



Národní konference s mezinárodní účastí  
**INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002**

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

## **RÁZY V POHONOVÝCH SOUSTAVÁCH A JEJICH IDENTIFIKACE**

Ctirad Kratochvíl<sup>1</sup>, Robert Grepl<sup>2</sup>

### **Abstrakt**

Problematicke rázových dějů v technických soustavách je věnována v inženýrské praxi soustavná pozornost. Okolnosti jejich vzniku a průběhu jsou ale studovány především na jednoduchých modelech s 1 nebo 2 stupni volnosti. V posledních letech se ale ukázalo, že rázy mohou způsobovat problémy také u pohonových řízených soustav - a to přímo v řídicích subsystémech a nejen v mechanických vazbách, kde se objevují. Těmto problémům je věnován náš příspěvek.

**Klíčová slova:** rázové děje, nelineární vazby, interaktivní soustavy, technický chaos

### **Úvod - vymezení analyzovaných problémů**

Jednou z reálných technických aplikací, kdy mohou parazitní rázové děje vyvolat značné komplikace, jsou řízené elektromechanické pohonové soustavy. Typickým případem je pohonová soustava se sériovým motorem s cizím buzením a tyristorovým měničem. V této soustavě se mohou objevit problémy s regulací otáček při změnách pracovních podmínek. Nachází-li se soustava ve volnoběžném stavu nebo v podmínkách, kdy náhle dochází k poklesu zatěžovacích (nebo hnacích) momentů, mohou se vlivem vůlí v ozubení či v jiných vazbách objevit v mechanické části pohonu vůle, vyvolávající chaotické relativní pohyby. Ty se mohou prostřednictvím zpětných vazeb projevit i v řídicím subsystému, kde se pak objevují parazitní signály, které výrazně znesnadňují regulaci otáček.

### **Struktura modelu pohonové soustavy**

Pro identifikaci, sledování a simulaci podmínek vzniku i udržení výše popsaných rázových dějů na modelech reálných pracovních strojů již nelze využít jednoduchých soustav s 1 či 2 stupni volnosti. Ty sice dávají velmi zajímavé a především přehledné výsledky, umožňují vysvětlit podmínky vzniku rázů i jejich průběhy (viz např. [4] nebo [2]), nedovolují nám ale sledovat průběhy poruch soustavou a zobecnění na reálnou konstrukci.

<sup>1</sup> Prof. Ing. Ctirad Kratochvíl, DrSc., Ústav mechaniky těles, FSI VUT v Brně, Technická 2, 616 69, Brno

<sup>2</sup> Ing. Robert Grepl, Ústav termomechaniky – pobočka Brno, Technická 2, 616 69, Brno, grepl@fec.vutbr.cz

Modelovými soustavami se sériovými torzními řetězci jsme se zabývali např. v [3] a [4]. Nyní jsme sestavili model rozvětvené soustavy a specifikovali druhy zatěžujících parazitních momentů:

- řídicí signály ve tvaru opakovaných impulsů o velikosti 5-10% nominální hodnoty hnacího momentu s periodou 25 ms
- parazitní kinematické buzení s amplitudou do 5% zatěžovacího momentu
- kolísání zpětnovazebního signálu
- širokopásmový náhodný šum

Model pohonové soustavy respektuje vůle v jednotlivých větvích soustavy.

### Modelování řízení

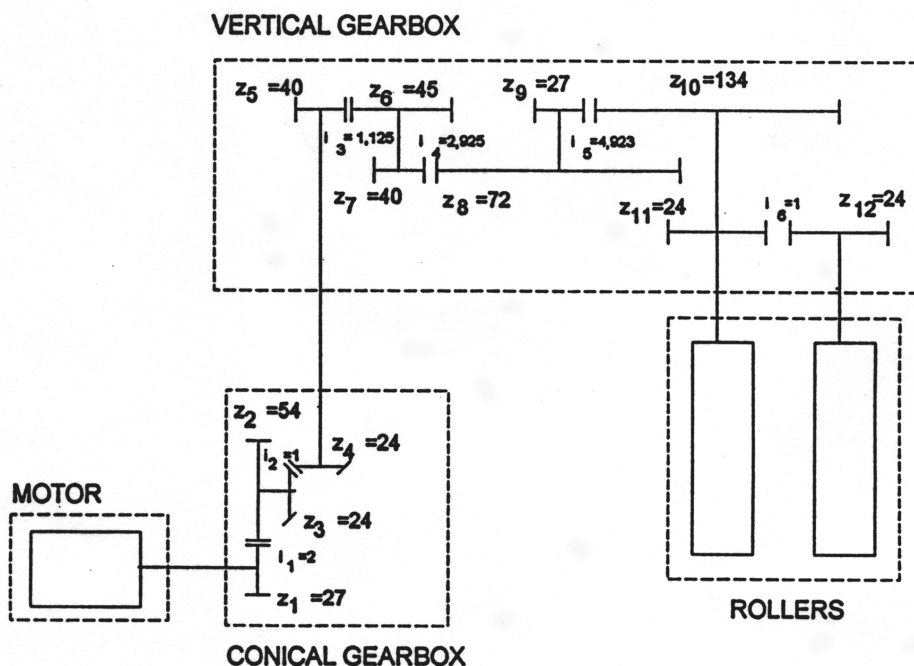
Další problém, který jsme museli řešit, byl výběr a modelování řídicích subsystémů. Běžně užívaný způsob řízení je založen na analýze vlastností a chování lineárních (resp. linearizovaných) modelů pohonových soustav a je vytvářen jako vzájemné propojení mechanické, elektrické a elektronické části s cílem:

- minimalizovat chyby mezi skutečnými a požadovanými výstupy v ustáleném stavu
- minimalizovat časové odezvy soustavy na změny zatěžujících účinků

Podmínky pro splnění těchto požadavků jsou ale neslučitelné. Výběr parametrů regulačního subsystému se tak stává jedním z nejdůležitějších problémů, které je nutné řešit.

### Modelování reálné technické soustavy

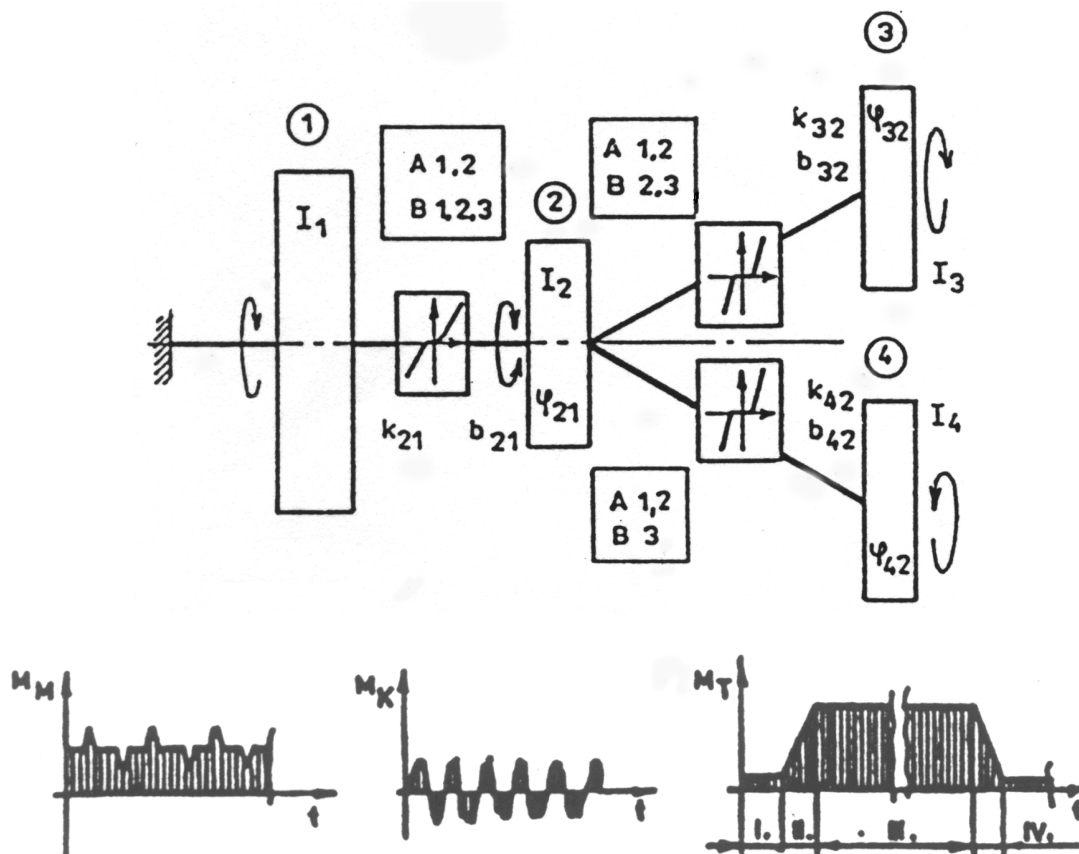
Na základě výše formulovaných podmínek byl vytvořen model pohonu reálné technické soustavy – vertikální válcovací stolice, vyrobené ve firmě ŽDAS a.s., obr. 1.



