

DAMPING INFLUENCE ON THE QUALITATIVE PROPERTIES OF NONLINEAR SYSTEMS WITH PARAMETRIC NONLINEARITIES

M. Hortel*, A. Škuderová†

Summary: *This contribution deals with analyzing an influence of damping on qualitative behaviour of nonlinear mechanical systems with kinematic couplings – gear teeth. It is solved the influence both linear and nonlinear cubic damping on regular and irregular motion of chaotic character.*

Key words: *nonlinear dynamics, integrodifferential equations*

1 Úvod

Tlumení či tlumicí síly v mechanických soustavách tvoří významnou složku, která jak *kvalitativně*, tak i *kvantitativně* může ovlivnit dynamické chování reálných soustav. Je to souhrn nevratných procesů, při kterých se část mechanické energie ztrácí - rozptyluje. Při matematicko-fyzikálním modelování se proces tlumení spojuje s představou ekvivalentní tlumicí síly, která působí proti smyslu pohybu.

Příčiny existence tzv. *disipativního* tlumení v soustavách lze spatřovat jednak v materiálových vlastnostech, tj. v mikrostruktuře materiálu dané soustavy, a zde pak mluvíme o tzv. *vnitřním* tlumení, jednak v charakteru konstrukčního - technologického provedení soustavy. V tomto případě mluvíme o tzv. *konstrukčním* tlumení, které vzniká třením v důsledku vzájemných mikropohybů - posuvů částí k sobě spojených např. lisováním, šroubováním, nýtováním, atd. a které je mimo jiné teplotně závislé. A konečně lze jako třetí vliv na tlumení jmenovat i *vliv prostředí*, ve kterém se ten či onen daný systém s jistými vlastnostmi nachází.

Tuto širokou škálu příčin vzniku a existence vlastností tlumících sil lze ještě doplnit o složky tzv. *nedisipativního* tlumení či spíše potlačování amplitud kmitání, ke kterým lze řadit např. parametrické tlumení vlivem parametrických nelinearit, vliv fáze mezi parametrickým a vnějším nepotenciálním buzením a pod.

Přesto, že otázkám tlumení v obecném slova smyslu je věnována pozornost již více než sto let, jsou ve světové literatuře o této významné problematice zejména u nelineárních parametrických soustav pouze kusé poznámky.

Klasická teorie kmitání pružných soustav používá řadu let pro vnitřní tlumení jako energeticky nevratného děje hypotézu viskózního odporu. Vzhledem k jistým rozporům mezi touto teorií a experimentem nelze výzkum v tomto směru dosud považovat za ukončený.

Cílem našich úvah bude sledovat vliv daného lineárního a nelineárního tlumení zejména na kvalitativní i kvantitativní vlastnosti pohybů řešené soustavy. Velice důležitou úlohu zde hrají z vnitřní dynamiky např. rázové jevy v záběru se nacházejícího ozubení, vzniklé většími dynamickými než staticko-elastickými deformacemi zubů. Při odskoku boků profilů zubů dochází k

*Ing. Milan Hortel, DrSc., Ústav termomechaniky AVČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8; tel. +420 2 6605 3803, e-mail: hortel@it.cas.cz

†Ing. Alena Škuderová, Ústav termomechaniky AVČR, Dolejškova 5, 182 00 Praha 8; tel. +420 2 6605 3803, e-mail: skuder@it.cas.cz

porušení olejového mazacího filmu, který při normálním záběru je vytvořen v klínové mezeře ozubení hydrodynamickými podmínkami. Ozubené profily zabírajících kinematických dvojic vykonávají složitý pohyb valení - smyk, a to smyk vyplývající jak z geometrie záběru, tak i z relativních pohybů elastických podpor těchto dvojic.

O rychlosti a kvalitě (únosnosti) vytvoření nosného olejového filmu po opětovném styku profilů zubů byt v oblasti normálního či inverzního záběru jsou rozhodující

- jeho vzdálenost od centrálního bodu záběru na záběrové přímce,
- velikost relativního pohybu zabírajících profilů zubů od pohybů elastických podpor.

V případě absolutně tuhých podpor kinematických dvojic a při záběru v centrálním bodě záběrové přímky vykonávají boky zubů čistě valivý pohyb. Smykový pohyb daný geometrií záběru ozubení je nulový.

