zjišťovat teoreticko-experimentálním způsobem.

Kapacitní vlastnosti hadice byly v této práci experimentálně zjištěny tím způsobem, že jsme zjistili změny objemu hadice při vnitřním tlaku a odtud vypočetli ostatní hodnoty (např. kapacitu nebo souhrnný modul pružnosti).

hadicového vedení). pustit kapalinu z měření hadice.

Změny objemu hadice byly zjišťovány třemi metodami:
- měřením vyteklého množství kapaliny z hadice zatížené vnitřním přetlakem do odměrného válce,
- proměřením vnějších geometrických parametrů hadice,
- souvislým měřením s použitím pístu a válce známého průměru.

Způsob měření vyteklého množství kapaliny z hadice nám dával výsledky dost přesné a odpovídající skutečnosti. Z naměřených hodnot lze metodou nejmenších čtverců zjistit exponenciální nebo linearizovanou závislost ΔV_s na Δp s dostatečnou přesností. Experiment byl proveden na několika hadicích různých co do konstrukce i geometrických parametrů (průměry a délky). Naměřené a vypočtené výsledky umožňují vyšetřovat závislost kapacitních vlastností hadice na parametrech konstrukčních, materiálových a geometrických. Z výsledků vyplývá důležitý závěr, že pro všechny typy hadic o různých parametrech můžeme kapacitu nebo souhrnný modul pružnosti hadice v intervalu obvyklých pracovních přetlaků považovat za konstantní s dostatečnou přesností. Tento závěr se důsledně využíval v této práci při vyšetřování vlivu hadice na chování celého hydraulického mechanismu, v němž je použita hadice jako jeho součást.

Vyšetřování objemové změny hadice proměřením vnějších geometrických parametrů hadice by nám umožňovalo zjišťovat vztah mezi vnější a vnitřní objemovou změnou. Výsledky jsou jasným výrazným důkazem, že konstrukce hadice značně ovlivňuje změnu objemu a obecně vlastnosti hadice. Tento způsob však platí snad jenom pro hadice s přízovým opletem, obecně pro hadice mající dostatečně velkou deformaci. U hadice s drátovým opletem je změna vnějšího průměru a délky hadice velmi malá, je proto těžké měřit přesně a při měření se dopustíme dost velké chyby.

Zjišťování změny objemu hadice souvislým měřením nám dává rychle výsledky, které odpovídají výsledkům získaným měřením vyteklého množství kapaliny z měřené hadice. Tento způsob umožňuje měřit při klesání i stoupání vnitřního pře-

tlaku a nemusíme odpustit kapalinu z měřené hadice.

Výsledků získaných při měření změny objemu hadice mohou konstruktéři používat při volbě hadic nebo vyšetřování vlastností hadice, při projektování a kontrolování chování hydraulického mechanismu, v němž se používá hadic. Zařízení není složité, měření je provedeno bez obtíží a výsledky jsou získány poměrně rychle. Bylo by třeba podle těchto metod zjistit kapacitní vlastnosti jednotlivých typů hadic, poněvadž každý sortiment hadice má svůj vlastní charakter konstrukční, materiálový a výrobní (technologický), a proto má vlastní kapacitní vlastnosti. Abychom rychle obdrželi výsledky, měli bychom zpracovat naměřené hodnoty a vypočítat pomocí samočinného počítače. Bylo by také třeba vyšetřovat dynamické vlastnosti hadice, které nebyly v této práci vyšetřeny kvůli tomu, že jsem na to neměl dost času a zařízení.

V práci bylo také uvedeno vyšetřování vlivu vlastností hadice na chování jednoduchého hydraulického mechanismu SPK. Metodou teorie lineární regulace s použitím blokového schématu a číslicového počítače obdržíme logaritmické amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky přenosu řízení a poruchy mechanismu. Z výsledků vyplývá, že kapacitní vlastnosti hadice mají značný vliv na přesnost, tuhost a dynamiku hydraulického mechanismu. Kapacita hadice proměňuje amplitudové a fázové charakteristiky mechanismu a ovlivňuje závislosti amplitudy a fázové posunutí na pracovní frekvenci mechanismu. Z výsledků je patrné, že nemůžeme při projektování nového hydraulického mechanismu, při výpočtu posunutí pístu motoru či výstupního proudu hydraulického mechanismu s hadicovým vedením počítat jako u mechanismu s ocelovým vedením o stejných světlostech a délkách, poněvadž takový výpočet bude vyvolávat nemalé chyby.

Aplikování navrženého způsobu nám umožňuje vyšetřovat a zjišťovat dynamické vlastnosti jak složitějších hydraulických mechanismů SPK, tak i hydraulických mechanismů SSK a SSPK.

Výzkumy v této oblasti jsou vlastně v začátcích,

přesto můžeme od nich očekávat, že přinesou řadu zajímavých výsledků nejen teoretických, ale především praktických.

Tato metoda a její výsledky by konstruktérům mohly pomáhat při navrhování a projektování nových hydraulických mechanismů používajících hadice, při kontrolování a proměření správnosti chování mechanismů. Získané poznatky z této práce bude možné bez těžkostí aplikovat v konkrétních podmínkách Vietnamu a mají tedy pro naši vlast praktický význam.

7-5

2) Výkres VI - 01

Poznámka k výkresu VI - 01

- 1/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 2/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 3/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 4/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 5/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 6/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 7/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 8/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 9/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 10/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 11/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 12/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963
- 13/ BATA, V.J. : Mechanismus hadicového mechanismu. 1963

SEZNAM PŘÍLOH

- /1/ CERHA, J. : Hydraulické mechanismy v oboru výrobních strojů. VŠST - Liberec 1971

1) Obrázky :

- /2/ CERHA, J. : Experimentální vyšetření kapacitních vlastností 6-2, 6-3, 6-4, 6-5, 6-6, 6-7, 6-8, 6-9, 6-10, 6-11, 6-14, 6-20, 6-21, 6-22, 6-23, 6-25, 6-26, 6-27, 6-28, tekutinových mechanismů. VŠST - Ostrava, ČSVTS, Praha 1980
- /3/ CERHA, J. : Příspěvek k problematice hydrostatických mechanismů se střídavým proudem kapaliny jedno- a dvoufázových. (kandidátská disertační práce), VŠST - Liberec 1981

2) Výkres VI - 01

Poznámka k výkresu VI - 01

- /4/ HASTA, T.M. : Masinostrojitelnaia gidravlika. Moskva 1963
- /5/ ČARUJI, I.A. : Neustanovivšajaia švivenie realnoji šidkosti v trubach. M : Měda - 1975
- /6/ ČSN 63 5305 : Pryžové hadice - všeobecná ustanovení a zkoušení. 1969
- /7/ DRÁŽDIL, M. : Základy elekt-hydraulických analogií. VŠB - Ostrava 1966
- /8/ DRÁŽDIL, M. : Dynamická syntéza hydraulických mechanismů z typizovaných prvků (kandidátská disertační práce) ČVUT - Praha 1968
- /9/ ERNEST, V.J. : Experimentální sjišťování objemových změn hadicového vedení. DP - VS - 190/81 VŠST - Liberec
- /10/ FISCHER, J. : Experimentální výkres dynamických vlastností kapaliny v potrubí. 1975 Strojírenství 8.8 - 1977
- /11/ FRANTA, I. a kolektiv : Zpracování kaučukových směsí a vlastností pryže. 2. vyd. SNTL - Praha 1969
- /12/ HANUŠ, B. ; BALDA, M. : Základy technické kybernetiky VŠST - Liberec 1979
- /13/ HAYWARD, A.T.J. : How to estimate the bulk module

