

MODEL OF HYDRAULIC DAMPER WITH BOTH AIR AND OIL VAPOUR CAVES

R. Svoboda*, J. Šklíba*

Summary: *An improved model of hydraulic damper supporting evolution of both air and oil vapor caves in working areas of the damper is at present based on presumption that concentration of the free and dissolved air has stabilized and remains henceforth constant. The meaning of this specifications consists partly in realization of better agreement with experimental results, partly in more correct determination of zones of dangerous vibrations.*

1. Úvod

Hydraulické tlumiče stále představují jeden ze základních nástrojů pro tlumení vibrací v dynamických systémech. Správné stanovení jejich tlumicích vlastností je proto nezbytnou podmínkou pro věrohodné modelování reálných dynamických soustav. Ve výpočetní praxi jsou tlumiče nahrazovány buď nepřímo a méně přesně rychlostními charakteristikami, nebo přímo matematickým modelem tlumiče jako dynamickým subsystémem. Matematický model je podrobnější a umožňuje navíc i samostatná řešení za účelem návrhu a vývoje nových tlumičů.

Vzhledem k zamýšlenému užití modelu tlumiče jako dynamického subsystému při výpočtech reálných dynamických soustav je nemyslitelné řešit dynamiku tlumiče v plné obecnosti užitím metody konečných prvků pro popis mechanických částí a obdobných metod (např. metody konečných objemů) pro popis proudových poměrů uvnitř tlumiče. Aby se zajistil přijatelný výpočtový čas jsou proto všechny mechanické části tlumiče modelovány pomocí metody soustředěných parametrů a tok oleje přes ventily a ostatní škrťací elementy je modelován na základě zákonů hydrauliky.

V dosavadních modelech tlumiče byl olej brán jako stlačitelná kapalina bez příměsi volného či rozpuštěného vzduchu. Vzduchový sloupec v akumulátoru byl striktně oddělen od kapaliny, do ostatních částí tlumiče se vzduch v jakékoliv formě nedostal. Model tak umožňoval respektovat pouze stlačení vzduchu v akumulátoru a vývoj plynové kaverny v ostatních prostorách tlumiče v případě poklesu tlaku pod hranici tlaku nasycených par oleje.

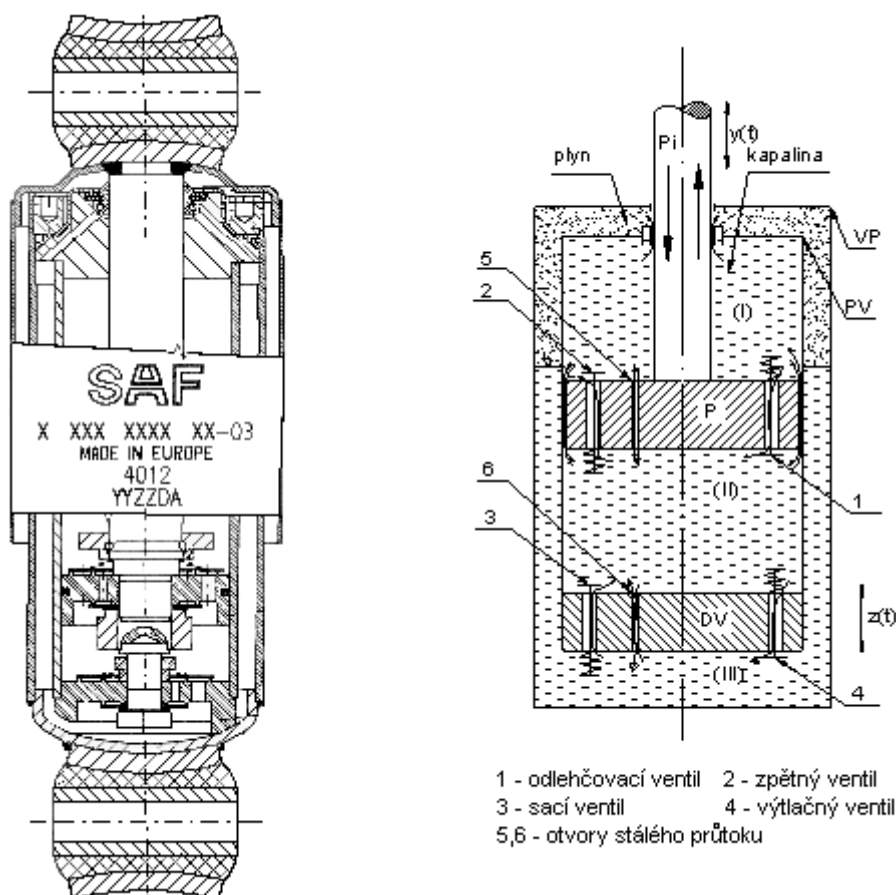
Předpoklad o ideální pracovní kapalině bez příměsi vzduchu samozřejmě neodpovídá skutečnosti. Koncentrace vzduchu rozpuštěného resp. rozptýleného v pracovní kapalině se dynamicky mění (zejména při průtoku přes ventily) v průběhu celého pracovního cyklu, a tím se současně výrazně mění i fyzikální parametry oleje. Dynamický proces postupného rozpouštění a zpětného uvolňování vzduchu z oleje zatím nelze v plné šíři postihnout. Existují