Obr. 1: Schema válcovací stolice

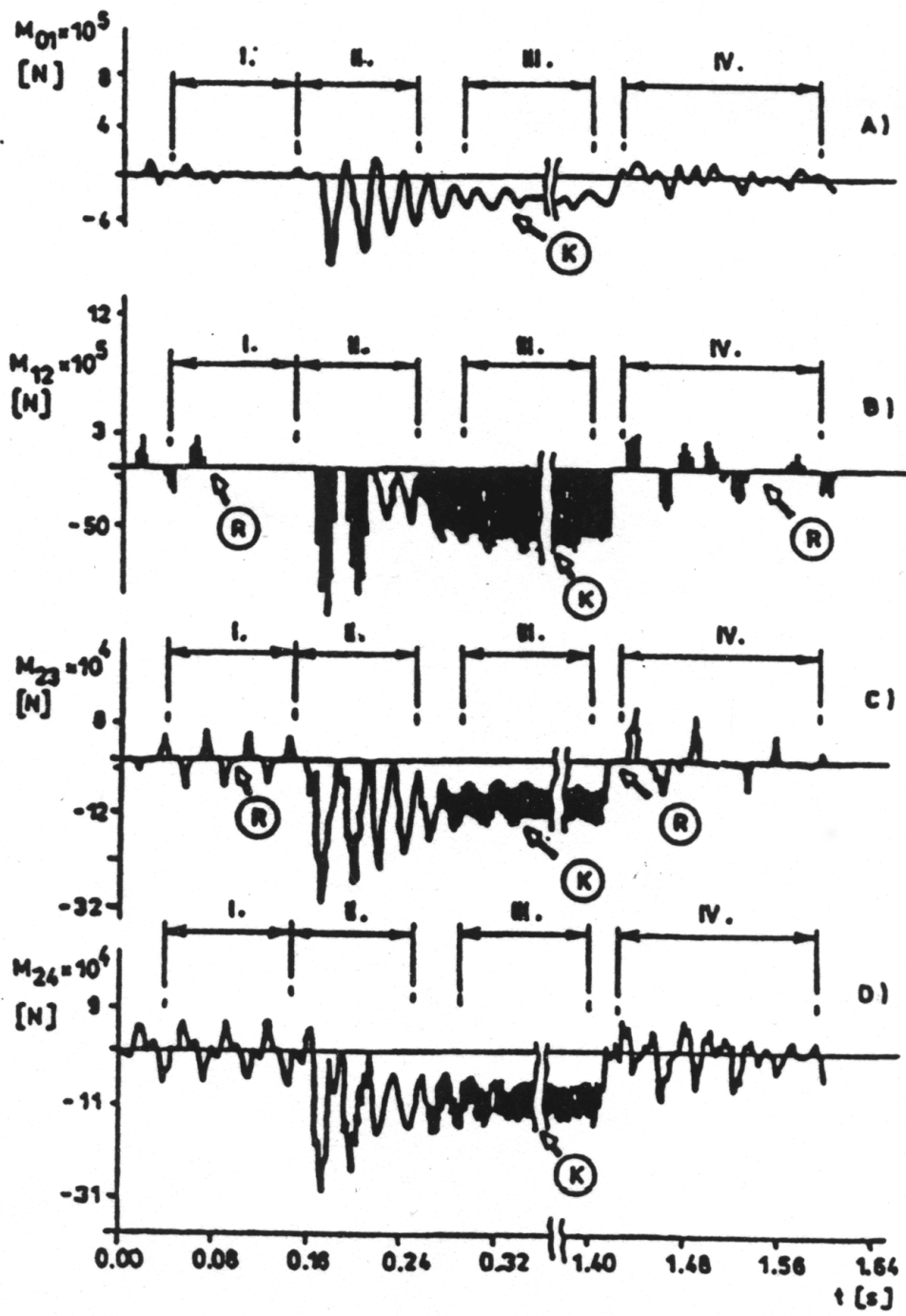
Struktura pohonu ve tvaru rozvětvené torzní soustavy s diskretizovanými parametry byla vytvořena na základě zkušeností s modelováním pohonů podobných soustav a je patrná z obr. 2 , kde jsou znázorněny také průběhy modelových zatěžovacích momentů:

- hnacího momentu na hřídeli elektromotoru ( $M_M = M_1(t)$ )
- modely technologických momentů redukováných do uzlů 3 a 4 ( $M_T = M_3(t) = M_4(t)$ )

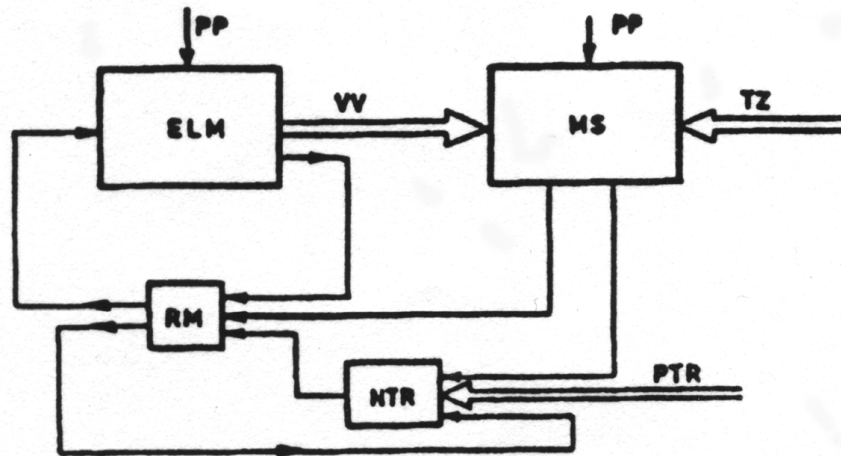


Obr. 2: Model rozvětvené rotorové soustavy s diskretizovanými parametry a průběhy modelových zatěžovacích momentů

Průběh technologických momentů ilustruje pracovní cyklus (obr. 3): chod naprázdno (oblast I.), vstup materiálu do stroje, tzv. nápich (oblast II.), rovnovážný pracovní stav (oblast III.) a výstup materiálu – odlehčení soustavy (oblast IV.). Je zřejmé, že jednou z rozhodujících podmínek pro dodržení předepsané kvality výrobku bude dodržení stanovených otáček. Formální blokové schéma řídicího subsystému je patrné z obr. 4. Jednotlivé bloky reprezentují: řízený elektromotor (ELM), mechanickou soustavu (MS), regulaci motoru (RM), nadřazenou (algoritmizovatelnou) technologickou regulaci (NTR), algoritmizované požadavky řízení (PTR). Bloky ELM a MS jsou propojeny výkonovými vazbami (VV) a mohou být zatíženy technologickými momenty (TZ) a poruchami (PP).