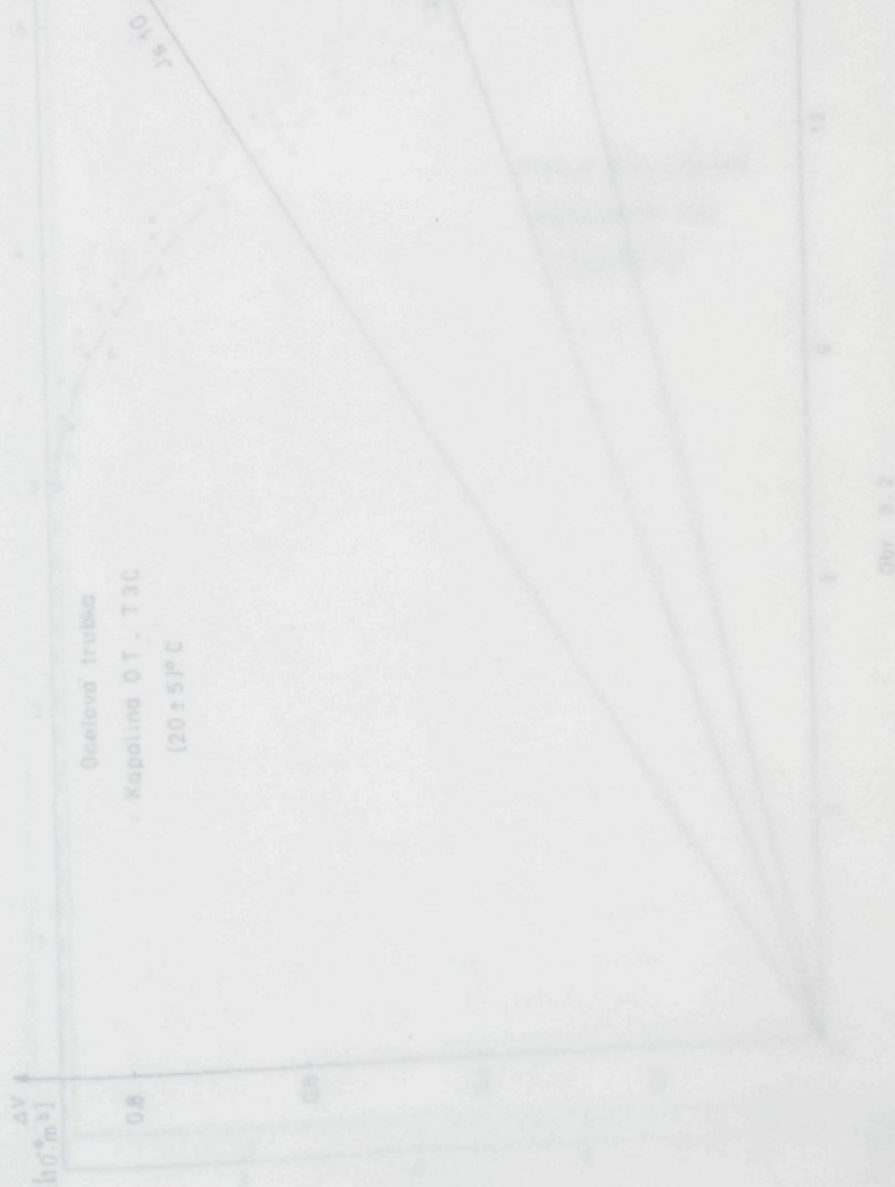
Seznam použité literatury

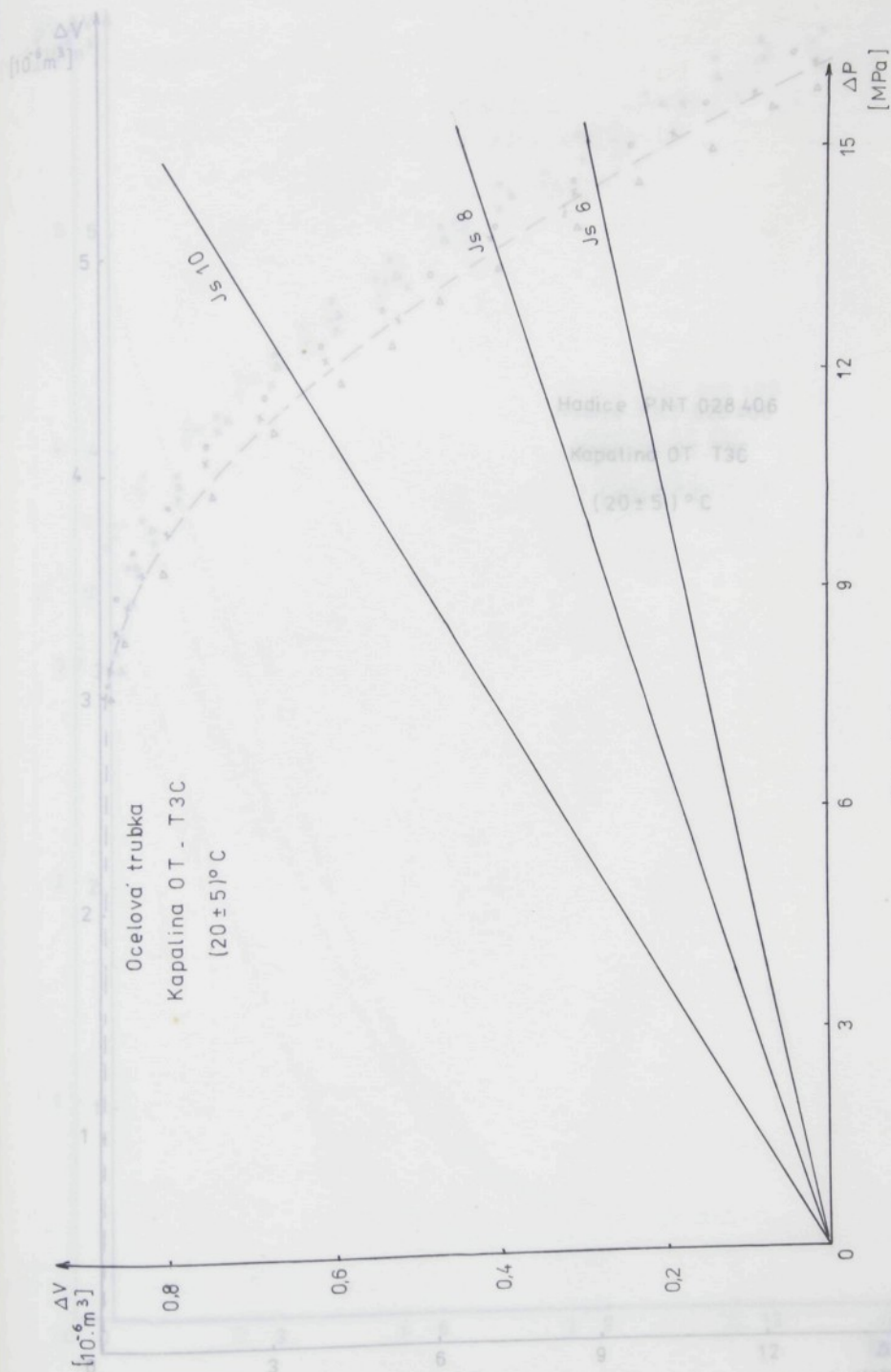
- /1/ CERHA, J. : Hydraulické mechanismy v oboru výrobních strojů. VŠST - Liberec 1971
- /2/ CERHA, J. : Experimentální vyšetření kapacitních vlastností hadicového vedení. In : IX. konference o tekutinových mechanismech, K. Vary - Ostrava, ČSVTS, Praha 1980
- /3/ CERHA, J. : Příspěvek k problematice hydrostatických mechanismů se střídavým proudem kapaliny jedno-- a dvoufázových. (kandidátská disertační práce), VŠST - Liberec 1981
- /4/ BAŠTA, T.M. : Mašinstrojitel'naja gidravlika. Moskva 1963
- /5/ ČARUJI, I.A. : Neustanovivšejesia dviženie realnoji židkosti v trubach. M : Nėdra - 1975
- /6/ ČSN 63 5305 : Pryžové hadice - všeobecná ustanovení a zkoušení. 1969
- /7/ DRÁŽDIL, M. : Základy elektrohydraulických analogií. VŠB - Ostrava 1966
- /8/ DRÁŽDIL, M. : Dynamická synthesa hydraulických mechanismů z typisovaných prvků (kandidátská disertační práce) ČVUT - Praha 1968
- /9/ ERNEST, V.J. : Experimentální zjišťování objemových změn hadicového vedení. DP - VS - 190/81 VŠST Liberec
- /10/ FISCHER, J. : Experimentální výzkum dynamických vlastností kapaliny v potrubí. - 1975 Strojírenství č.8 - 1977
- /11/ FRANTA, I. a kolektiv : Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti pryže. 2. vyd. SNTL - Praha 1969
- /12/ HANUŠ, B. ; BALDA, M. : Základy technické kybernetiky VŠST - Liberec 1979
- /13/ HAYWARD, A.T.J. : How to estimate the bulk moduls

- /27/ of hydraulis fluids. Hydraulis pneumatic power, 1970
- /14/ HUDCOVSKÝ, F. : Objemová pružnost kapalin. 1970
Hydraulika č.3 - 1976
- /15/ KOLEKTIV : Dny nové techniky o výrobě a použití hadic
ČSVTS - 1978
- /16/ KOPÁČEK, J. : Objemový modul pružnosti pryžových
hadic. Strojírenská výroba č.12 - 1980
- /17/ KOŽEŠNÍK, J. : Kmitání mechanických soustav.
Praha - 1979
- /18/ MÁŠEK, J. : Zjišťování dynamických vlastností hadi-
cového vedení. DP - VS - 372/81 VŠST - Liberec
- /19/ OLEHLA, M. ; TÍŠER, J. : Použití FORTRANu v praxi.
VŠST - Liberec 1972
- /20/ PAVLÍČEK, Z. : Teoreticko-experimentální vyšetření
kapacitních vlastností hadicového vedení.
DP - VS - 179/80 - VŠST Liberec
- /21/ PAVLUCH, L. : Nestacionární proudění kapaliny v po-
trubí. Strojírenství č.4 - 1971
- /22/ PONOMAREV, S.D. : Rasčety rezinovykh i rezinokordnykh
detalej. In : Rasčety na pročnosť v mašinostrojenii
Moskva 1958
- /23/ PROKEŠ, J. : Hydraulické mechanismy.
ČVUT - Praha 1972
- /24/ PROKEŠ, J. : Možnosti syntézy hydraulických mecha-
nismů s použitím samočinného počítače.
Hydraulika č.5 - 1975
- /25/ PROKOFJEV, V.N. : Vlijanie deformaci židkosti na
dynamiku gid-oprívoda. Vestnik mašinostrojenia
č.6 - 1973
- /26/ ROMAN, N.M. : Analiz dynamičeskych procesov v sostav-
nom truboprovodě. Prikladnaja mechanika č.11-1981

- /27/ RŮŽIČKA, M. : Řešení základních rovnic hydraulické dynamiky. Strojírenství č.2 - 1970 odborné
- /28/ SCHAEDEL, H. : Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Leitungen und konzentrierten Bauelementen der Fluidik. Dissert. an der RWTH Aachen 1968
- /29/ ŠPAČEK, L. : Základní rovnice hydrodynamiky. Strojírenství č.1 - 1970
- /30/ ŠUSTR, R. : Experimentální vyšetření odporu proti deformaci hydraulického vedení, zejména hadicového. DP - VS - 169/79 VŠST Liberec
- /31/ TIMOŠENKO, Š. : Kmitání ve strojírenství SNTL - Praha 1960
- /32/ TŮMA, M. : Experimentální vyšetření odporu proti deformaci hadicového vedení. DP - VS - 158/78 VŠST - Liberec
- /33/ VICENT, G.M. : What is bulk modulus and when is it important ? Hydraulic pneumatics, November 1969
- /34/ ZYMÁK, V. : Přenosové matice hydraulických potrubí Automatizace č.6 - 1970
- /35/ ZYMÁK, V. : Vliv počátečních podmínek na přenosové poměry hydraulických potrubí. Automatizace č.6 - 1971
- /36/ ZYMÁK, V. : Dynamika hydraulických obvodů a metody jejich řešení. Strojírenství č.1 - 1972
- /37/ ZYMÁK, V. : Dynamické charakteristiky hydraulického potrubí s oscilačním průtokem. Strojnický časopis č.5 - 1974
- /38/ ZYMÁK, V. : Rezonance potrubí s jednou charakteristikou a jednoduchými okrajovými podmínkami. Celostátní konference o hydraulických mechanismech ČSVTS - Praha
- /39/ ZYMÁK, V. : Potrubí s oscilačním průtokem kapaliny. Strojírenství č.4 - 1977

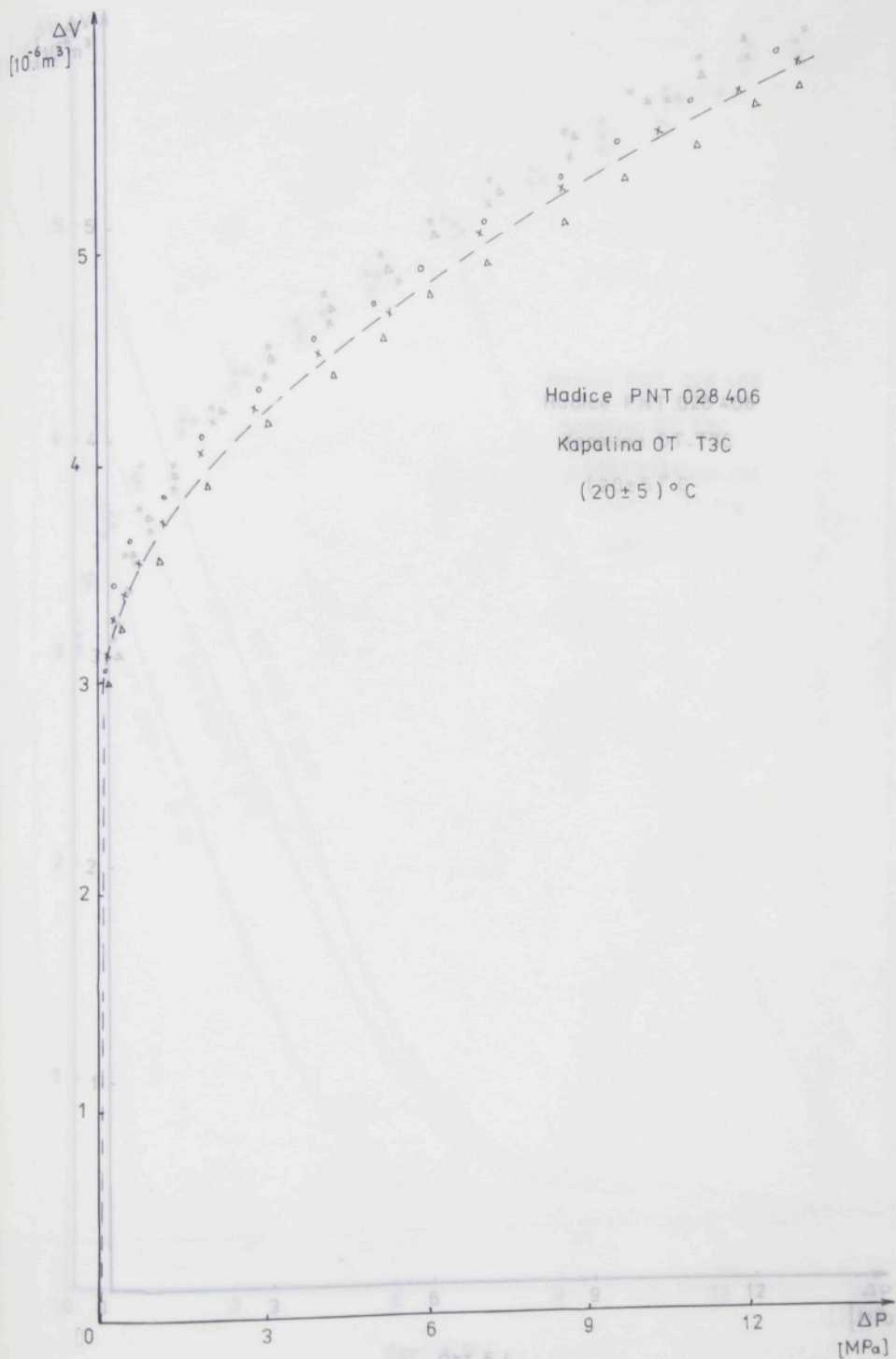
- /40/ DAO-QUANG-NGHIEM : Základní vlastnosti vedení užitého
v hydraulických mechanismech. (písemná část odborné
zkoušky kandidátského minima), VŠST - Liberec 1981
- /41/ PHAN-VAN-HAP : Co so phuong phap tinh
Nha xuat ban THVDHCN - Hanoi 1969