* RNDr Rudolf Svoboda, CSc: TECHLAB s.r.o.; Sokolovská 207, 190 00 Praha 9; tel.-fax: +420. 283 890 581; e-mail: techlab@czn.cz; Prof. RNDr Jan Šklíba, CSc: Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů; Hájkova 6, 461 17 Liberec; tel.: +420. 485 354 131; e-mail: jan.skliba@vslib.cz

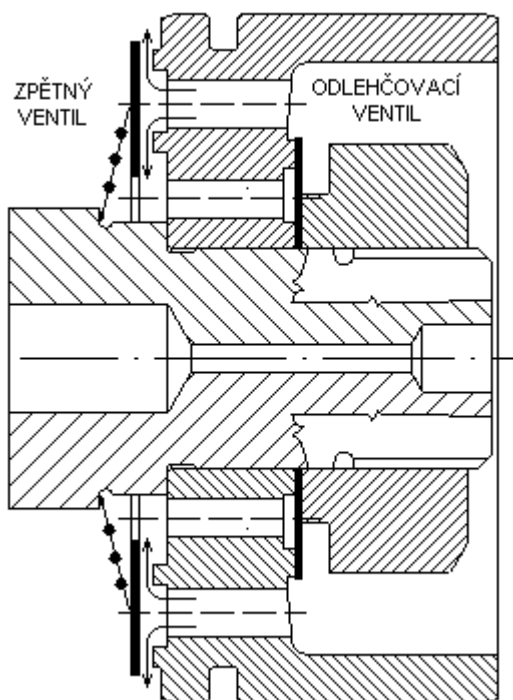
sice postupy na měření množství vzduchu uvolňovaného z kapaliny, nemáme však možnost určit množství oleje rozpuštěného v oleji v dynamickém stavu. Navíc nejsme schopni zadat adekvátní parametry do Stritterovy rovnice popisující časové změny koncentrace rozpuštěného vzduchu. To jsou hlavní důvody, proč ve stávajících modelech směsi lze uvažovat pouze neměnnou koncentraci volného a rozpuštěného vzduchu. Proto jsme v prezentovaném modelu dynamický proces uvolňování a rozpouštění vzduchu v oleji alespoň přibližně nahradili předpokladem konstantní úrovně objemové koncentrace vzduchu ustálené po určité době provozu tlumiče. Vzhledem k tomu, že rychlost uvolňování volného vzduchu obsaženého v kapalině ve formě bublinek je zhruba dvakrát větší než rychlost rozpouštění vzduchu vázaného na molekuly oleje, lze předpoklad konstantní koncentrace vzduchu za provozu do jisté míry akceptovat.