Z uvedené stručné úvahy je patrné, že vytvoření nosného olejového filmu v záběru ozubení je složitou záležitostí a dynamické síly v ozubení zde proto dávají podmínky pro okamžik vytvoření polosuchého či suchého tření, a tím i podmínky pro vytvoření tzv. samobuzeného kmitání. Je proto i tento jev v dynamice ozubení důležitou otázkou při analýze pohybu mechanických systémů s kinematickými vazbami.

Výsledky dosavadních studií, např. [1],[2],[3],[4], ukazují, že v jistých oblastech parametrů mohou takové soustavy vykazovat velkou dynamickou citlivost a mnohostranné dynamické chování i na nepatrné jejich změny. V těchto tzv. *senzibilních* oblastech se ukazuje, že pro jisté parametry amplitudových modulací a činitelů časového překrytí parametrických funkcí tuhosti a lineárního tlumení probíhá senzibilní oblast s chaotickým pohybem relativně úzkou, avšak složitou oblastí disipativního i samobuzeného kmitání.

Příspěvek se zabývá analýzou vlivu tlumení na pohyb zvláštního případu obecné řetězovitě větvené soustavy s děleným tokem výkonu, tj. jedné větve přenášeného silového toku jako soustavy o šesti stupních volnosti.

2 Formulace úlohy

Převodové soustavy s ozubenými koly, jaké se např. vyskytují v leteckém či automobilovém průmyslu, mohou podle účelu nabývat různě složitých konstrukcí a být chápány jako řetězovitě větvené soustavy. Přesnější modelování takových soustav vede při hmotnostní diskretizaci jakož i vlivem existence různých slabých - analytických a silných - neanalytických nelinearit, jako je např. vliv technologických bočních zubových vůlí, a dále při parametrických budících zdrojích na matematicko-fyzikální modely, jejichž pohyby lze popsat obyčejnými deterministickými nelineárními diferenciálními rovnicemi s časově proměnlivými koeficienty tvaru [1]

$$\mathbf{M}\mathbf{v}'' + {}_1\mathbf{K}(\beta, \delta_i, H)\mathbf{v}' + \sum_{K_1 > 1} {}_{K_1}\mathbf{K}(D, D_i, H) |\mathbf{w}'(\mathbf{v}')|^{K_1} \operatorname{sgn} \mathbf{w}'(\mathbf{v}') + {}_1\mathbf{C}(\varepsilon, \kappa, Y_n, U_n, V_n, H, \tau)\mathbf{v} + \sum_{K > 1} {}_K\mathbf{C}(I_n, \varepsilon, \kappa, H, \tau)\mathbf{w}^K(\mathbf{v}) = \mathbf{F}(a_n, b_n, \bar{\varphi}, H, \tau). \quad (1)$$

Zde představuje $\mathbf{v}$ obecně m -dimensionální vektor pohybu soustavy, $\mathbf{w}^K(\mathbf{v})$ je K -tá mocnina vektoru $\mathbf{v}$, která je definovaná vztahem $\mathbf{w}^K(\mathbf{v}) = \mathbf{D}(\mathbf{w}(\mathbf{v}))\mathbf{w}^{K-1}(\mathbf{v})$, přičemž $\mathbf{D}(\mathbf{w}(\mathbf{v}))$ je diagonální matice, ve které jsou prvky na hlavní diagonále tvořeny prvky vektoru $\mathbf{w}(\mathbf{v}) \equiv \mathbf{v}$. Dále je $\mathbf{M}$ matice hmotnostních a setrvačných sil, ${}_1\mathbf{K}, {}_{K_1}\mathbf{K}$ jsou maticemi lineárních, případně nelineárních tlumících sil, ${}_1\mathbf{C}(\tau), {}_K\mathbf{C}(\tau)$ pak maticemi kvazilineárních resp. nelineárních vratných sil a $\mathbf{F}(\tau)$ je vektorem nepotenciálního vnějšího buzení s budícími koeficienty a_n, b_n a $\bar{\varphi}$ fázový úhel. H je Heavisideova funkce, která umožňuje v kompaktním tvaru řešit pohyby - rázy jako důsledek silných neanalytických nelinearit vlivem existence technologických bočních vůlí

s ozubení. Příslušné lineární resp. nelineární tlumící součinitele jsou značeny β, δ_i , resp. D, D_i , lineární parametrické funkce symboly Y_n, U_n, V_n a nelineární parametrické funkce tzv. parametrické nelinearity symboly $I_{n,\varepsilon}$ a κ představují součinitele trvání záběru a amplitudovou modulaci výsledné tuhostní funkce ozubení ${}_1C(\tau)$. Derivace podle bezdimenzionálního času τ jsou značeny čárkami.