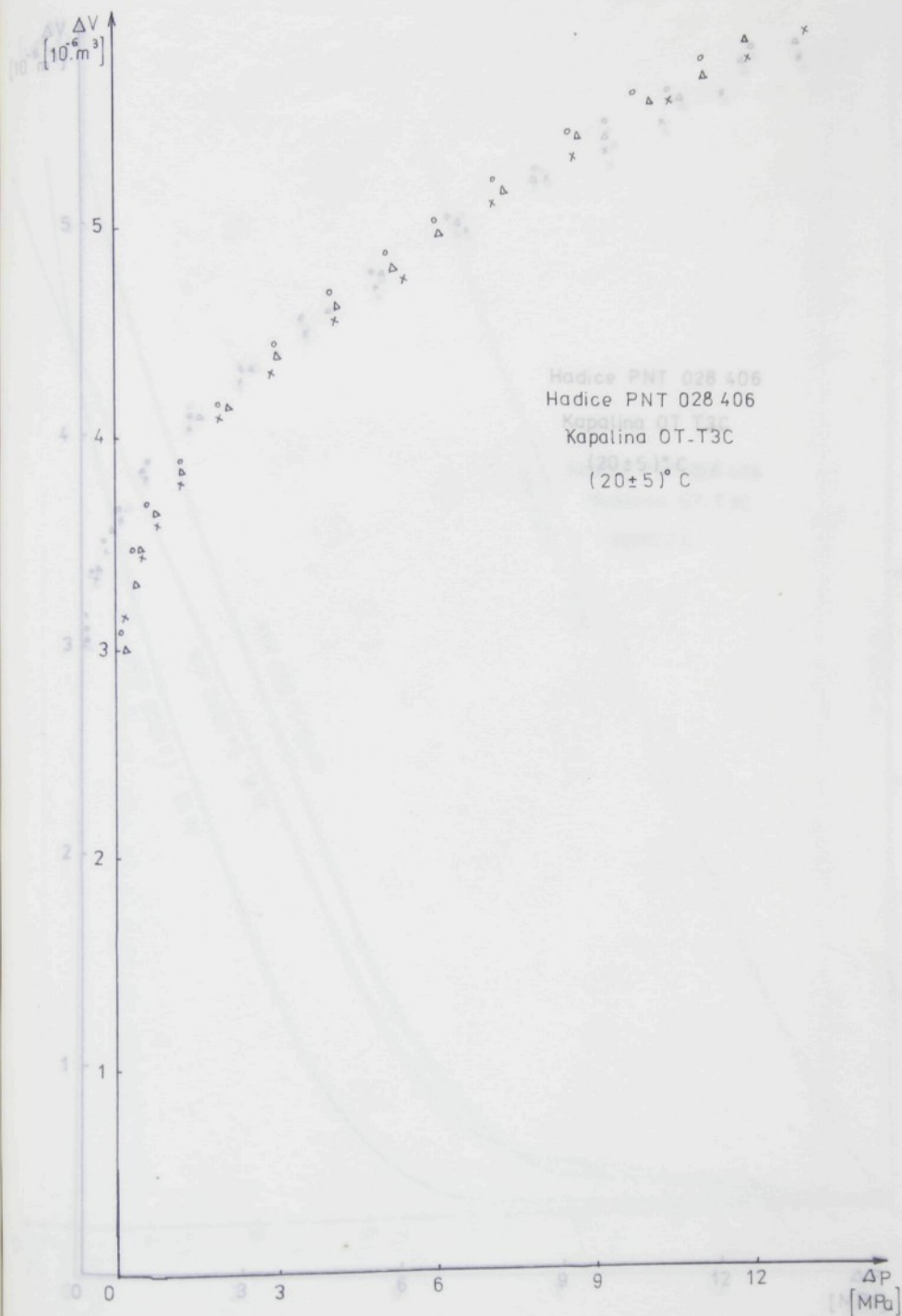


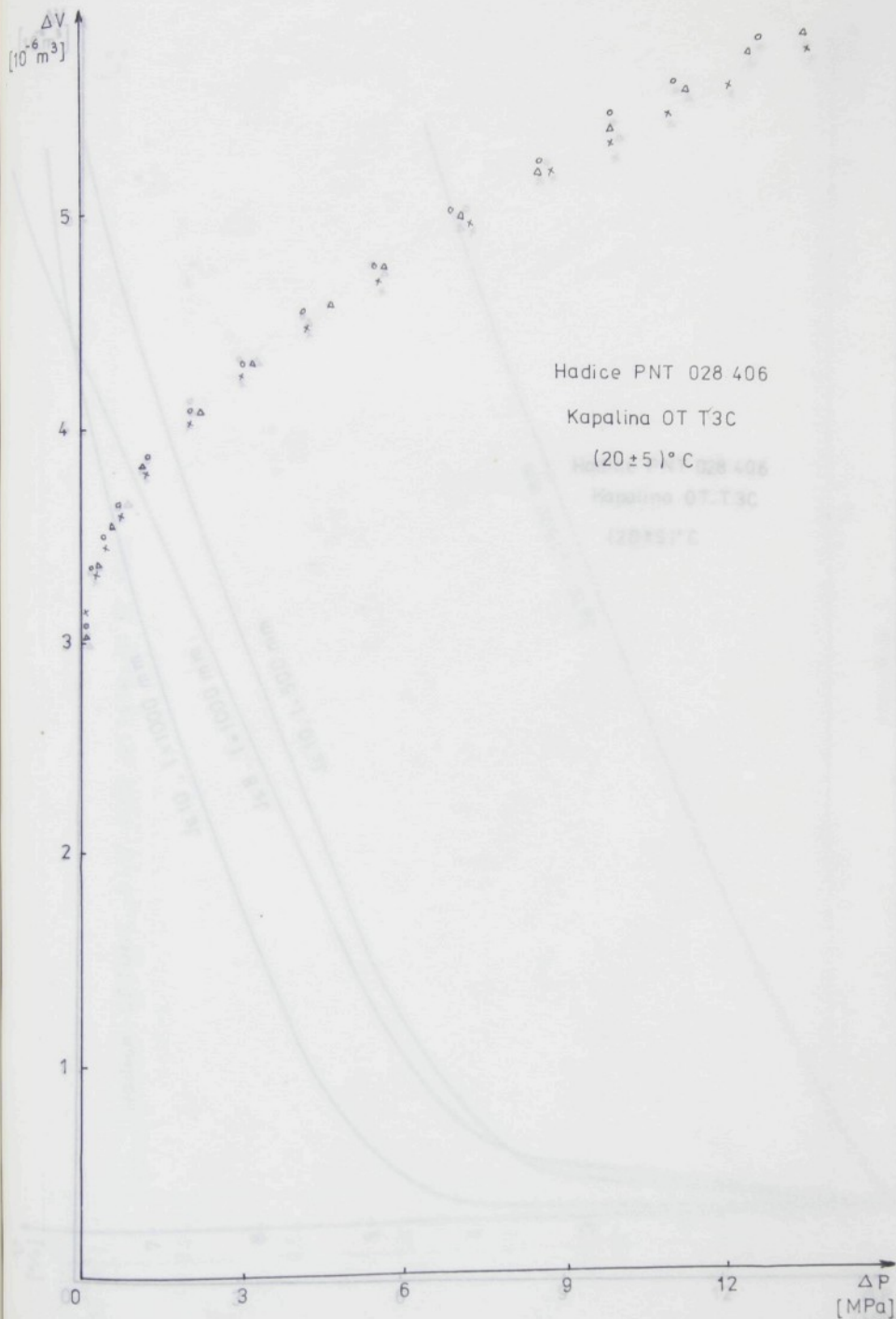


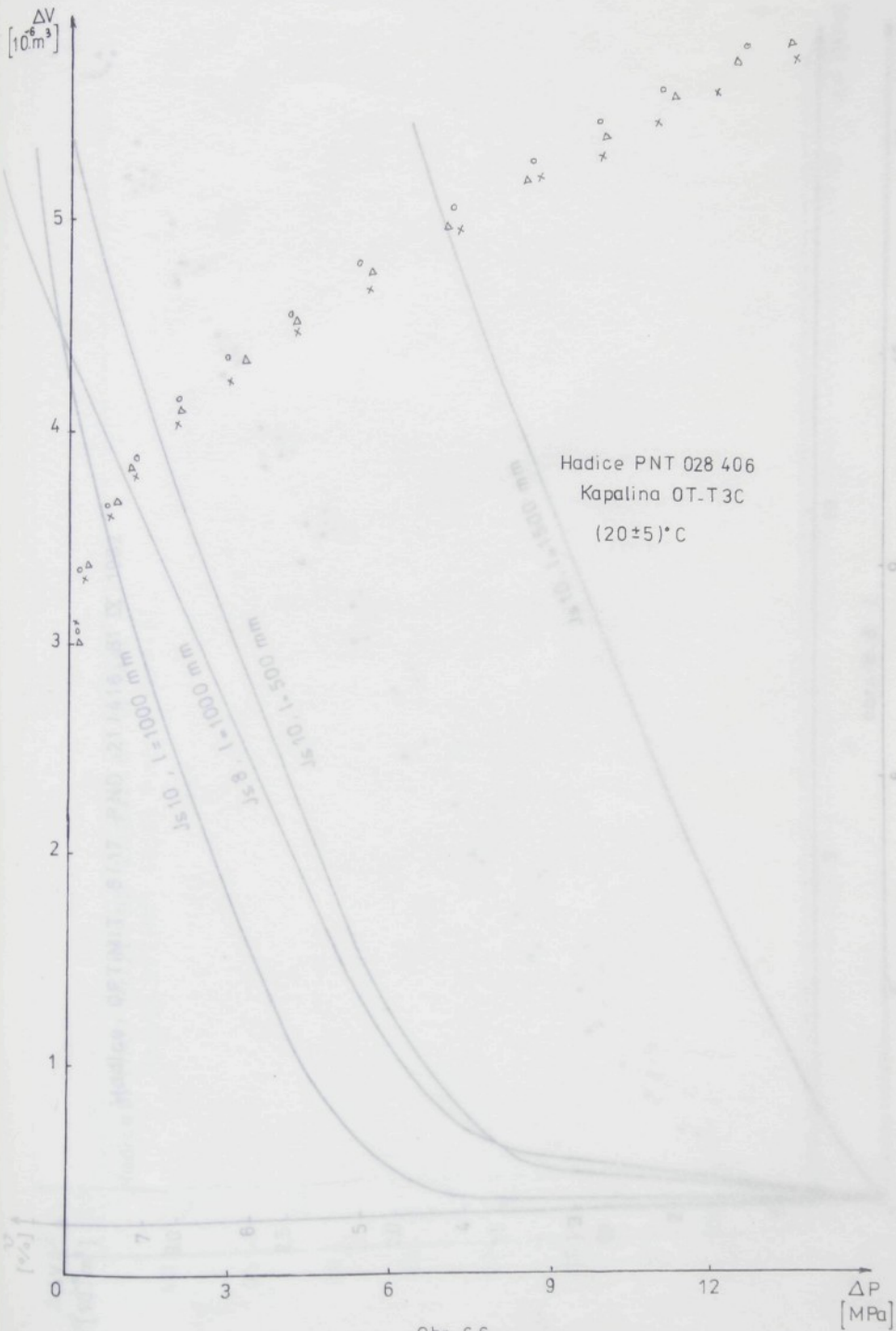
Obr. 6.2

Obr. 6.3

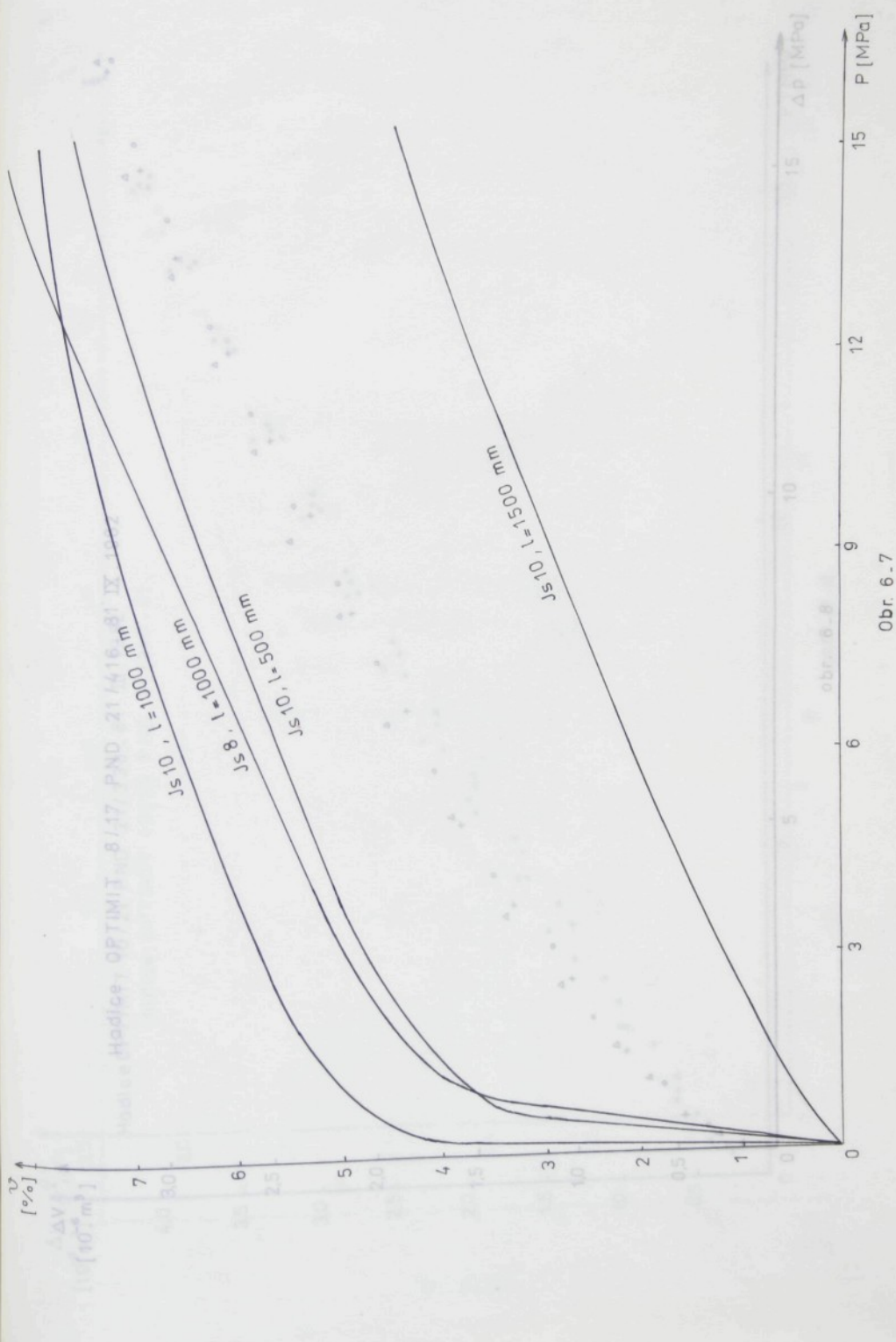