2. Model tlumiče s konstantní koncentrací vzduchu v pracovní kapalině

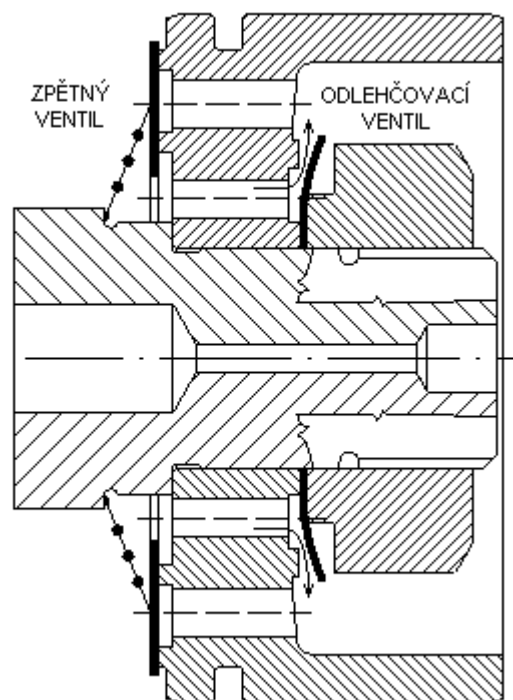
Standardní model hydraulického tlumiče s ideální pracovní kapalinou neobsahující rozpuštěný vzduch pracuje s tlaky soustředěnými do tří oblastí (oblasti nad pístem, oblasti pod pístem a akumulátoru). Model sestává ze soustavy pohybových rovnic ventilů, z rovnic popisujících rovnováhu objemových proudů v tlumiči, vývoj a zánik sloupců nasycených par oleje a ze soustavy algebraických rovnic popisujících závislost koeficientů průtoku ventily a kalibrovanými otvory tlumiče na odpovídajících Reynoldsových číslech. Příklad hydraulického tlumiče a schéma příslušného matematického modelu jsou uvedeny na obr.1, schémata ventilů v pístu na obrázcích 2 a 3.



Obr 1: Dvouplášťový hydraulický tlumič a odpovídající matematický model



Obr.2: Ventily v pístu ve fázi stlačování



Obr.3: Ventily v pístu ve fázi roztahování

V případě modelu tlumiče s pracovní kapalinou s konstantní koncentrací vzduchu v oleji vycházíme z obdobných rovnic jako pro ideální kapalinu bez příměsi vzduchu. V prostorách tlumiče považujeme směs formálně rozdělenou na kapalinnou a plynnou složku, objemové toky směsi přes ventily a ostatní škrtící prvky popisujeme shodně s původním modelem. Upravit se však musí rovnice vyjadřující rovnováhu hmotnostních toků v tlumiči, které se v případě tlumiče s olejem bez příměsi vzduchu shodovaly s rovnicemi rovnováhy objemových toků.

Koncentrace κ_v vzduchu rozpuštěného resp. rozptýleného v pracovní kapalině ve formě bublinek se udává jako poměr objemu rozptýleného vzduchu k jednotkovému objemu směsi, obvykle při normálním atmosférickém tlaku. Takto definovaná objemová koncentrace vzduchu samozřejmě podstatně závisí na tlaku v důsledku řádového rozdílu ve stlačitelnosti vzduchu a oleje, a v průběhu pracovního cyklu tlumiče se proto výrazně mění. Pod konstantní koncentrací κ_m vzduchu rozptýleného v pracovní kapalině tlumiče rozumíme proto *hmotnostní* koncentraci, tedy poměr hmotnosti vzduchu v jednotkové hmotnosti směsi. Z celkové hmotnosti m směsi je tak $\kappa_m \cdot m$ podíl hmotnosti vzduchu a $(1 - \kappa_m) \cdot m$ podíl hmotnosti kapaliny, nezávisle na aktuálním tlaku v tlumiči.

Předpoklad konstantní koncentrace κ_m znamená, že během pracovního cyklu formálně nedochází k uvolňování vzduchových bublin z kapaliny, ani nedochází k rozpouštění volného vzduchu v kapalině; poměr hmotnosti vzduchu a hmotnosti oleje ve hmotnostní jednotce směsi je stálý a neměnný. Objem hmotnostní jednotky směsi se samozřejmě v závislosti na tlaku mění.

Vstupní objemovou koncentraci κ_v rozptýleného vzduchu lze (při známém tlaku, pro nějž je definována) snadno přepočítat na hmotovou koncentraci κ_m . V modelu tlumiče pak počítáme s koncentrací hmotovou κ_m . Předpokládejme, že v daném objemu V_S je směs vzduchu a oleje o celkové hmotnosti m , koncentraci κ_m a tlaku P . Pak musí platit

$$V_S = V_K + V_B = \frac{m_k}{\rho_k} + \frac{m_B RT}{P},$$

kde V_k je objem kapaliny, V_B je objem bublinek vzduchu,
 m_k hmotnost kapaliny, m_B hmotnost bublinek vzduchu, $m = m_k + m_B$.