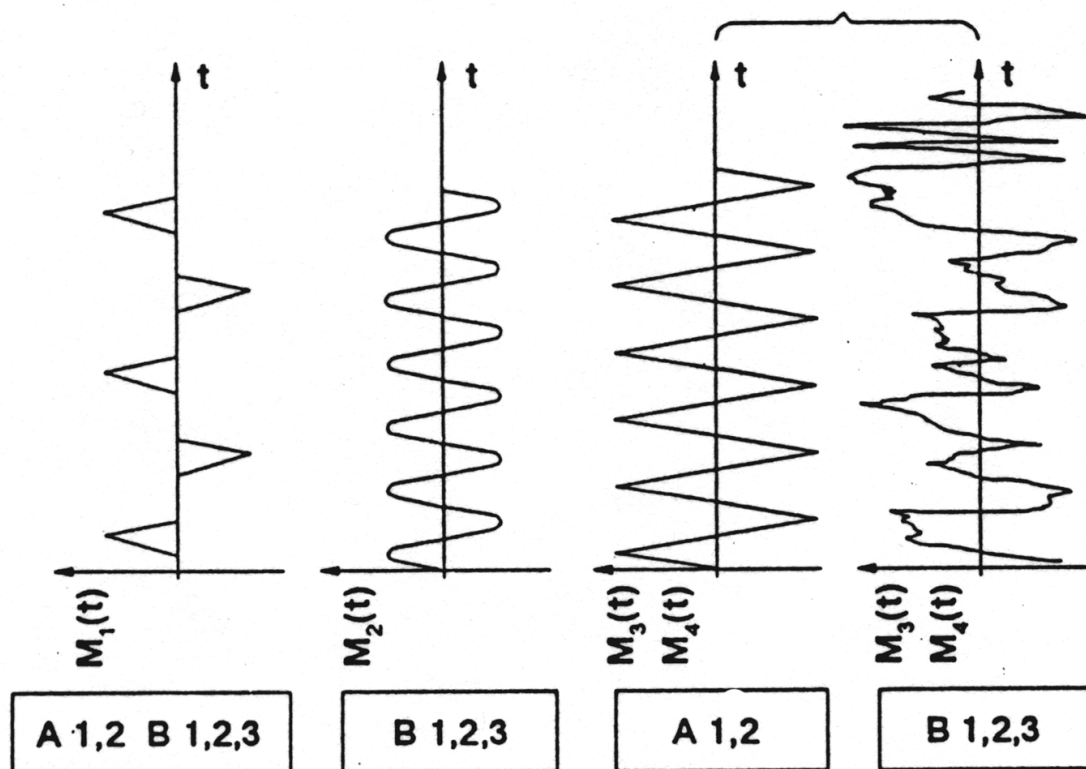


Obr. 3: Průběh technologických momentů

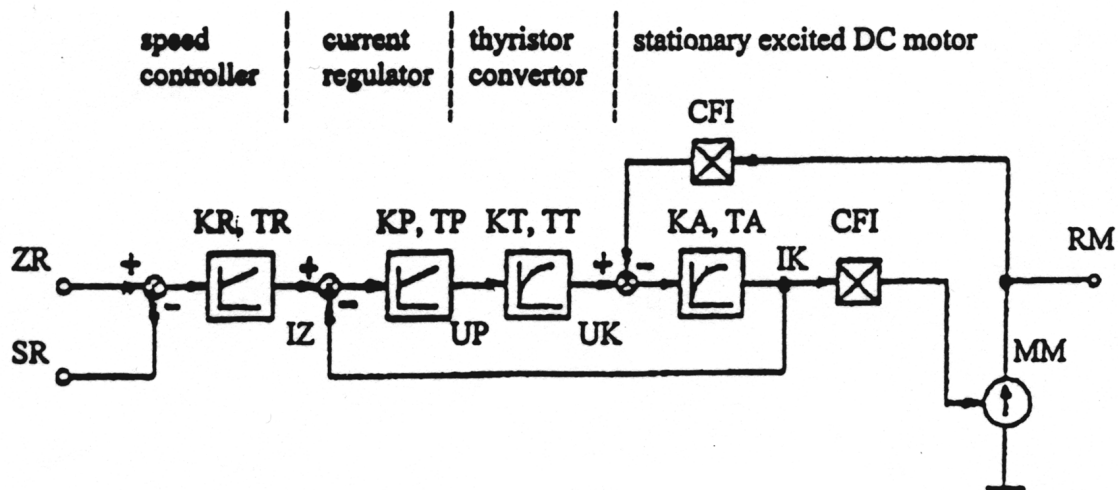


Obr. 4: Blokové schéma řídicího subsystému

V našich pracích [5] a [6] jsme řešili odezvy modelové soustavy na výše definovaná provozní zatížení. Ukázalo se, že především v oblastech I. a IV., tj. při náhlých změnách zatížení, může docházet k rozpojování soustavy a k výskytu rázů. Navíc se ukázalo, že i když je modelová soustava symetrická, odezvy v jednotlivých větvích mohou být různé. Vzhledem k těmto skutečnostem jsme analyzovali odezvy modelu na parazitní budící v nerovnovážných pracovních stavech. Modelová zatížení, reprezentující řídicí signály, parazitní kinematické buzení i poruchové šумы (deterministické periodické i stochastické – bílý šum), jsou patrný z obr. 5. Struktura řídicího subsystému pak je patrná z obr. 6.



Obr. 5: Modelová zatížení



Obr. 6: Struktura řídicího subsystému

### Sestavení matematického modelu

K sestavení matematického modelu a k následným simulačním experimentům byl využit program Dynast, který patří mezi tzv. specializované simulační programy (stejně jako např. programy Matlab, Simulink nebo Simplorer). To znamená, že vstupy do programu nemusí být nutně ve tvaru diferenciálních nebo algebrodiferenciálních rovnic (v našem případě), ale lze využít knihovny připravených modulů nebo šablon základních prvků pro příslušnou aplikaci. Je samozřejmé, že tyto moduly mají zpravidla tvar soustavy rovnic, popisujících modelový prvek.