Relativní pohyb v záběru se nacházejícího ozubení, tj. ve směru záběrové přímky lze pro obecnou elasticky uloženou soustavu s pohyby podpor $\{y_{3,2}; z_{3,2}\}$ páru ozubených kol 3,2 při respektování tzv. házivosti roztečných kružnic, které jsou modelovány výstřednostmi $e_{3,2}$, napsat ve tvaru [1]

$$y(\tau) = R_{b3}\varphi_3 + R_{b2}\varphi_2 + y_3 - y_2 + e_3 \sin \varphi_3 - e_2 \sin(\Delta - \varphi_2) + {}^{1,2}f(\tau), \quad (2)$$

kde ${}^{1,2}f(\tau)$ je chybová funkce, čili odchylka tvaru ozubení od ideální evolventy, Δ je fázový úhel natočení mezi výstřednostmi $e_{3,2}$ a $R_{b3,2}$ jsou poloměry základních kružnic. Tento relativní pohyb tvoří míru dynamického zatížení v záběru se nacházejícího ozubení, neboť dynamická síla $F_{dyn} = {}_1C(\tau)y(\tau)$.

Exaktní řešení soustavy (1) v uzavřeném tvaru není vzhledem ke složitosti členů, vyjádřených např. Fourierovými řadami, možné. Pro analytické řešení se jeví proto jako výhodná analytická metoda sukcesivních aproximací k diferenciální okrajové úloze transformované ekvivalentní soustavy integrodiferenciálních rovnic s řešícími jádry ve tvaru *Greenových* rezolvent.

Pro další analýzu zákonitostí vlivu tlumení bylo takové řešení aplikováno na řešení elasticky uložené soustavy páru ozubených kol s přímými zuby. Takové řešení pohybů ve směru záběrové přímky soustavy elasticky uloženého páru ozubených kol vede po zavedení relativního pohybu (2) při jednonásobném rezonančním naladění v relativním pohybu y výše citovanou metodou a s přesností na tři aproximace na řešení tvaru [4]

$$\begin{aligned} (2N^2\alpha - R_0) \begin{pmatrix} r \\ s \end{pmatrix} - R_1 \begin{pmatrix} r \\ -s \end{pmatrix} + R_2 \begin{pmatrix} s \\ r \end{pmatrix} - (b + BA^2) \begin{pmatrix} s \\ -r \end{pmatrix} \\ + \frac{1}{4} \left[I_{\frac{N}{2}} \begin{pmatrix} 2rs \\ r^2 + 3s^2 \end{pmatrix} + I_{\frac{3N}{2}} \begin{pmatrix} 2rs \\ r^2 - 3s^2 \end{pmatrix} \right] + \begin{pmatrix} a_N \\ b_N \end{pmatrix} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

což je vektorovým způsobem zapsaná soustava algebraických rovnic pro určení složek r, s tzv. rozvětčovacích parametrů, získaná z tzv. rozvětčovacích rovnic E.Schmidtovy metody rozštěpení řešících jader k diferenciální okrajové úloze ekvivalentních integrodiferenciálních rovnic. Rozvětvovací parametry zde vyjadřují jednonásobné rezonanční naladění v relativním pohybu y . Přitom

$$A = (r^2 + s^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

je amplituda rozvětčovacích – rezonančních parametrů. Koeficienty kvazilineárního parametrického buzení dané parametrickou funkcí tuhosti ${}_1C(\tau)$ jsou vyjádřeny výrazy ¹

$$\begin{aligned} R_0 &= -\frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\vartheta_n^N N^2 - (N - 2n)^2} + \frac{1}{N^2 - (N + 2n)^2} \right] (Y_n^2 + U_n^2). \\ R_1 &= \frac{1}{2} P_N + \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{Y_n Y_{N-n} + Y_n Y_{n-N} - U_n U_{N-n} + U_n U_{n-N}}{\vartheta_n^N N^2 - (N - 2n)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{Y_n Y_{N+n} + U_n U_{N+n}}{N^2 - (N + 2n)^2} \right], \end{aligned} \quad (5)$$