Při konstantní koncentraci κ_m je $m_B = \kappa_m \cdot m$, $m_k = (1 - \kappa_m) \cdot m$, a mezi hmotnostmi směsi a objemem, který zaujme, platí vztah

$$V_S = \left(\frac{1 - \kappa_m}{\rho_k} + \kappa_m \frac{RT}{P} \right) \cdot m = \left(\frac{1}{\rho_k} + \frac{\kappa_m}{1 - \kappa_m} \frac{RT}{P} \right) \cdot m_k = \left(\frac{1 - \kappa_m}{\kappa_m} \frac{1}{\rho_k} + \frac{RT}{P} \right) \cdot m_B \quad (1)$$

3. Průtok směsi škrťácím prvkem

Jak pro škrťácí prvky s proměnnou geometrií (ventily), tak pro škrťácí prvky s pevnou geometrií (kalibrované otvory, pístová šterbina, parazitní toky) předpokládáme stejný popis průtoku jako v případě samotné kapaliny bez vzduchových bublinek, tedy objemový tok směsi ve tvaru

$$Q = \alpha \cdot K(\rho) \cdot \sqrt{(P_{inp} - P_{out})},$$

kde všechny konstanty (koeficient průtoku, hydraulické parametry) budou stejné jako pro samotnou kapalinu. Při stejném tlakovém spádu $(P_{inp} - P_{out})$ budou tedy *objemové* toky stejné jak pro směs, tak pro olej bez vzduchových bublinek. Stejně však nebudou v tomto případě *hmotnostní* toky škrťácím prvkem. Vzhledem k nenulové koncentraci vzduchu ve směsi bude při stejné hodnotě objemového toku hmotnostní tok směsi prvkem nižší než hmotnostní tok samotné kapaliny, a navíc se bude lišit v závislosti na vstupním tlaku P_{inp} .

Určíme nyní velikost hmotnostního toku směsi Q_m odpovídající objemovému toku $Q_V \equiv Q_{V,inp}$ vstupujícímu do škrťácího prvku. Při objemovém toku $Q_{V,inp}$ proteče ventilem (škrťácím prvkem) za jednotku času směs o objemu $\Delta V_{V,inp}$ a hmotnosti Δm , které jsou podle (1) svázány vztahem

$$\Delta V_{V,inp} = \left(\frac{1 - \kappa_m}{\rho_k} + \kappa_m \frac{RT}{P_{inp}} \right) \cdot \Delta m = \left(\frac{1 - \kappa_m}{\rho_k} + \kappa_m \frac{P_0}{P_{inp}} \cdot \frac{1}{\rho_V} \right) \cdot \Delta m, \quad \frac{1}{\rho_V} = \frac{RT}{P_0}. \quad (2)$$

Po průtoku škrťácím prvkem do prostoru s výstupním tlakem P_{out} teče do tohoto prostoru samozřejmě stále stejný hmotnostní proud směsi Q_m . Vzhledem k menšímu výstupnímu tlaku $P_{out} < P_{inp}$ dochází v oblasti s výstupním tlakem k rozepnutí vzduchové složky směsi, a hmotnostnímu proudu směsi Q_m tak ve výstupní oblasti odpovídá objemový tok $Q_{V,out}$

$$Q_{V,inp} = \left(\frac{1 - \kappa_m}{\rho_k} + \kappa_m \frac{P_0}{P_{inp}} \cdot \frac{1}{\rho_V} \right) \cdot Q_m, \quad Q_{V,out} = \left(\frac{1 - \kappa_m}{\rho_k} + \kappa_m \frac{P_0}{P_{out}} \cdot \frac{1}{\rho_V} \right) \cdot Q_m.$$

Objemový tok na výstupu je tak s objemovým tokem na vstupu svázán vztahem

$$Q_{V,out} = \left(1 + \frac{P_{inp} - P_{out}}{P_{out}} \cdot \frac{\kappa_m}{\kappa_m + (1 - \kappa_m) \cdot \frac{\rho_V}{\rho_k} \cdot \frac{P_{inp}}{P_0}} \right) \cdot Q_{V,inp}, \quad (3)$$

vyjadřující změnu objemového toku na výstupu škrťácího prvku v závislosti na vstupním a výstupním tlaku P_{inp} , P_{out} a koncentraci vzduchu ve směsi κ_m .