Pro programový soubor Dynast je typické, že počítačový model elektromechanické pohonové soustavy lze sestavit také pomocí metodiky mnohopólového modelování, značně rozšířeného v oblastech elektrotechniky a elektroniky, ale jak je patrné i z našeho příkladu, nachází uplatnění i při modelování mechanických subsoustav. Ze základních prvků, obsažených v programovém souboru, byly využity následující:

- prvky typu R (resp. R1), představující nesetřvačný dynamický člen (použitý např. k modelování proporcionalního tlumení nebo elektrického odporu)
- prvky typu L, představující setřvačné členy, použité např. k modelování tuhosti pružin nebo k modelování elektrické cívky
- prvky typu C, další ze setřvačných členů, použité k modelování hmotných setřvačných členů nebo k modelování elektrického kondenzátoru
- prvky typu E, což jsou modely ideálního zdroje proměnné se zadanou závislostí na čase či jiné veličině. Může být použit k modelování neřízeného nebo řízeného zdroje rychlosti nebo elektrického napětí.
- Prvky typu J, opět model zdroje proměnné se zadanou závislostí na čase či jiné veličině, ale použitelný k modelování neřízeného nebo řízeného zdroje síly či momentu nebo elektrického proudu

Tyto prvky umožňují vytvořit mnohopólové schéma, na jehož základě je automaticky vygenerováno jádro počítačového modelu. K řešení soustavy takto získaných rovnic se v programu používá implicitní více kroková integrační Gearova metoda, modifikovaná

Rübnerem a Petersonem. V průběhu výpočtů se může automaticky měnit řád metody a délka integračního kroku a příslušné koeficienty aproximačního polynomu se optimalizují s cílem minimalizace doby výpočtu při respektování přípustné zbytkové chyby integrace. Navíc jsou koeficienty aproximačních polynomů voleny i s ohledem na zajištění numerické stability výpočtů.

### **Ukázka výsledků simulačních výpočtů**

S ohledem na povolený rozsah výpočtů uvedeme jen jeden příklad. Modelová soustava (obr. 2) je řešena při chodu naprázdno při řízených volnoběžných otáčkách (zatížení v místě 1) a při kinematickém buzení (v místě 2). Vůle ve vazbě (2-1) má hodnotu 0.1 rad, vůle ve vazbě (2-3) má hodnoty postupně 0.015, 0.030 a 0.050 rad. Na obr. 7 můžeme sledovat odezvové pružné a setrvačné momenty pro tyto vůle ve vazbách (2-1, vlevo) a (2-3, vpravo).

Rázy jsou patrné a je zřejmé, že s růstem vůlí se jejich intenzita zmenšuje. Na druhé straně se jejich „periodicita“ postupně mění na nahodilý průběh.

Tyto výsledky plně korespondují s průběhy rázu, znázorněných ve stavovém prostoru – viz obr. 8. V horním pásu jsou opět znázorněny odezvy v pružné vazbě (2-1) při postupném zvětšování vůlí.