¹ $\vartheta_a^b = 1 - \delta_a^b$; $\delta \dots$ Kroneckerův symbol

kde

$$P_N = Y_n + (N - 2n)^2 \left[\frac{V_{3n}}{(N - 2n)^2 - \lambda_3} + \frac{V_{2n}}{(N - 2n)^2 - \lambda_2} \right],$$

$$R_2 = \frac{1}{2}U_N - \frac{1}{4} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{Y_n U_{N-n} - Y_n U_{n-N} + U_n Y_{N-n} + U_n Y_{n-N}}{\vartheta_n^N N^2 - (N - 2n)^2} \frac{Y_n U_{N+n} - U_n Y_{N+n}}{N^2 - (N + 2n)^2} \right].$$

Výrazy

$$b = N\beta + N^3 \left(\frac{\delta_3}{N^2 - \lambda_3} + \frac{\delta_2}{N^2 - \lambda_2} \right)$$

respektují vlivy lineárního tlumení β v relativním pohybu a $\delta_{3,2}$ v pohybu podpor,

$$B = \frac{3}{4} \left[N^3 D + N^5 \left(\frac{D_3}{N^2 - \lambda_3} + \frac{D_2}{N^2 - \lambda_2} \right) \right]$$

vliv nelineárního kubického tlumení D v relativním pohybu a $D_{3,2}$ v pohybu podpor, $N \dots$ přirozené číslo. $\lambda_{3,2}$ zde představuje naladění podpor kol 3,2.

Vliv parametrické nelinearity je v (3) při přesnosti řešení na tři aproximace reprezentován členy s $I_{N/2}$ a $I_{3N/2}$ harmonické řady.

Explicitní tvary koeficientů kvazilineárních, tj. Y_n, U_n, V_{in} , a nelineárních I_n parametrických funkcí z důvodů omezeného místa zde neuvádíme, viz [1].

Parametrické budící členy v (3) pak vystupují na základě uvedeného stupně aproximace v těchto případech kombinace sčítacích indexů

$$\begin{array}{llll} N - 2n & = & -N, & \text{tj. } n = N, \\ N - 2n + 2m & = & N & \text{nebo } N + 2n - 2m = N, \text{ tj. } m = n, \\ N - 2n - 2m & = & -N, & \text{tj. } m = N - n, \\ N - 2n + 2m & = & -N, & \text{tj. } m = n - N, \\ N + 2n - 2m & = & -N, & \text{tj. } m = N + n. \end{array}$$

V [1] byly odvozeny explicitní tvary výrazů pro jednotlivé aproximace řešení jednonásobné rezonance v relativním pohybu y , který fyzikálně, jak již bylo řečeno, vyjadřuje míru dynamického zatížení v záběru se nacházejícího ozubení. Z jejich tvarů vyplývá, že v případech kombinace sčítacích indexů v R_0 a R_1 vystupují v (3) parametrické budící členy, vyjadřující z fyzikálního pohledu nelineární charakter tuhosti záběru, vliv elasticity olejového filmu v záběru se nacházejících párů zubů, vliv zubových modifikací na přechod z jedné potenciální tuhostní hladiny na druhou a opačně, jakož i HERTZOVY tlaky, tzv. *parametrické nelinearity* charakterizované pro tři aproximace členy Fourierovy řady $I_{N/2}$ a $I_{3N/2}$.

Pro řešenou aplikaci převodových soustav s kinematickými dvojicemi – ozubenými koly – mají tyto veličiny fyzikální význam pouze pro případy s N sudým. Pro tuto podmínku (tj. pro N sudé), je v [1] odvozena funkční závislost amplitudofrekvenční charakteristiky

$$A = f \left(\alpha, I_{N/2}, I_{3N/2}, \dots \right)$$

na frekvenční variaci α v okolí rezonanční frekvence Ω_0 relativního pohybu, činitelích $I_{N/2}, I_{3N/2}$, tlumení β, δ_i, D, D_i , naladění podpor λ_i , nepotenciálním buzení a_N, b_N atd.