4. Rovnováha hmotnostních toků směsi v tlumiči

U modelu hydraulického tlumiče s kapalinou bez vzduchových bublin resp. bez rozpuštěného vzduchu jsou rovnice sestaveny za podmínky rovnováhy objemových toků:

součet všech objemových toků mezi prostorami tlumiče je roven nule

(se znaménky toků reprezentujícími směry toků podle dohodnuté konvence). O objemový proud, tekoucí z j -té do k -té oblasti, jsme zmenšovali objem j -té oblasti a zároveň zvyšovali objem k -té oblasti. Při těchto tocích jsme neuvažovali stlačitelnost oleje jakožto veličinu druhého řádu; rovnováha toků v tlumiči zároveň vyjadřovala zákon zachování hmoty.

V případě pracovního média tvořeného směsí oleje a vzduchu již nemůžeme pro odvození rovnic použít přímo rovnováhu proudů. Směs vzduchu a oleje je stlačitelná, hustota směsi závisí na tlaku, a po průchodu škrtícím prvkem do oblasti s menším tlakem se vstupní objemový proud zvětšuje na výstupní proud podle vztahu (3). Pro stlačitelné médium musíme proto rovnováhu objemových toků nahradit podmínkou rovnováhy hmotnostních toků:

součet všech hmotnostních toků mezi prostorami tlumiče je roven nule.

Konkrétně to znamená, že o hmotnostní proud, tekoucí z j -té do k -té oblasti, snižujeme celkovou hmotnost media obsaženého v j -té oblasti a o stejnou hodnotu zároveň zvyšujeme hmotnost media v oblasti k -té. Pro olej bez vzduchových bublinek, tj. při nulové koncentraci $\kappa_m = 0$, je podmínka rovnováhy hmotnostních toků ekvivalentní s podmínkou rovnováhy objemových toků, a rovnice rovnováhy pracující s hmotnostními proudy směsi Q_m přechází na původní rovnice tlumiče s olejovou náplní.

Při odvozování rovnic tlumiče se směsí oleje a vzduchu jako pracovní kapalinou vycházíme z představy, že v prostorách tlumiče je směs formálně rozdělena na kapalinou a plynnou složku. Směs má však stále stejnou koncentraci κ_m , v prostorách nad pístem a pod pístem bude tedy stále stejný hmotnostní poměr oleje a vzduchu bez ohledu na aktuální hodnoty tlaku a objemu směsi; poměr objemů oleje a vzduchu v těchto prostorách samozřejmě na tlaku závisí. V akumulátoru je situace poněkud složitější, protože zde je jednak stálý sloupec volného vzduchu (o němž předpokládáme, že se ani nerozpouští v oleji, ani nepřepouští do dalších prostor tlumiče), a k tomu sloupec „vázaného“ vzduchu ve směsi, která již v akumulátoru byla či se do něho dostala přes oba ventily ve dně válce.

V průběhu pracovního cyklu tlumiče se tak ve všech jeho prostorách dynamicky mění jak hmotnosti, tak i objemy oleje i vzduchu. Tlaky v prostorách nad pístem a pod pístem budou proto určeny rovnicemi

$$\dot{P}_1 = \frac{W_1}{C_{k1} + VB_1 / P_1}, \quad \dot{P}_2 = \frac{W_2}{C_{k2} + VB_2 / P_2}, \quad (4)$$

kde $C_{ki} = VK_i/E_k$ je hydraulická kapacita objemu oleje ve směsi,

VB_i objem vzduchových bublinek ve směsi,

W_i celkové objemové toky a změny objemu prostoru vyvolané pohybem pístnice (stejně jako v případě pracovní kapaliny bez bublinek).