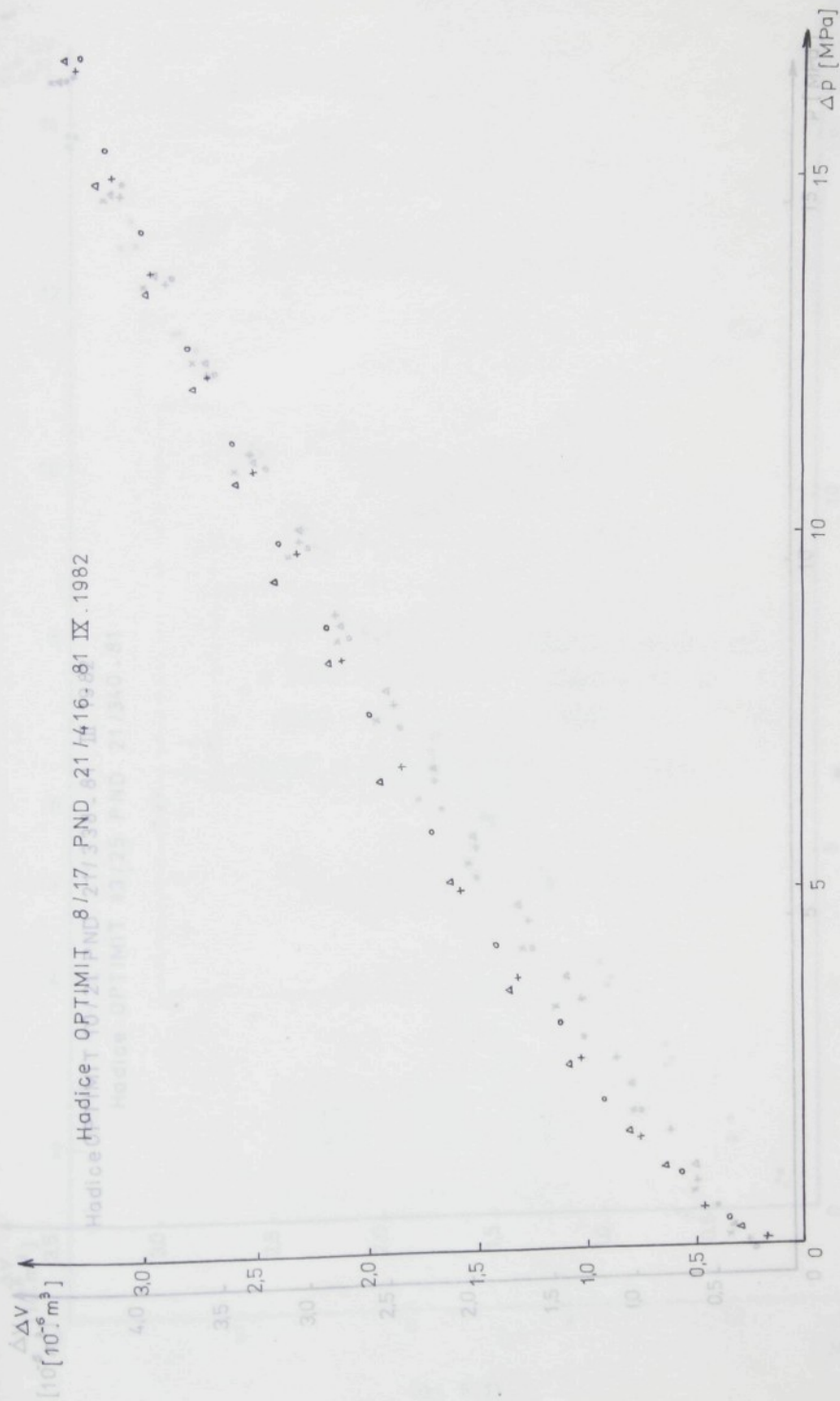


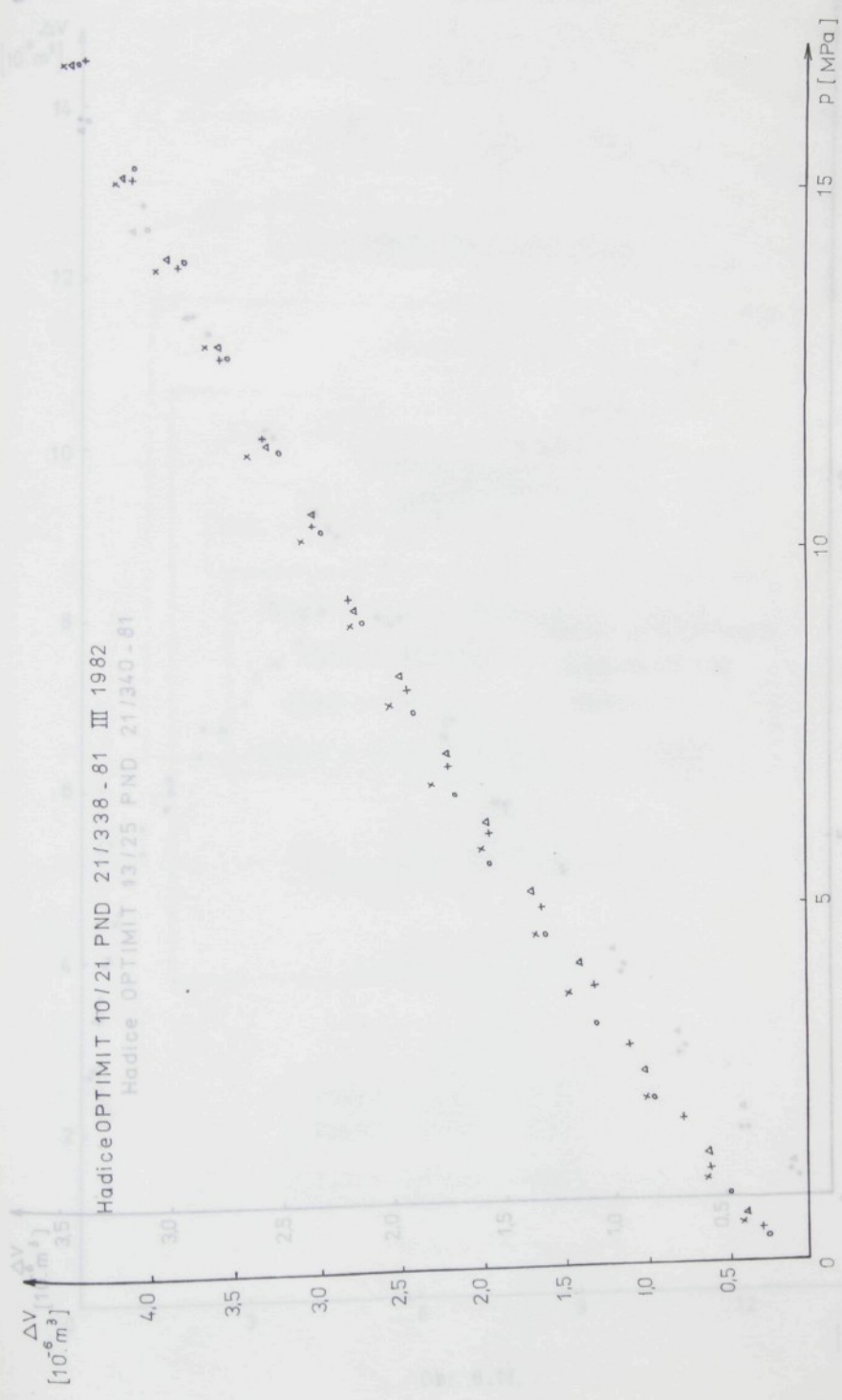




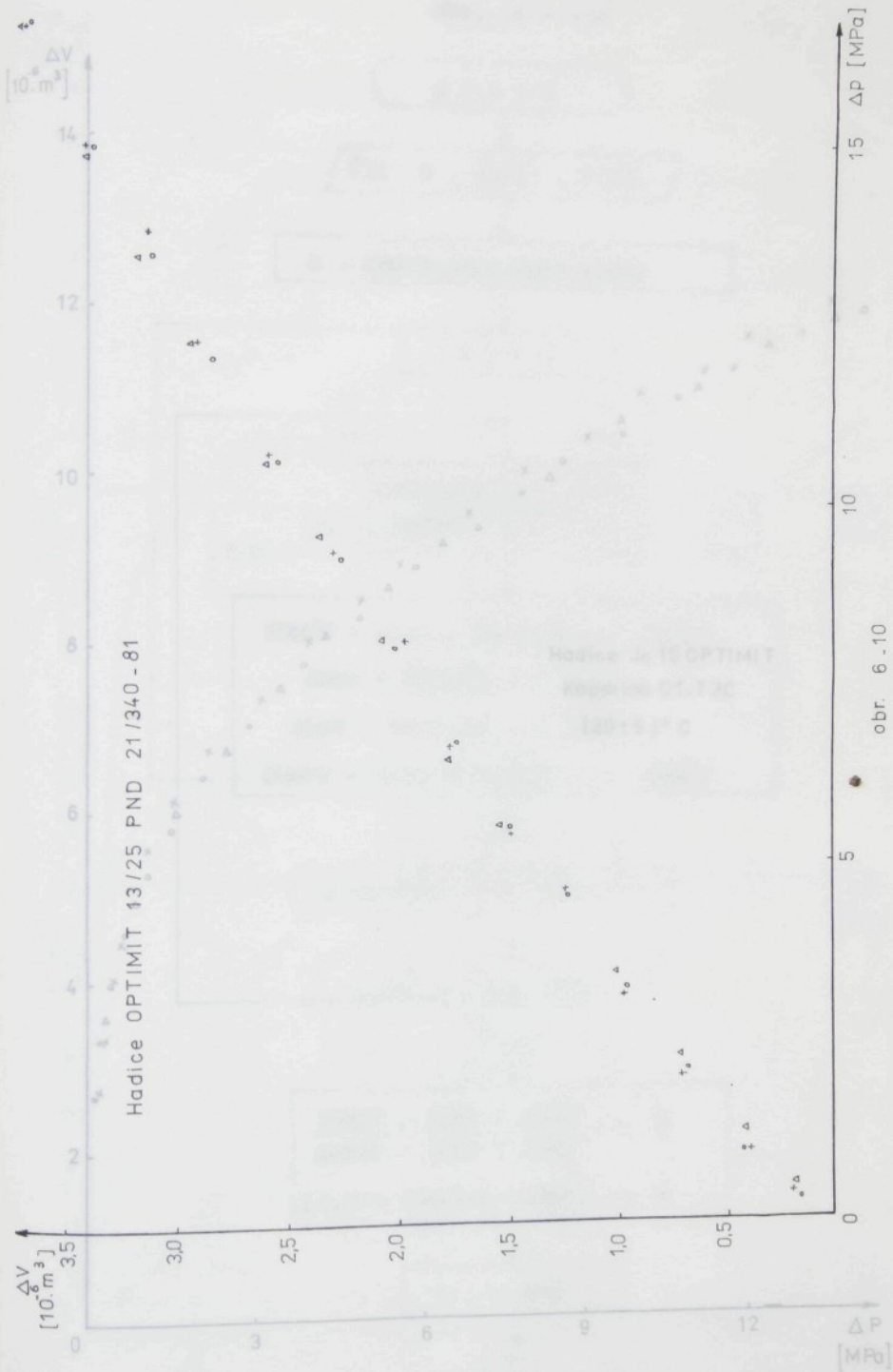
Obr. 6.6

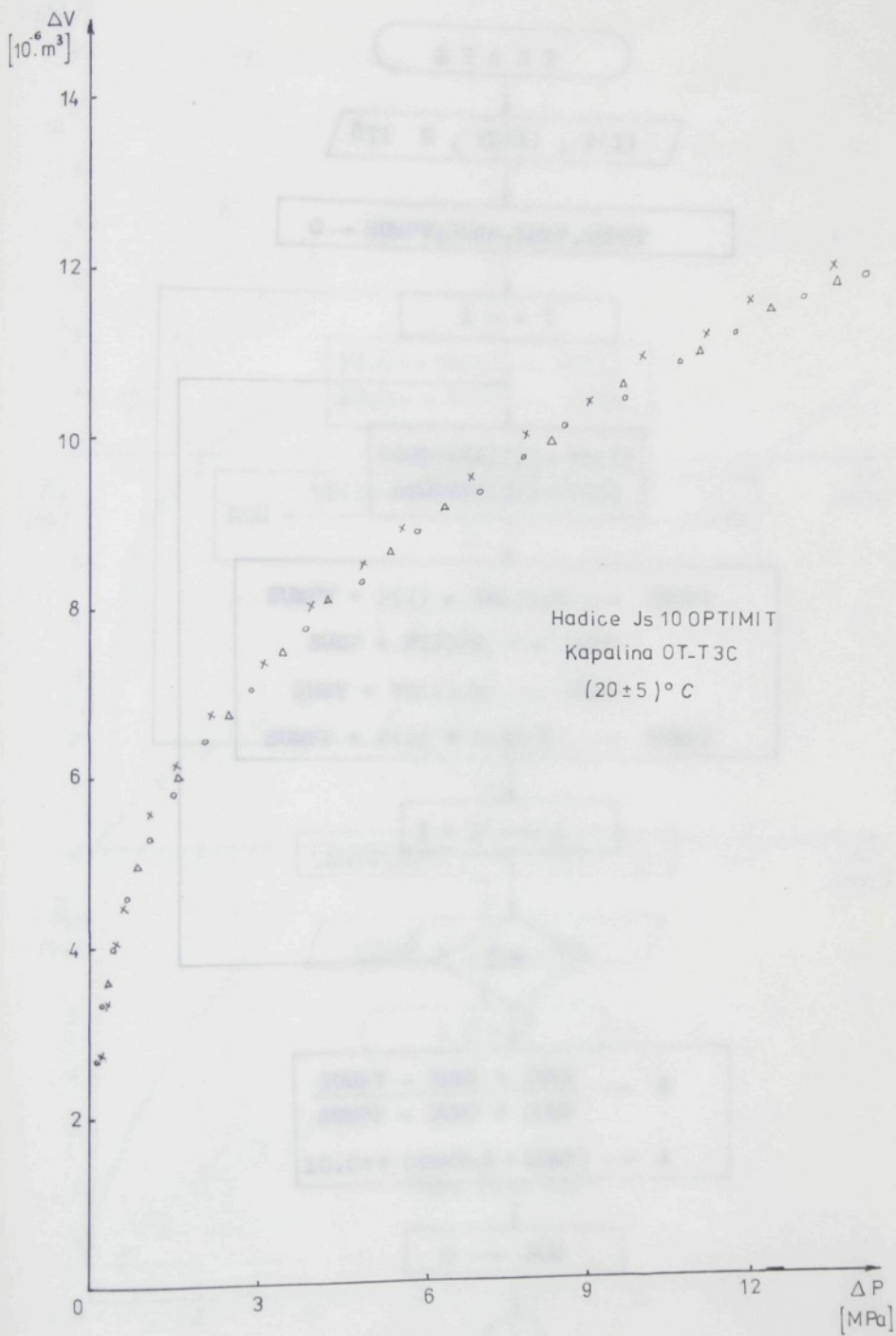