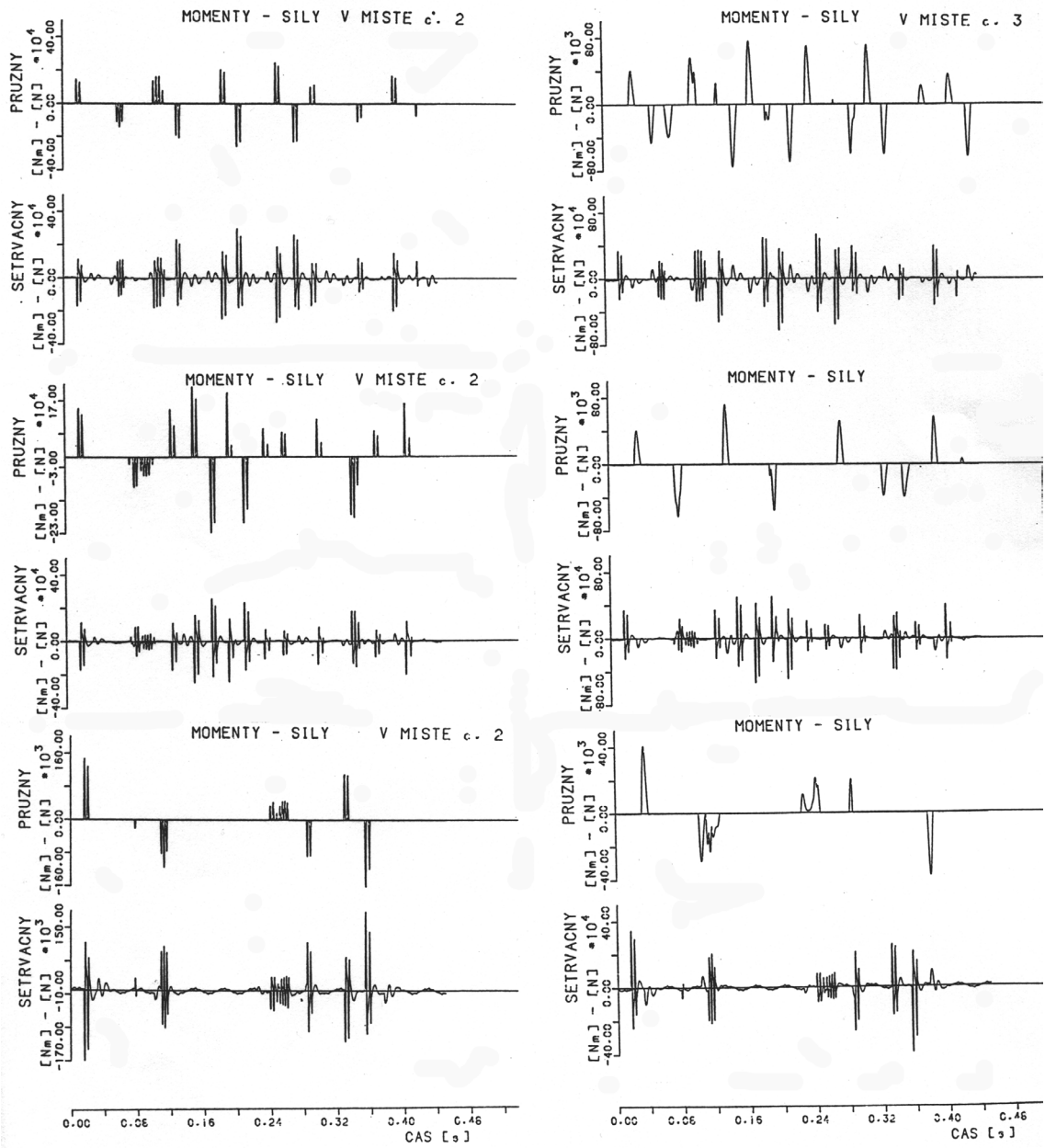
V dolním pásu je stejná situace znázorněna pro pružnou vazbu (2-3). Patrná je existence parazitních limitních cyklů na hranicích vůlí (u vazby 2-1 je to přibližně 0.01 rad, u vazby 2-3 postupně 0.015, 0.030 a 0.050 rad). Je rovněž patrné, že se s růstem vůlí zklidňuje průběh přechodových procesů v oblasti vůlí.

### **Závěr**

Ukazuje se, že sledování detailních průběhů odezev u složitých pohonových soustav s vůlemi ve fázové rovině umožňuje poznání souvislostí v oblasti přechodových stavů, včetně identifikací rázových (a v jiných případech i chaotických dějů). Z hlediska regulace pohonových soustav jsou výsledky těchto experimentů podstatné pro výběr míst, ze kterých „odebíráme“ zpětnovazební signály. Zde je důležitá nesymetričnost odezev i při symetrických substrukturách a předpokládaném symetrickém zatížení. Symetričnost vůlí ve větvích ovšem v praxi zajistit nemůžeme. Tyto a další výsledky simulací nakonec pomohly vyjasnit řadu problémů spojených s návrhem parametrů regulační soustavy.