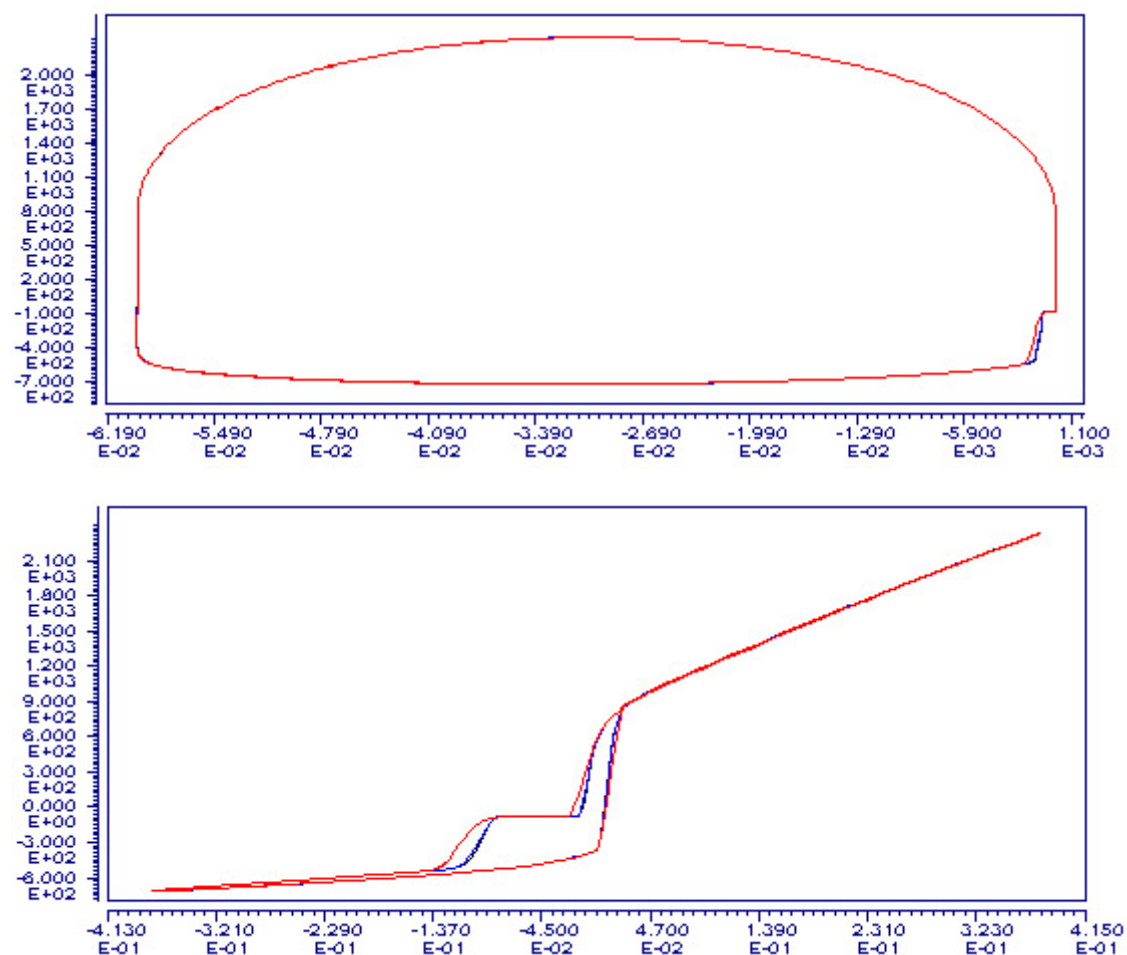
V akumulátoru se objem vzduchových bublinek ve směsi přičte k objemu vzduchového sloupce VV_3 , a tlak P_3 je popsán rovnicí

$$\dot{P}_3 = \frac{W_3}{C_{k3} + (VB_3 + VV_3) / P_3}. \quad (5)$$

Objem volného sloupce vzduchu v akumulátoru určíme ze stavové rovnice plynu. Celkové objemy prostorů nad pístem a pod pístem určujeme z výchozích objemů na začátku simulace a ze známého pohybu pístu s pístnicí; objemy směsi v těchto prostorách dostaneme odečtením objemů nasycených par (samozřejmě jen pokud se tyto páry vyvinuly). Pro příslušný tlak v oblasti a zadanou koncentraci vzduchu určíme z objemu hmotnost směsi v oblastech nad pístem a pod pístem, a odečtením od celkové hmotnosti směsi v tlumiči (dána při plnění tlumiče) určíme hmotnost směsi v akumulátoru. Z hmotností směsi, známých tlaků a koncentrace vzduchu v oleji pak s pomocí rovnic (1) a (2) přepočteme příslušné objemy oleje a vzduchových bublin v prostorách tlumiče.