3 Analýza vlivu tlumení na pohyb soustavy

Kvalita pohybu částí dynamicky zatížené soustavy má zejména vliv na její životnost a spolehlivost. A protože mírou dynamického zatížení v záběru se nacházejícího ozubení kinematických dvojic je relativní pohyb y , bude zde pozornost věnována zejména tomuto pohybu v oblasti

$y \geq 0$. Pevnostní a dimenzionální posouzení namáhání vyžaduje co nejdokonalejší dynamické vyšetření dané soustavy, zvláště vedou-li náhradní dynamické modely na soustavy nelineární, kde se objevují nové, mnohdy nečekané jevy – fenomény, jako bifurkace a štěpení amplitudofrekvenčních průběhů, přechody regulárních pohybů v pohyby iregulární a opačně, oblasti stability či existence senzibilních oblastí parametrů a pod.

Ukažme si nyní na několika případech ryze parametricky či parametricky a vně buzené soustavy s nulovými či s existujícími parametrickými nelinearitami vliv lineárního a nelineárního – kubického tlumení v záběru ozubení na zákonitosti vývoje rezonančních charakteristik regulárních a iregulárních pohybů chaotického charakteru, bifurkací či štěpení rezonančních větví.

Vliv lineárního tlumení β na velikost amplitudy A v relativním pohybu y a její víceznačnost je znázorněn v prostoru $\{\alpha; A; \beta\}$ na obr.1. U tohoto ryze lineárně parametricky buzeného systému ($a_n, b_n = 0$) a daného naladění vzniká rezonanční kmitání v oblasti $\beta \sim 0, 2$, s klesajícím tlumením β amplitudy narůstají, přičemž v oblasti samobuzeného kmitání ($\beta < 0$) přechází jednoznačné řešení dvoj- až tříznačné. Na tlumení závislá amplitudová víceznačnost je ve středním řezu ($\alpha = 0$) znázorněna různě orientovaným šrafováním. Průnik množiny rezonančních charakteristik s rovinou $\{\beta, \alpha\}$ je vyznačen slabou stopníkovou čarou. Nárůst amplitud A s klesajícím β neprobíhá zcela lineárně, malý odklon od lineárního průběhu je způsoben existencí kubického tlumení jak v relativním pohybu y , tak i v posuvech $y_{3,2}$ uložení kol. Charakteristickým znakem pro amplitudový průběh v oblasti samobuzeného kmitání jsou uzavřené smyčky. Vzhledem k tomu, že součinitelé či míry tlumení nejsou v obecnosti zcela známy, neboť jsou též funkcí tvaru okolí např. inkriminovaného místa uložení atd., budou parametry tlumení variovány v širším rozmezí. Tím lze též sledovat kvalitativní vlastnosti dynamické soustavy s možným dopadem na stabilitu, bezpečnost a spolehlivost konstrukcí i v okolí odhadovaného přibližného parametru tlumení.

Obrázek navazuje na obr.1 s tím rozdílem, že mimo parametrické budící složky zde vystupuje ještě další nepotenciální vnější budící zdroj, tj. chybová funkce, respektující odchylku od ideální evolventy s tou zvláštností, že oba zdroje kmitání mají společnou základní budící frekvenci, která se rovná záběrové frekvenci ω_c . Pro srovnání s případem ryze parametrické soustavy, viz obr.1, je při smíšeném buzení s amplitudovým charakterem podobný, tj. amplitudy rostou s klesajícím lineárním tlumením β relativního pohybu y , ve směru osy frekvenční variace α amplitudy A s rostoucím α asymptoticky klesají. Víceznačnost řešení se v oblasti samobuzeného kmitání v důsledku vnějšího buzení zvýšila při zachování typicky smyčkového charakteru až na osminásobnou.