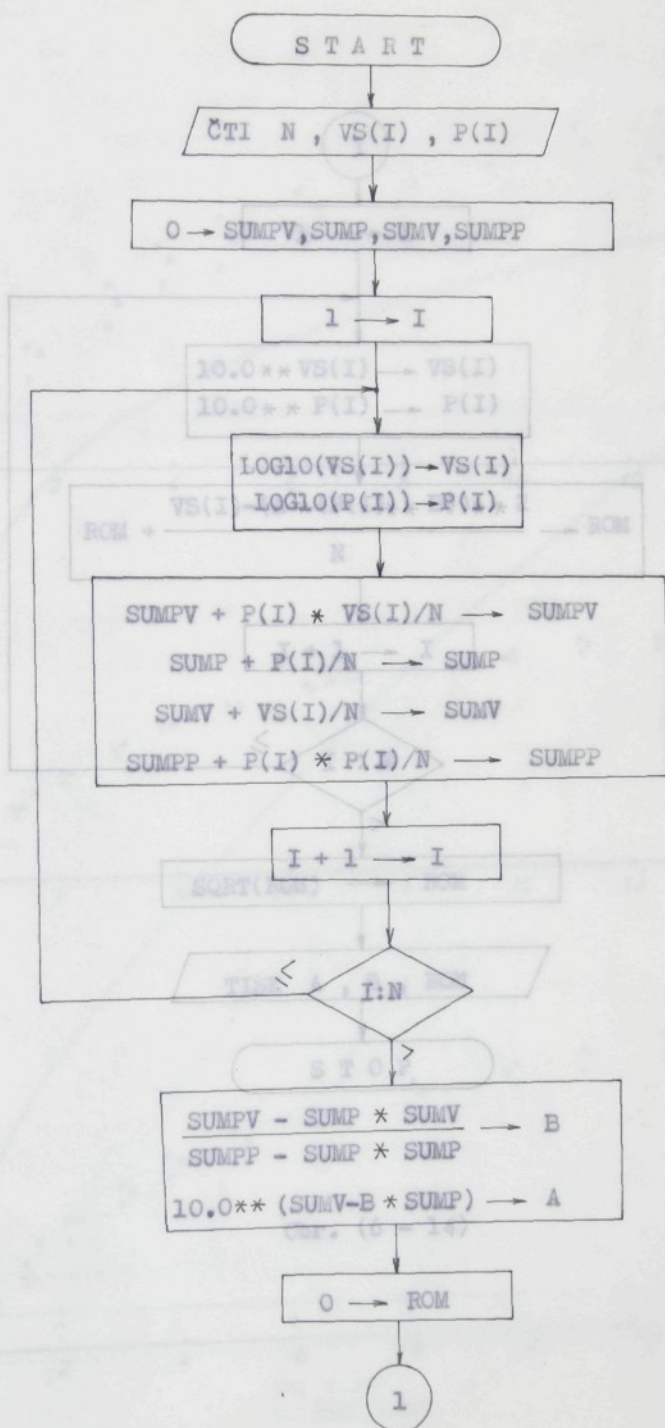


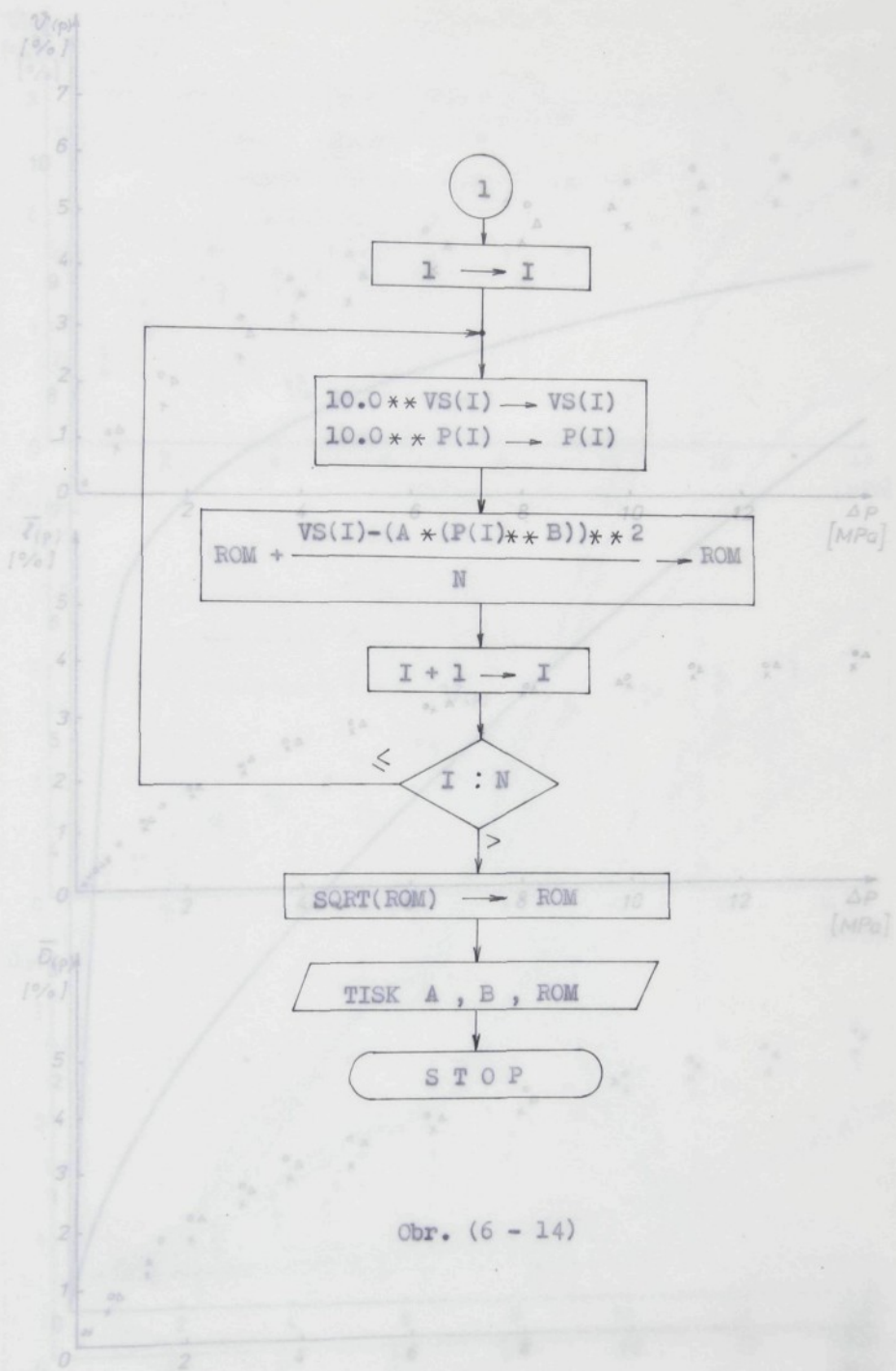


obr. 6-9

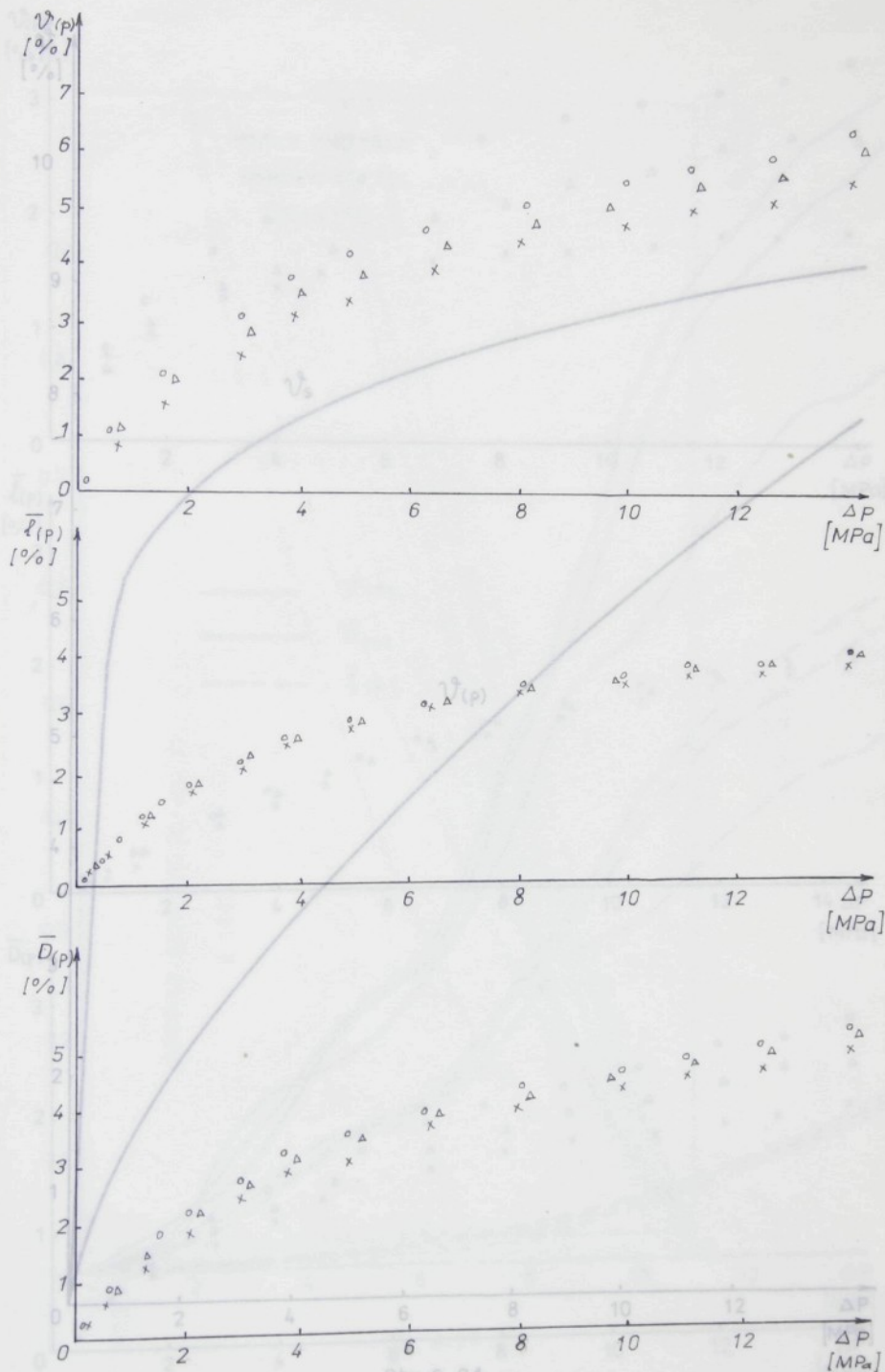






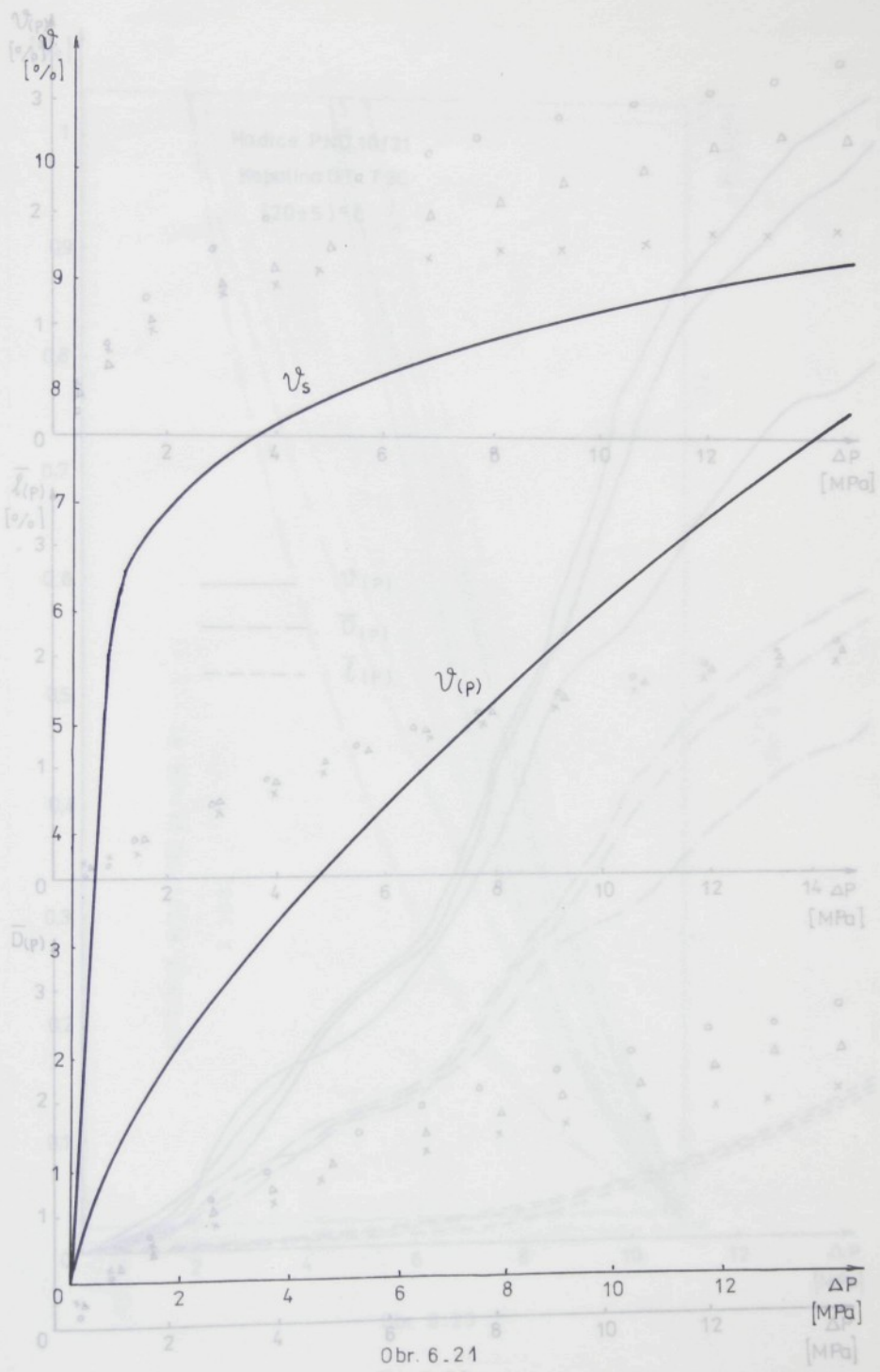


Obr. (6 - 14)