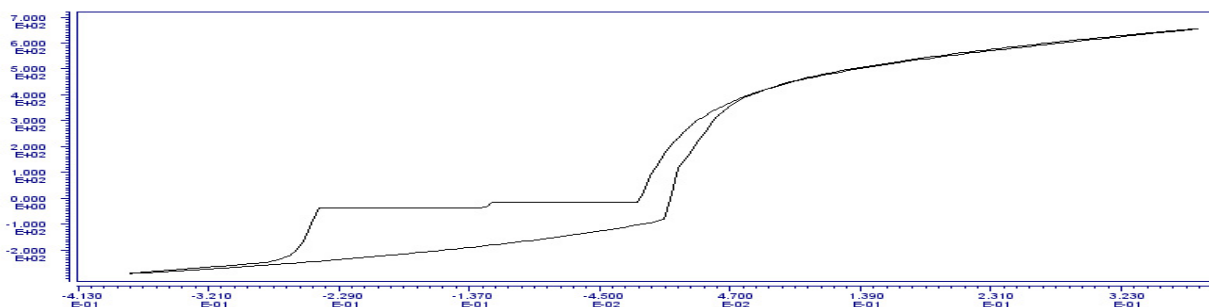
5. Některé výsledky numerických simulací

Na obrázku č.4 jsou zobrazeny statické (horní obrázek) a rychlostní charakteristiky (dolní část) hydraulického tlumiče s parametry nastavenými tak, že po přechodu horní úvrati pohybu dochází k opožděnému otevření výtláčného ventilu. V případě ideální olejové náplně bez příměsi vzduchu (modrá křivka) dochází po nárůstu tlaku k prudkému otevření ventilu, které má často za následek nežádoucí kmitavé jevy. Z grafu zvláště rychlostní charakteristiky je patrné, jak se při 3% objemové koncentraci vzduchu (červené křivky) ostré přechody zaoblí.

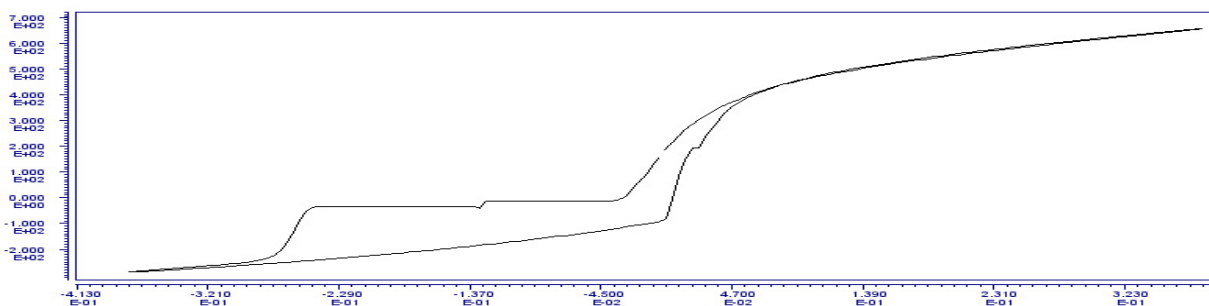


Obr.4: Statické (horní část) a rychlostní (dolní část) charakteristiky tlumiče při různých koncentracích volného vzduchu v oleji

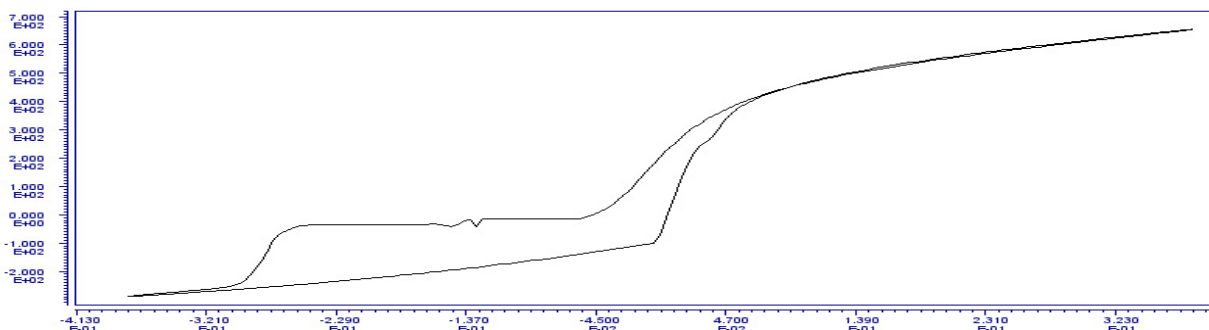
Na obrázku č.5 jsou uvedeny příklady rychlostních charakteristik tlumiče, u něhož dochází v prostorách nad pístem a pod pístem navíc k vývoji nasycených par oleje. Z obrázku je opět zřetelně vidět postupné zaoblování ostrých přechodů na charakteristice se vzrůstajícím podílem volného vzduchu v oleji. Zároveň se však v okolí horní úvrati pohybu pístu zvyrazňují kmitavé jevy spojené s pohyby ventilů v soustavě tlumiče s výrazně menším modulem pružnosti pracovního média – směsi oleje a vzduchu – ve srovnání s čistým olejem.