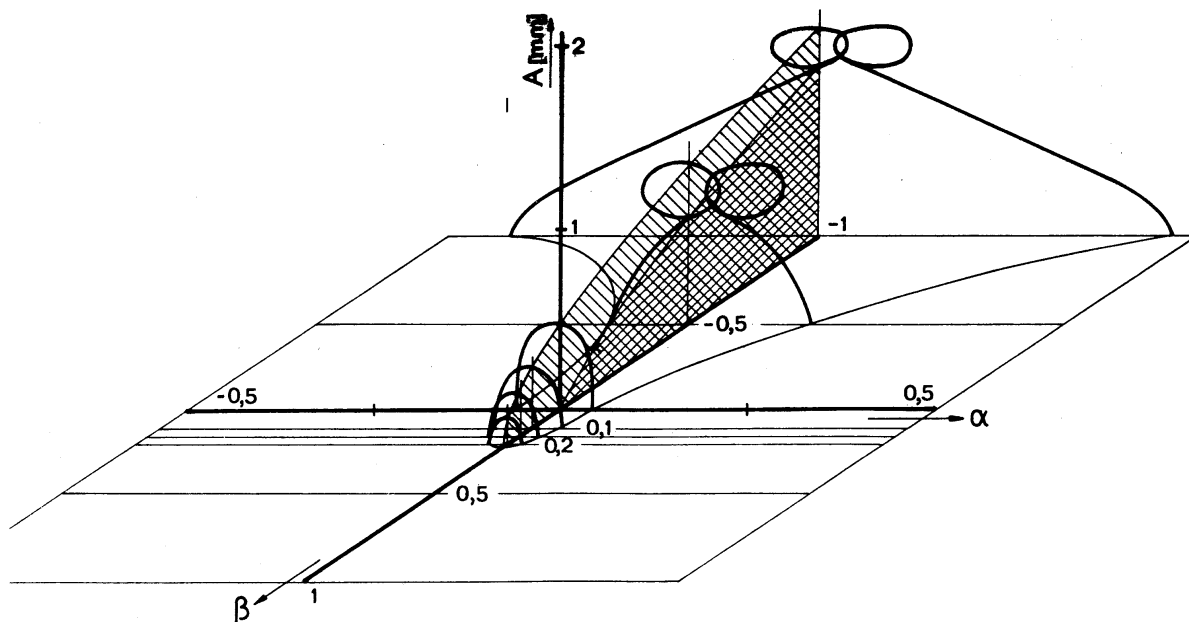
Vliv kubického tlumení D relativního pohybu při uvedeném naladění na rezonanční charakteristiku daného systému při smíšeném buzení je patrný z obr.3.

Porovnáme-li průběhy pro lineární tlumení (obr.1) a obr.3, vidíme, že zatímco amplitudy A v oblasti samobuzených kmitů při klesajícím β rostou, vykazuje amplitudový průběh u kubického tlumení D jisté maximum. Průběh pak s dále klesajícím $D < 0$ klesá k jisté hodnotě. Smyčkový charakter průběhu A je opět patrný, jeho výraznost se však s klesajícím $D < 0$ zmenšuje.

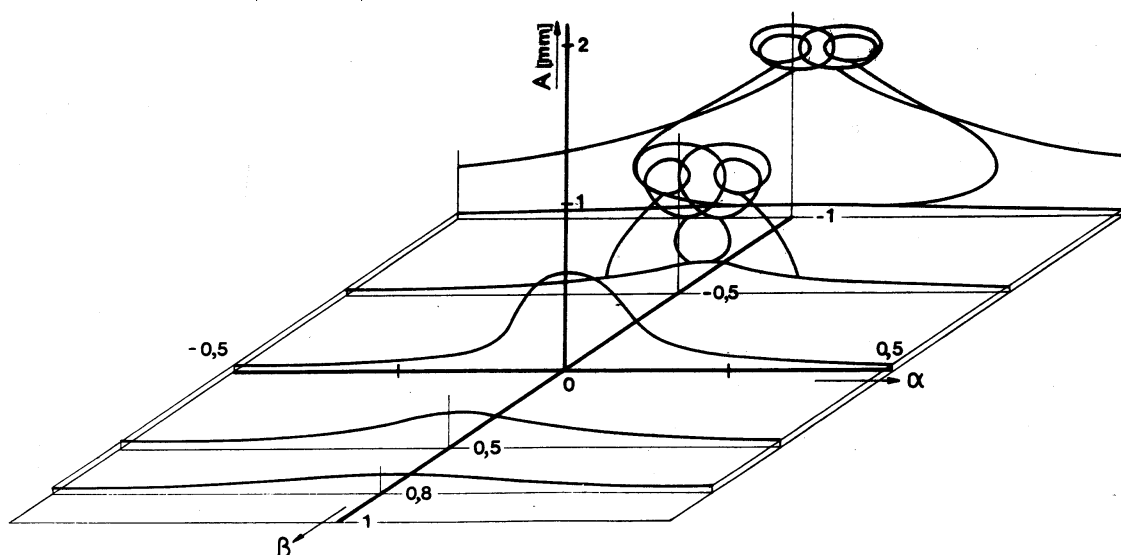
Další vliv lineárního tlumení β relativního pohybu y , tj. zákonitosti štěpení amplitudových charakteristik, jakož i vznik a zánik bifurkačních bodů lze sledovat z obr.4. Jde zde o jednonásobné štěpení amplitudofrekvenční charakteristiky. Příklad násobného štěpení (trojnásobného) a bifurkací rezonančních křivek v rovině $\{\alpha; A\}$ nastává např. pro fázový úhel $\overline{\varphi} = 0.50195\pi$, je ukázán v [4].