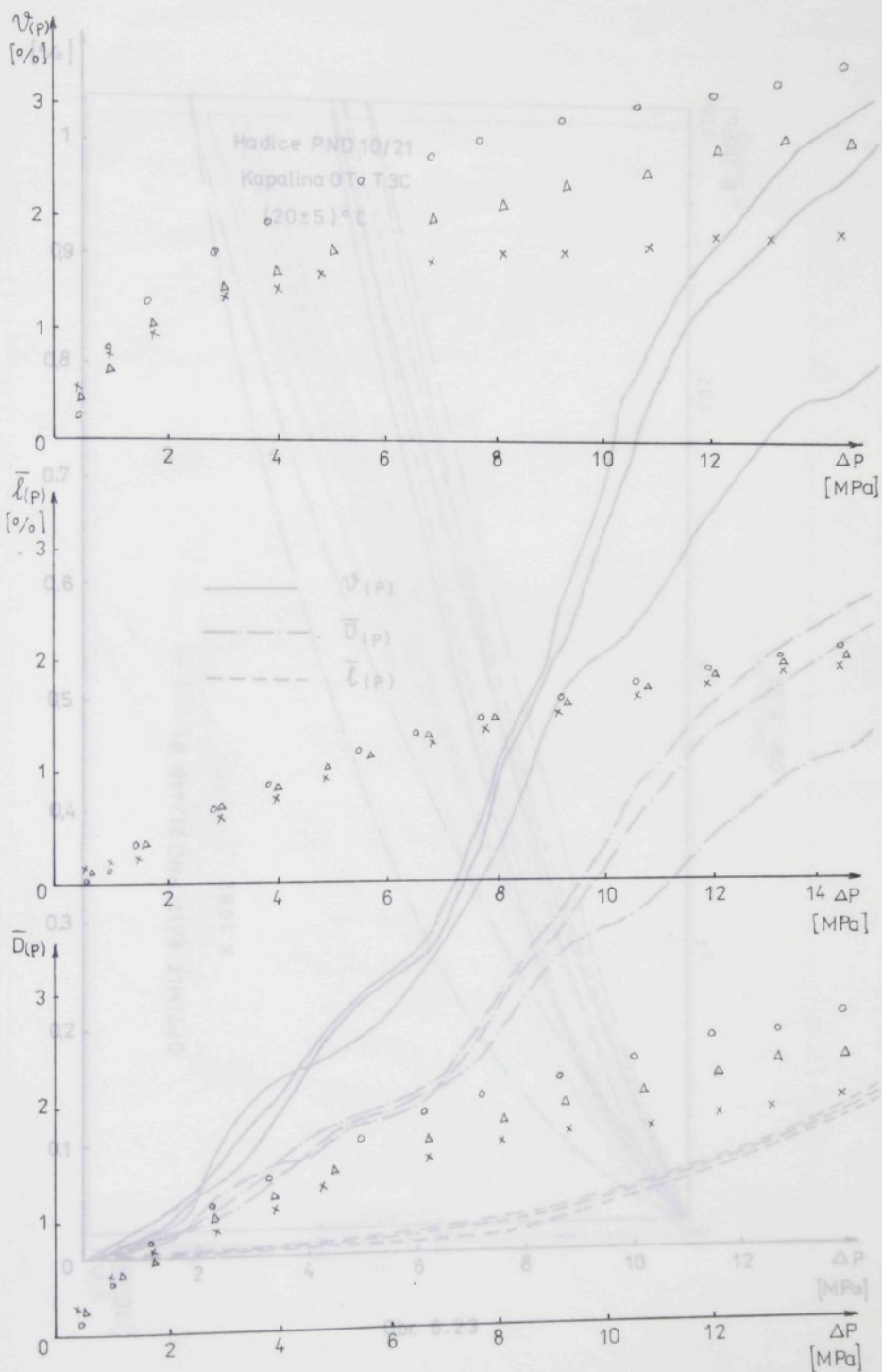


Qbr 6.21

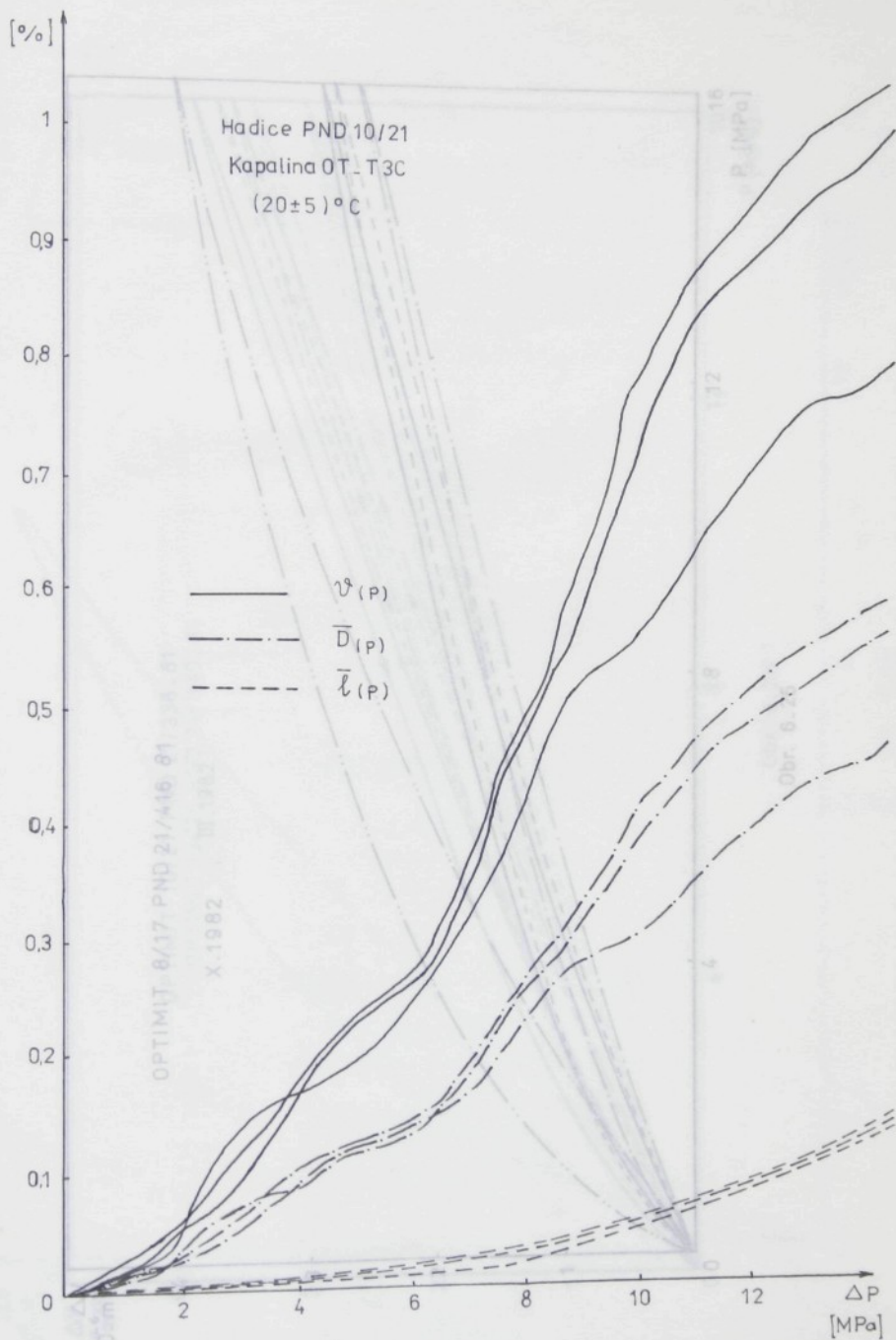
Obr. 6.20

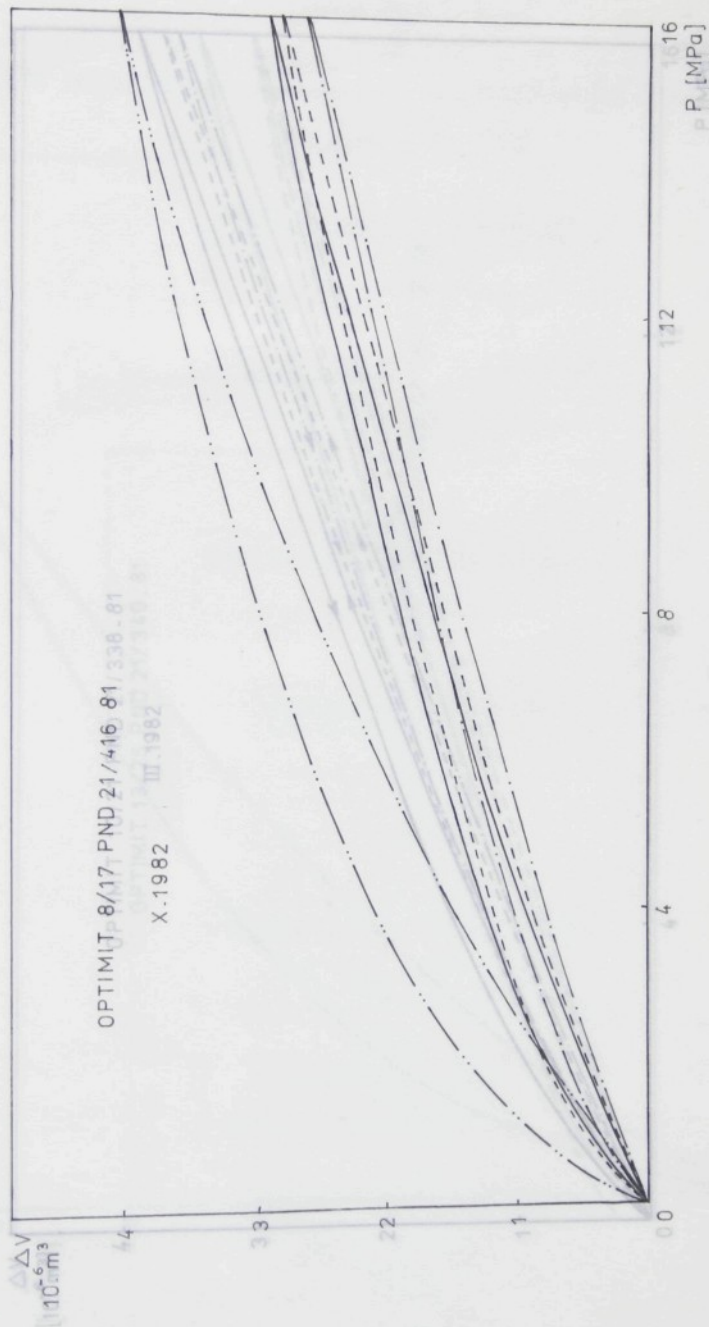


Obr. 6.21
Obr. 6.22

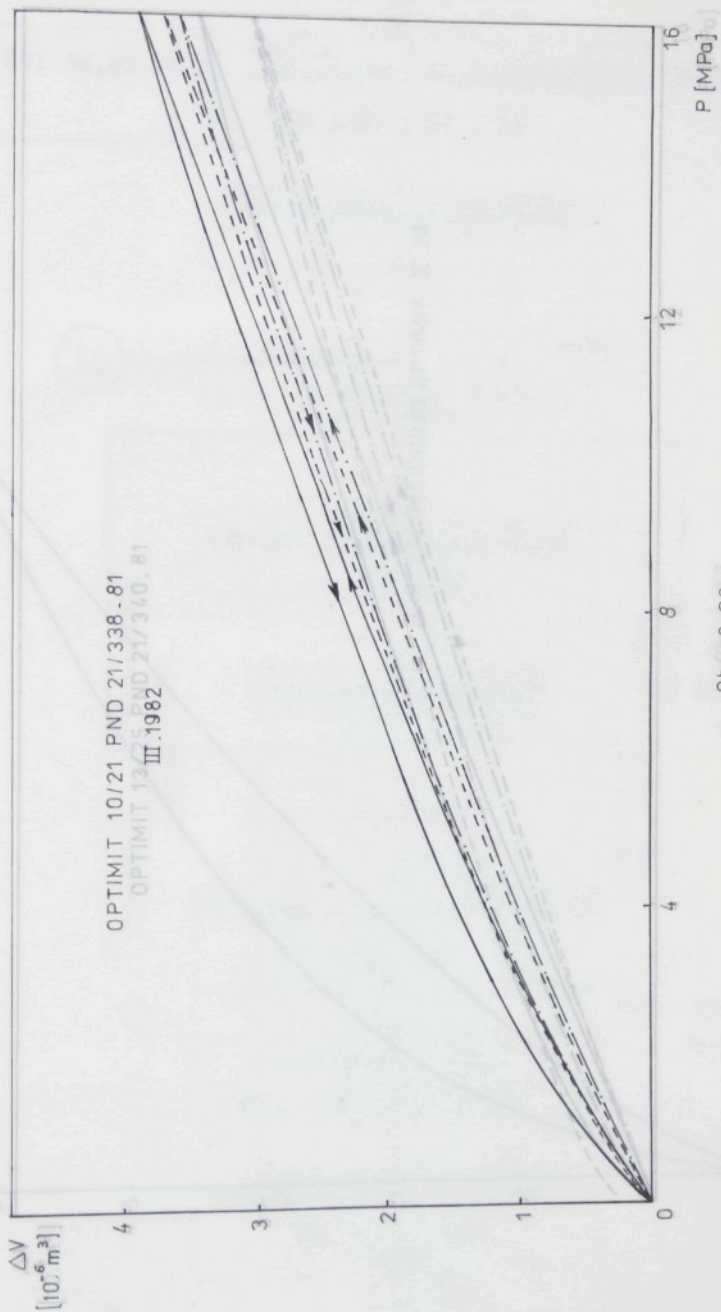


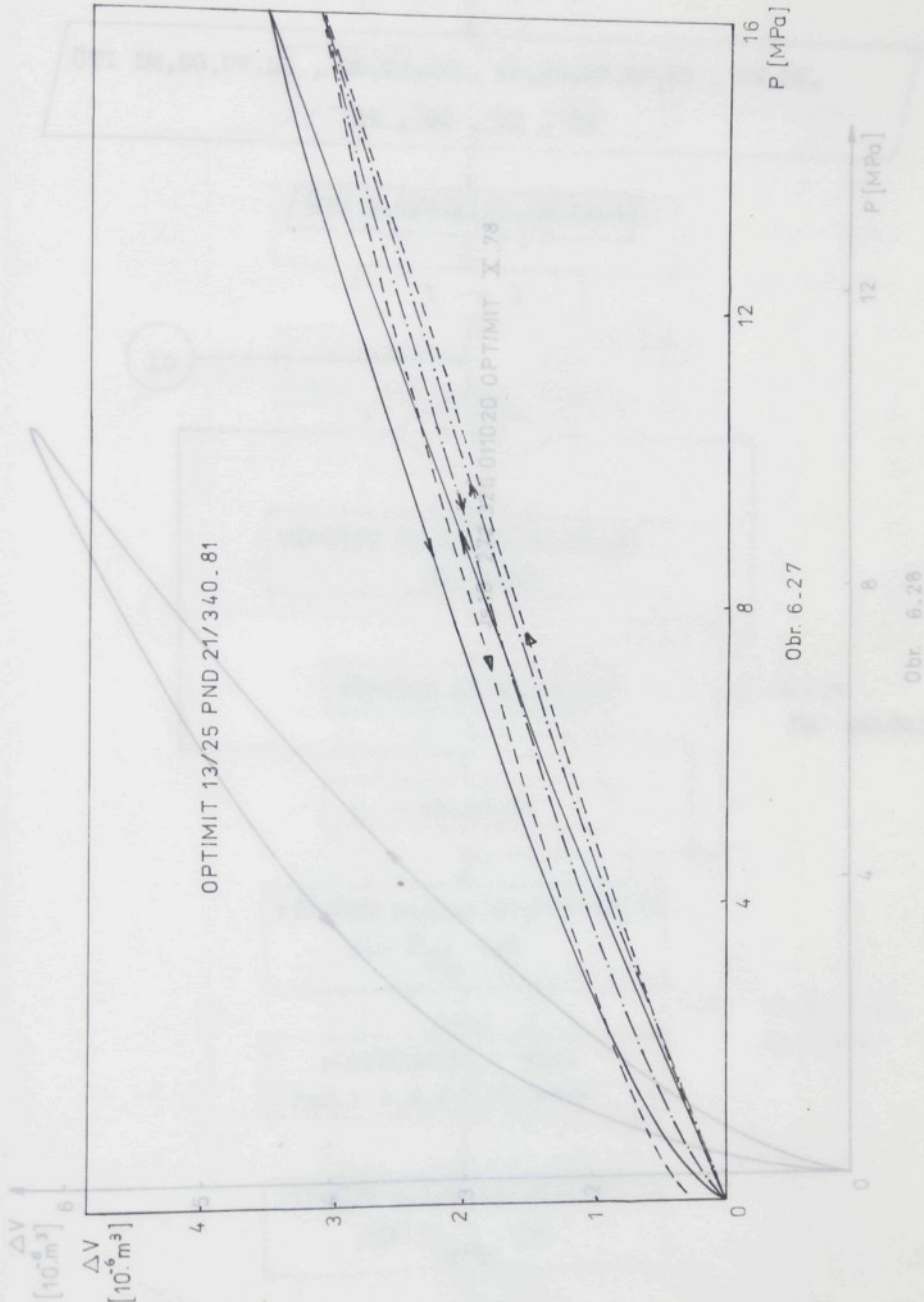
Обр. 6.22

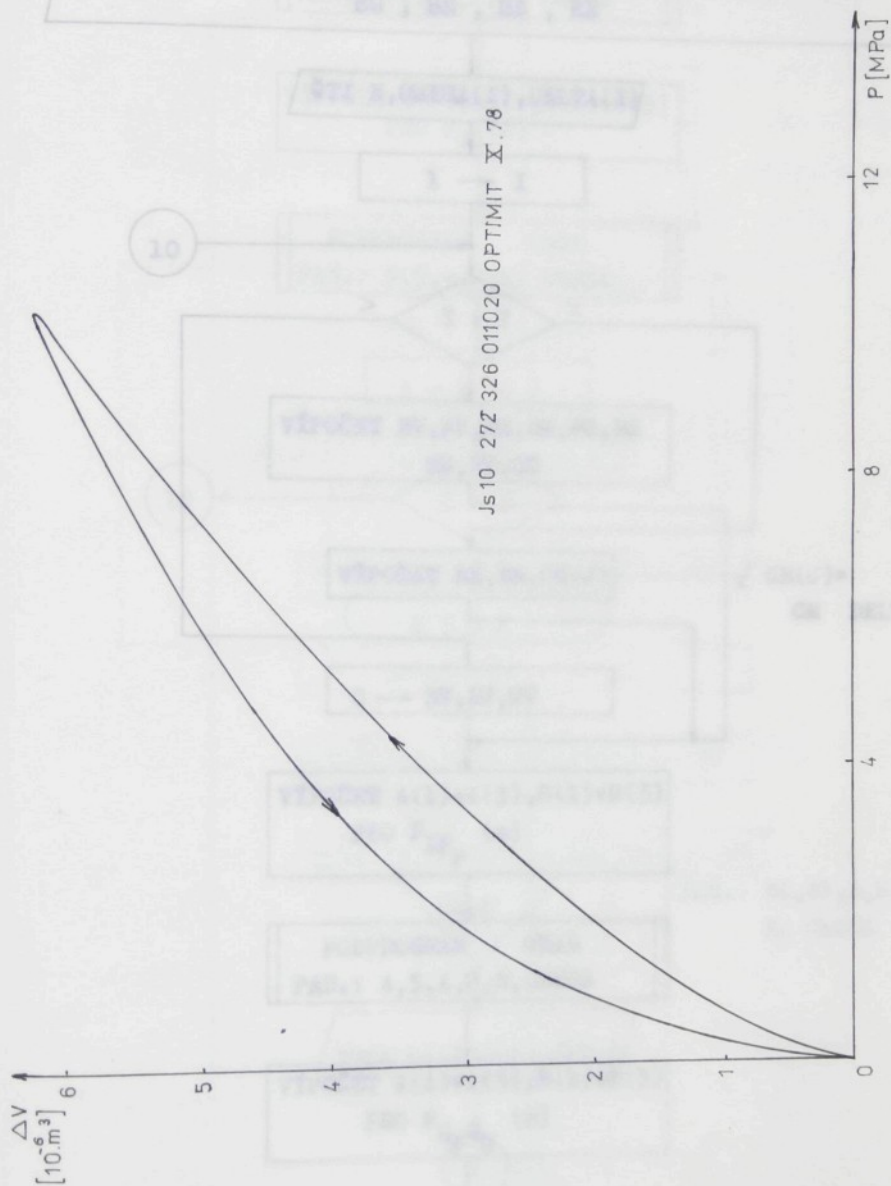




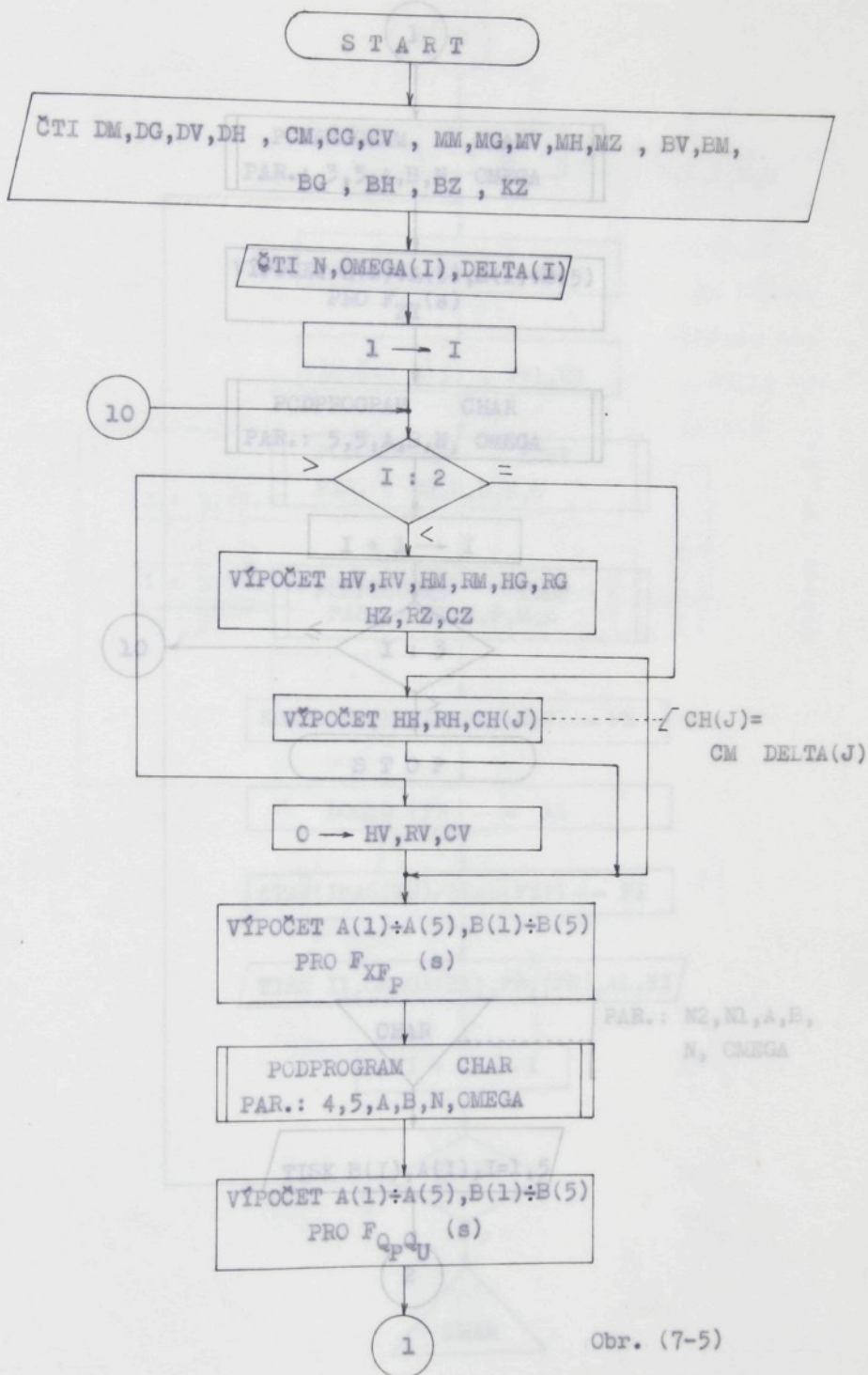