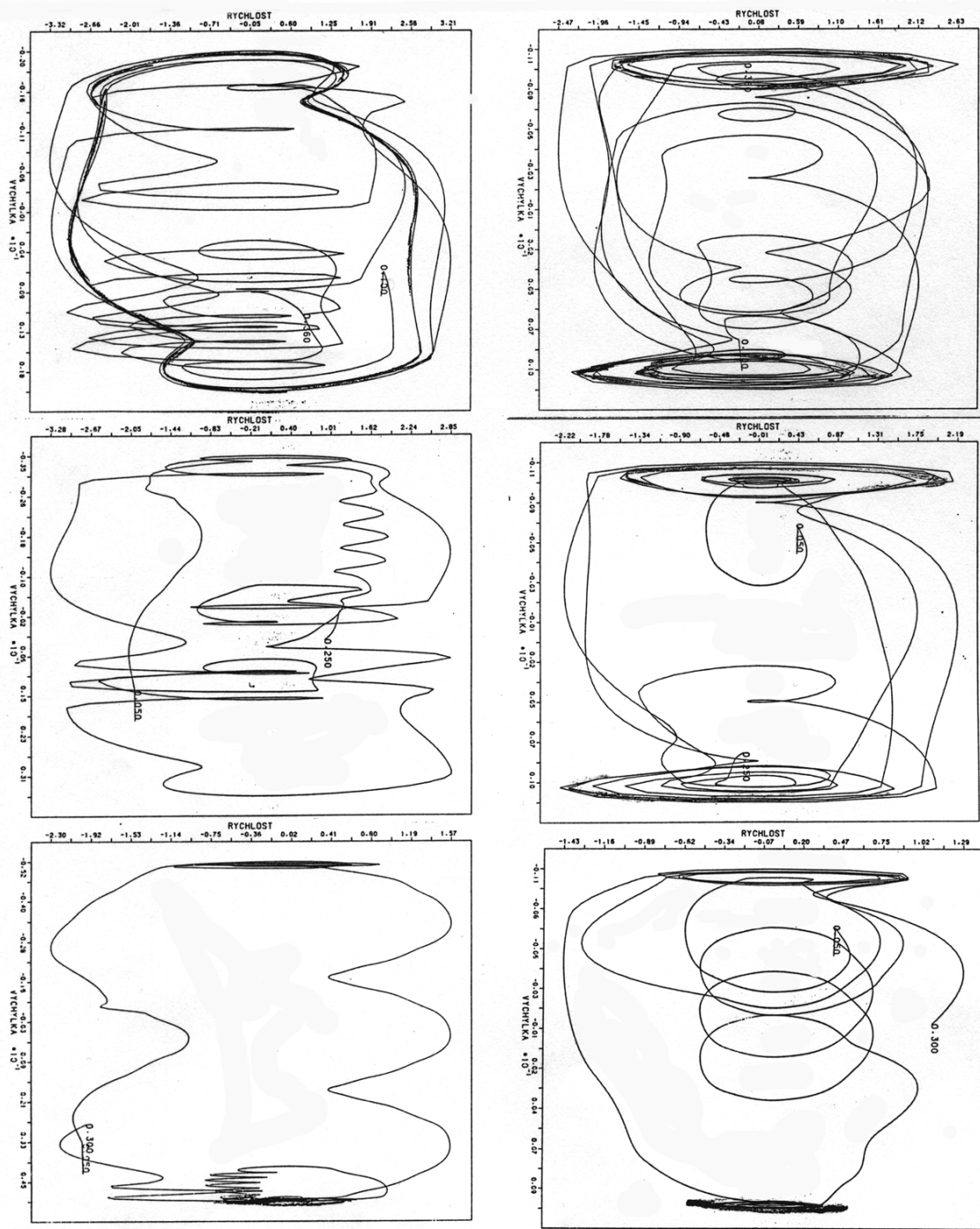
### **Poděkování:**

Článek vznikl na základě prací podporovaných projekty GAČR čísl. 101/00/0225/B a 102/00/1586.



Obr. 7: Časová odezva modelové soustavy v místech 2 a 3





Obr. 7: Časová odezva modelové soustavy v místech 2 a 3

## Literatura:

- [1] Peterka, F., Čipera, S.: Regions of subharmonic motions of the oscillator with Hertz's model of impact, Proc. of the Colloquium Dynamics of Machines 2002, pp. 145-152, Prague 2002
- [2] Půst, L., Peterka, F.: Response curves of vibroimpact system, Proc. of the Colloquium Dynamic of Machines 2002, pp. 159 - 166, Prague 2002
- [3] Kratochvíl, C., Kalous, J.: Contribution to mathematical modelling of drive parasitic vibrations, Proc. of the Colloquium Dynamic of Machines 2000, pp. 117-120, Prague 2000
- [4] Kratochvíl, C., Kotek, V., Krejsa, J.: The contribution to the Design of dynamic systems - Mathematical Models, Proc. of the Int. Conf. Problemy issledovanija projektirovanija i praizvodstva zubčatych peredač, pp. 80-95, Ihevsk, Russia 2001
- [5] Kratochvíl, C., Březina, T., Krejsa, J.: Modelling and analysis of dynamic properties of drive systems with gears, Symp. on Dynamical Systems Method for Data Analysis, CD-DETS 99, VIB-8336, September 99, Alexis park Resort and Spa, Las Vegas, Nevada, USA
- [6] Kratochvíl, C., Krejsa, J.: Contribution to Modelling Dynamic Properties of Drive Systems, Proc. of the Int. Conf. Dynamic of Machine Agregates, pp. 105-111, June 2000, Gabčíkov, Slovak Rep.