Stanovení oblastí pohybů chaotického charakteru nelineárních soustav s variabilní strukturou v závislosti na jistých, z dynamického hlediska význačných parametrech systému je, jak z hlediska základního výzkumu, tak i z hlediska fyzikálních aplikací vysoce aktuální úkol. Metody, jak toho dosáhnout, mohou být různé. Zde bylo pro určení oblastí s pohybem chaotického charakteru využito analytické metody, tj. metody řešení integrodiferenciálních rovnic. Oblasti mohly být proto určeny pouze na základě tvaru pohybů. Metodika přímého analytického řešení stability či nestability např. určením charakteristických či lapunovských exponentů bude předmětem

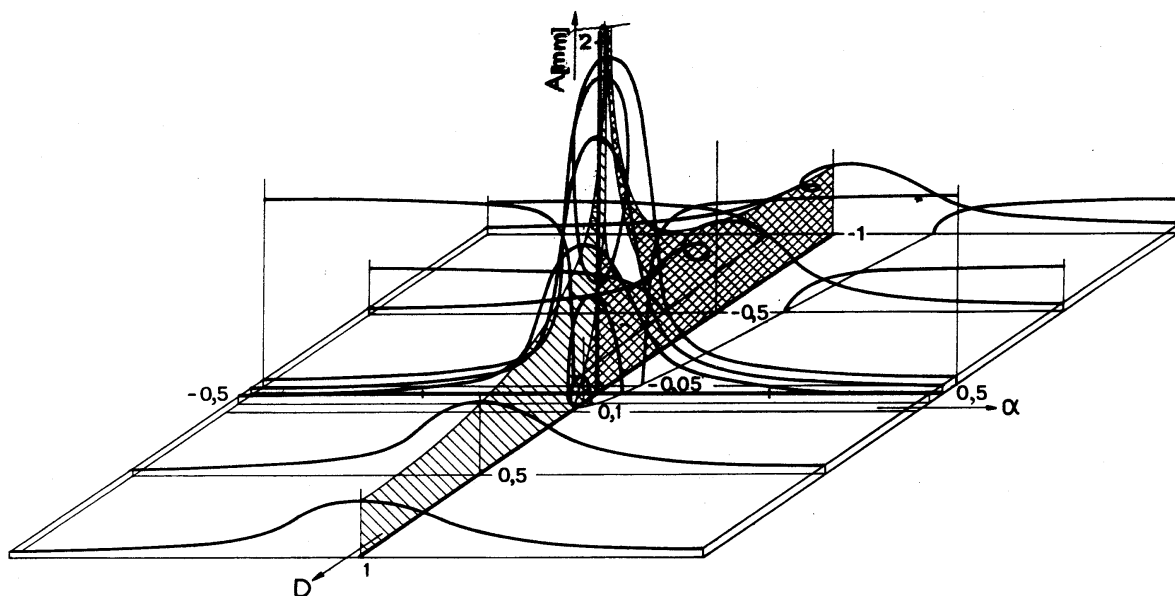
dalšího výzkumu.