Obr. 6.25

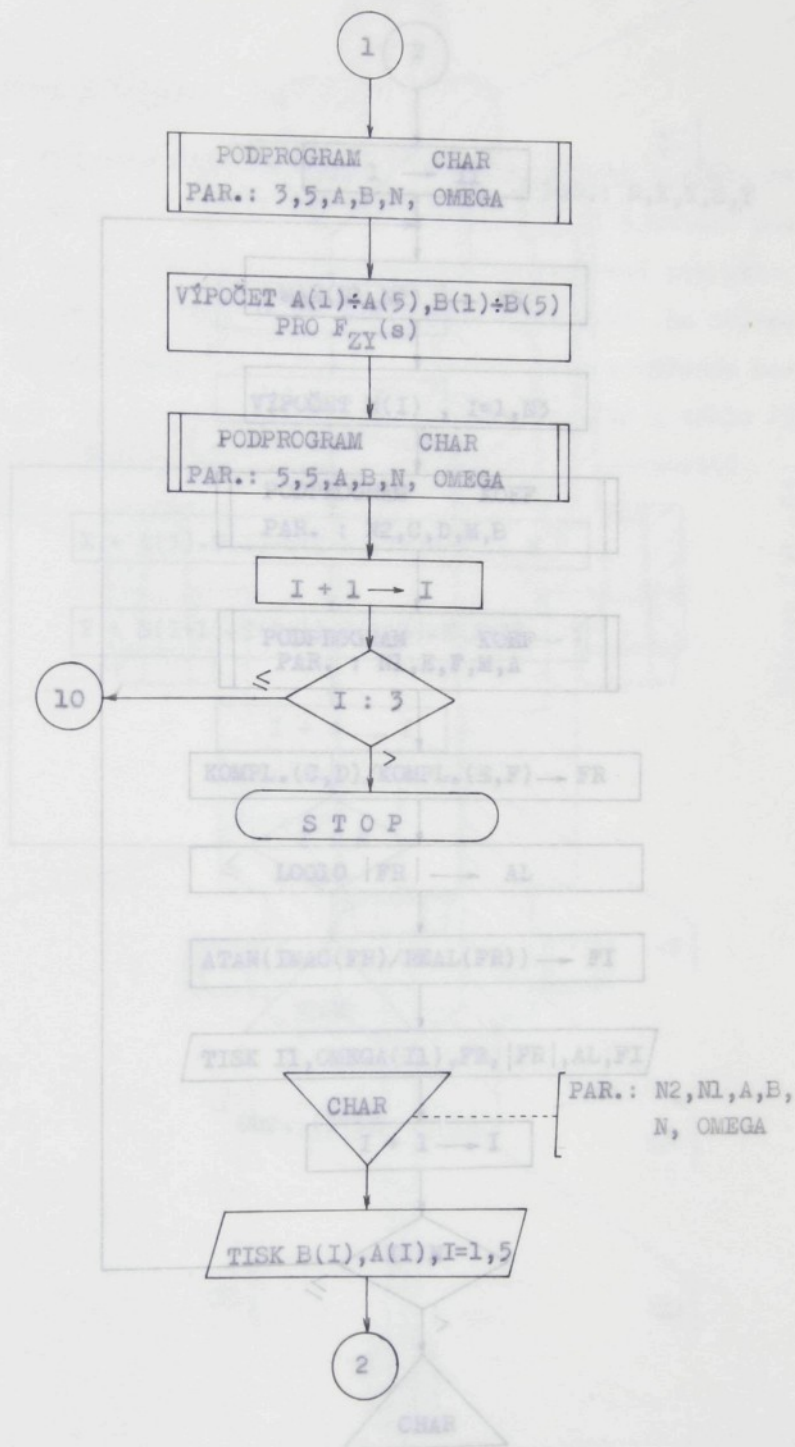


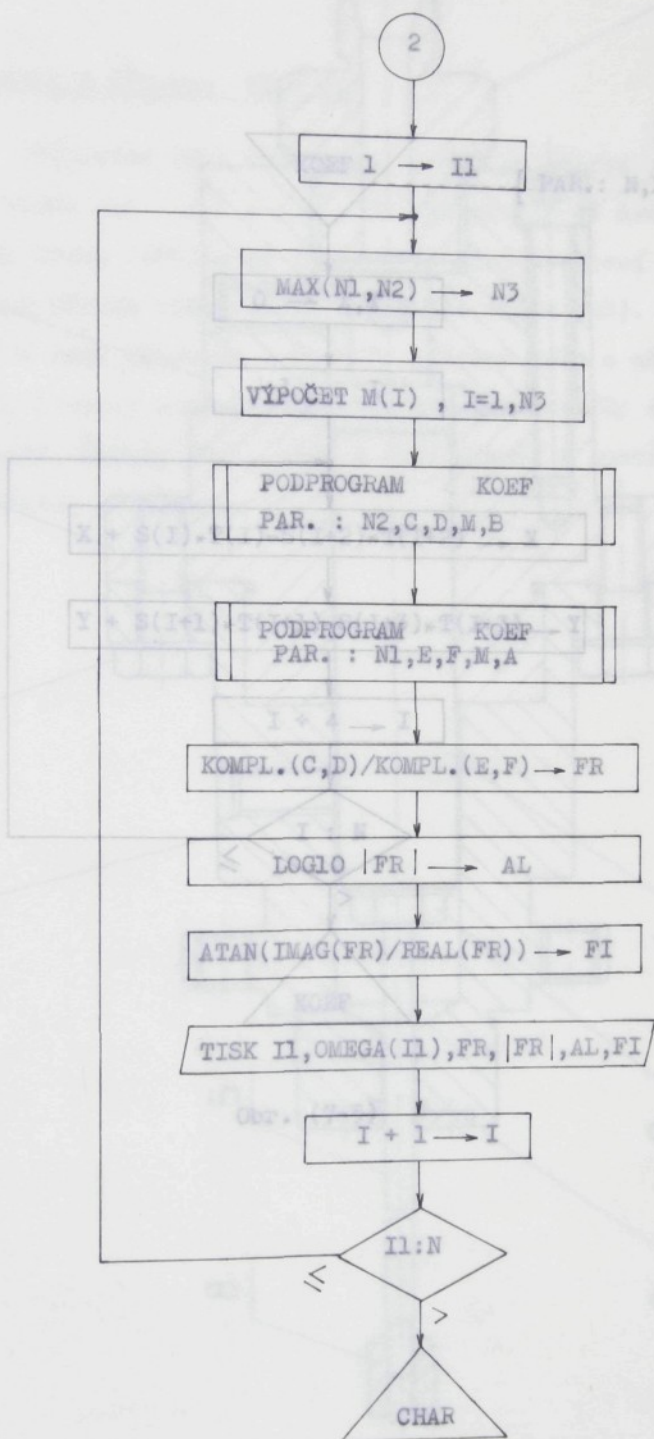


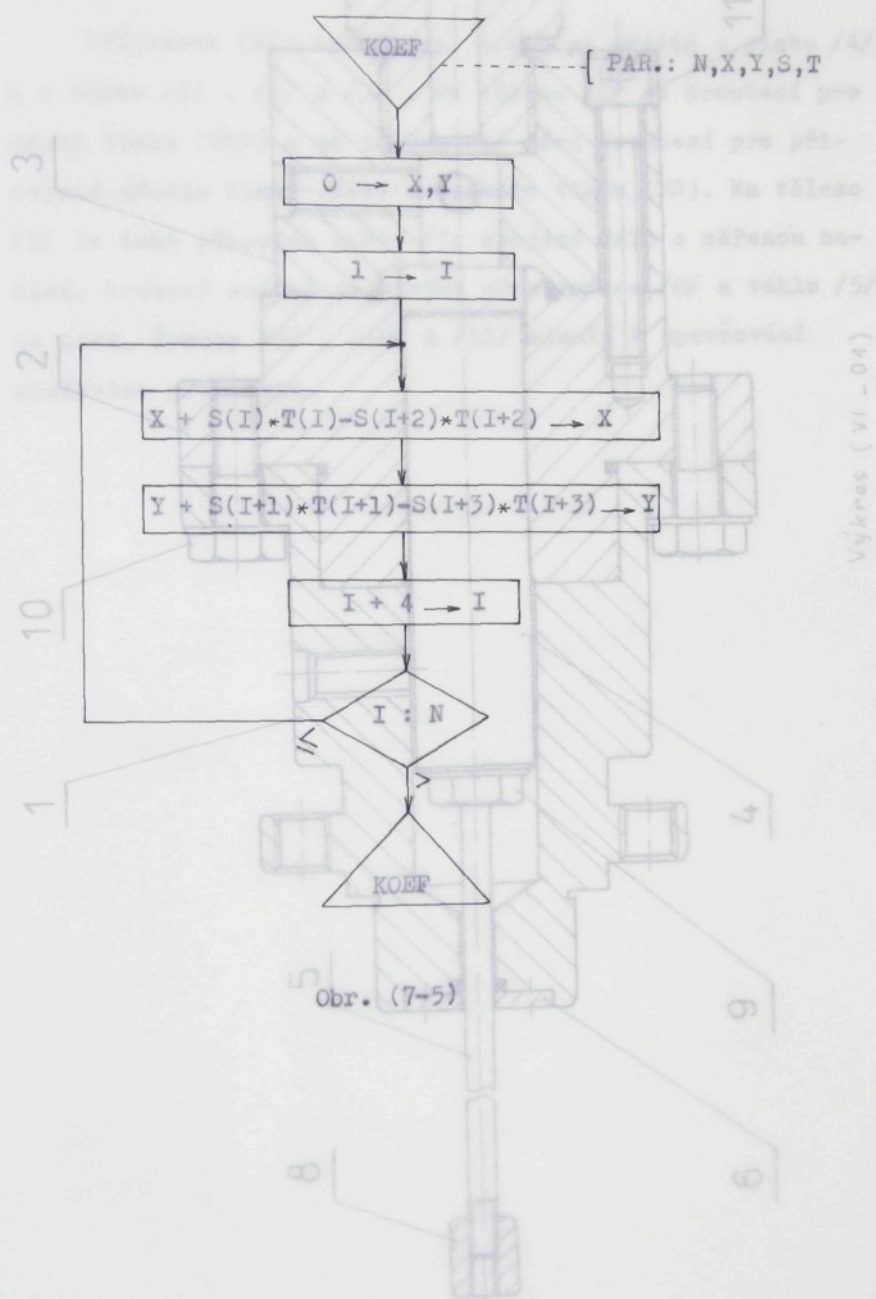


Js10 27Z 326 011020 OPTIMIT X.78



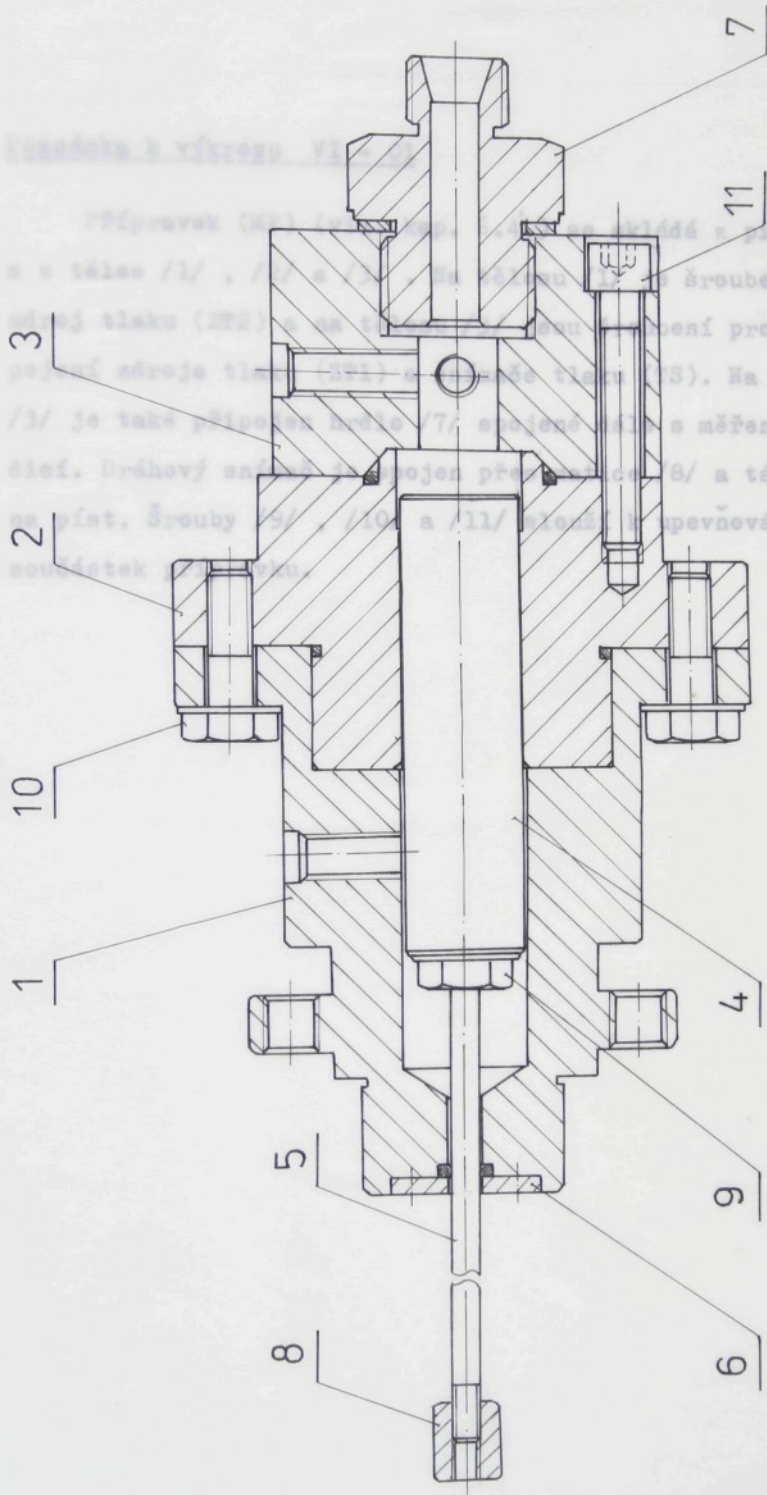






Výkres (VI - 04)

Obr. (7-5)



Výkres (VI - 01)

Poznámka k výkresu VI - 01

Přípravek (MP) (viz. kap. 6.4.) se skládá z pístu /4/, a z těles /1/ , /2/ a /3/. Na tělesu /1/ je šroubení pro zdroj tlaku (ZT2) a na tělesu /3/ jsou šroubení pro připojení zdroje tlaku (ZT1) a snímače tlaku (TS). Na těleso /3/ je také připojen hrdlo /7/ spojené dále s měřenou hadicí. Dráhový snímač je spojen přes matice /8/ a táhlo /5/ na píst. Šrouby /9/ , /10/ a /11/ slouží k upevňování součástí přípravku.