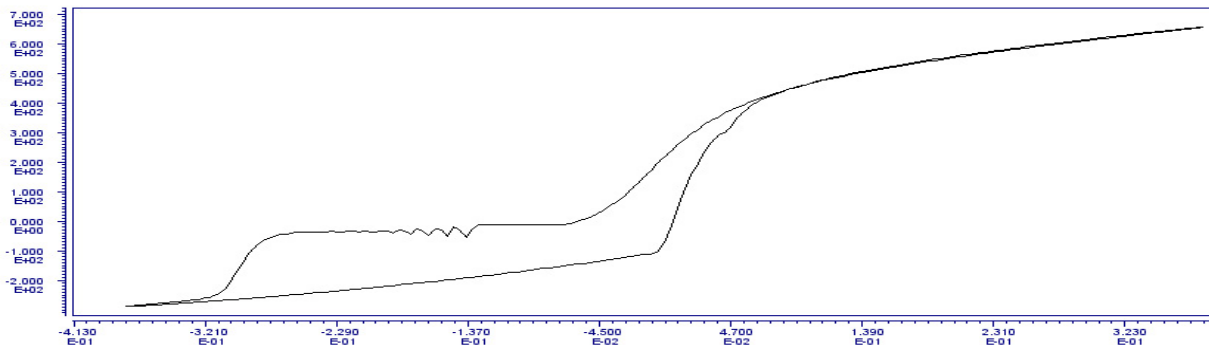
Koncentrace 1 %



Koncentrace 3 %



Koncentrace 5 %



Obr.5: Závislost rychlostní charakteristiky tlumiče s parní a plynovou kavernou na objemové koncentraci volného vzduchu v oleji

6. Závěr

Předpoklad konstantní koncentrace volného vzduchu v oleji umožnil alespoň přibližně respektovat změny fyzikálních vlastností reálné pracovní kapaliny (oleje s příměsí volného vzduchu ve formě bublinek) v průběhu pracovního cyklu tlumiče. Výsledky numerických simulací se zpřesněným modelem dávají reálnější popis dynamiky tlumiče zejména při přechodech mezi fázemi stlačování a roztahování tlumiče v okolí horní a dolní úvrati pohybu. Model rovněž umožňuje přesnější určení případných problémových oblastí odezvy tlumiče s výrazným kmitáním přechodového či samobuzeného typu.

7. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory výzkumného záměru MŠMT č. 4674788501 „Optimalizace vlastností strojů v interakci s pracovními procesy a člověkem“.

8. Literatura

- Lang, H.L. (1978) A study of the characteristics of automotive hydraulic dampers at high stroking frequencies, Doctor dissertation, University of Michigan
- Svoboda R., & Šklíba J. (2003) Identification of stiffness of hydraulic damper valves, in: *Proc. 8st Int.Conf. on the Theory of Machines and Mechanisms*, Technical University Liberec, Liberec, pp.623-628.
- Šklíba,J. & Svoboda, R (2004) On the necessity of hydraulic damper model specification, in: *Proc. 8st Int.Conf. on Flow Induced Vibration*, Ecole Polytechnique, Paris
- Šklíba,J., Svoboda, R & Matějec,R. (2005) Specification of flow conditions in the mathematical model of hydraulic damper, in: *Proc. 7st Int.Conf. on Vibration Problems ICOVP-2005*, Isik University, Istanbul, Turkey
- Weigel M., Mach W. & Riepl, A. (2002) Nonparametric shock absorber modelling based on standard test data, *Vehicle System Dynamics*. 2002, Vol.38, No 6, pp 415-432