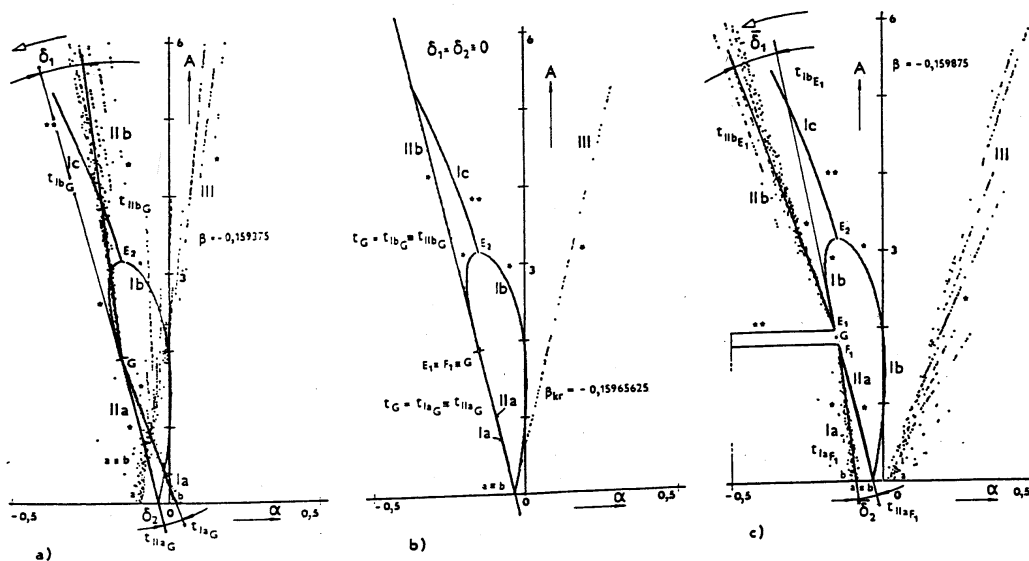
Obr.1 – Rezonanční charakteristiky v oblasti lineárního tlumení relativního pohybu y při ryze parametrickém buzení a naladění soustavy $N = 2$; $K = 2$; $\lambda_0 = 4$; $\lambda_{3,2} \neq N_1^2$; $\delta_{3,2} = 0$; $D = D_{3,2} = 0,1$; $a_N = 0$; $I_{N/2} = I_{3N/2} = 0$; $\kappa = 0,6034$; $\varepsilon = 1,435$.



Obr.2 – Rezonanční charakteristiky v oblasti lineárního tlumení relativního pohybu y při smíšeném parametrickém a vnějším buzení pro naladění soustavy soustavy $N = 2$; $K = 2$; $\lambda_0 = 4$; $\lambda_{3,2} \neq N_1^2$; $\delta_{3,2} = 0$; $D = D_{3,2} = 0,1$; $a_N = 0,164$; $I_{N/2} = I_{3N/2} = 0$; $\kappa = 0,6034$; $\varepsilon = 1,435$ a fázi $\bar{\varphi} = 0$.



Obr.3 – Rezonanční charakteristiky v oblasti kubického tlumení relativního pohybu y při smíšeném parametrickém a vnějším buzení pro naladění soustavy soustavy $N = 2$; $K = 2$; $\lambda_0 = 4$; $\lambda_{3,2} \neq N_1^2$; $\delta_{3,2} = 5,33 \cdot 10^{-3}$; $D_{3,2} = 0,1$; $a_N = 0,164$; $I_{N/2} = I_{3N/2} = 0$; $\kappa = 0,6034$; $\varepsilon = 1,435$ a fázi $\bar{\varphi} = 0$.



Obr.4 – Zákonitost vzniku rozštěpení amplitudofrekvenčních charakteristik $\{\alpha; A; \beta\}$ přechodem a) bodu nespojitosti G na b) bod spojitosti G a c) vznik bodů větvení $E_1; F_1$.

Ukázka průběhu senzibilní oblasti s pohybem chaotického charakteru v prostoru $\{\varepsilon; \beta; \kappa\}$ je na obr.5. Průběh v oblasti kmitání pro $\beta > 1$ je patrný z obrázku vpravo nahoře. Hladký spojitý průběh hranic v singulárním bodě naladění $\kappa = 0$ nabývá v malém okolí hodnoty časového překrytí $\varepsilon = 1$ nespojitý alternující průběh, viz detail W obrázku. Vzhledem k definovanému fyzikálnímu významu tuhostní funkce $C(\tau, \varepsilon, \kappa, \dots)$ leží případ $\kappa = 0$ mimo pozornost našeho zájmu.

Práce vznikla za podpory Grantové agentury ČR při řešení úkolu registrační číslo 101/00/0225.