

Teze disertační práce

GLOBÁLNÍ CHARAKTERISTIKA TLUMIČE



Radek Votrubec

**Technická Univerzita Liberec
Fakulta mechatroniky a mezioborových studií**

Liberec 2005

Anotace:

V rámci této dizertační práce je představena nová metoda popisu tlumičů, tlumicích prvků, systémů pružina-tlumič používaných pro odpružení nápravy u automobilu, a popisu jiných pneumatických a hydraulických tlumicích systémů. Jedná se o globální charakteristiku, která vyjadřuje tlumicí sílu jako funkci rychlosti a zrychlení relativního pohybu pístnice a pracovního válce, narozdíl od standardně používané rychlostní charakteristiky, která obsahuje hysterezní smyčky závislé na frekvenci pohybu. Tato metoda byla úspěšně aplikována na tlumičích různých rozměrů a vlastností a byla použita na identifikaci tlumicího systému pružina-tlumič použitého jako součást čtvrtinového modelu automobilu. Použitím globální charakteristiky došlo k výraznému zpřesnění modelu, zejména v oblastech s vysokou rychlostí a zrychlením. Dále byla provedena celková analýza řízeného magnetoreologického tlumiče. Jeho charakteristika je ovlivňována změnou vlastností pracovní kapaliny prostřednictvím řízeného magnetického pole. Vytvořený simulační model byl použit k návrhu řídicího obvodu tlumiče, který byl optimalizován podle požadované globální charakteristiky.

Abstract:

This thesis proposes a novel method of the description of mechanical systems, such as dampers, damping elements, vehicle suspension systems and other pneumatic or hydraulic systems. This method is based on a global characteristic that expresses the damper force as a function of velocity and acceleration of the relative motion of a piston rod and working cylinder. Thus it has better properties than traditional velocity characteristics which includes hysteresis and depends on the frequency of motion. The proposed method has successfully been applied to dampers with different size and properties and to the identification of a damper-spring system, which is subsequently used to build up a quarter car model. A significant improvement has been achieved particularly for high speeds and accelerations. After that, a full analysis of a magnetorheologic damper was done. It is a kind of a controlled damper. Its characteristic can be changed by the modification of the properties of the working liquid using controlled magnetic field. Its simulation model was used to design the control system, which was optimized using the desired global characteristics.

Obsah:

1. Úvod	5
1.1. Přehled o současném stavu problematiky	5
1.2. Cíle dizertační práce	6
2. Globální charakteristika	7
2.1. Motivace	7
2.2. Standardní popis tlumiče	8
2.3. Definice globální charakteristiky	10
3. Identifikace globálních charakteristik reálných tlumičů	16
4. Identifikace soustavy pružina-tlumič	16
4.1. Popis čtvrtinového modelu automobilu	17
4.2. Identifikace	20
4.2.1. Charakteristika pružiny	20
4.2.2. Charakteristika tlumiče	21
4.2.3. Charakteristika pneumatiky.....	26
4.3. Nelineární čtvrtinový model	27
5. Identifikace a řízení magnetoreologického tlumiče	28
5.1. Měření na tlumiči	29
5.2. Globální charakteristiky	31
5.3. Identifikace neřízeného tlumiče	32
5.4. Identifikace tlumiče se závislostí na budícím proudu ..	35
5.5. Vlastní řízení magnetoreologického tlumiče	38
6. Závěr	43

1. Úvod

Disertační práce řeší dílčí problematiku projektu Aktivní vibroizolace, na kterém spolupracuje katedra řídicí techniky, již několik let s katedrou pružnosti a pevnosti na Fakultě strojní. Práce se zabývá novými možnostmi popisu tlumičů nebo jiných tlumicích jednotek, takzvanými globálními charakteristikami, jejich využitím při identifikaci a vytváření simulačních modelů tlumičů a při regulaci řízených tlumičů.

Globální charakteristiky popisují tlumič mnohem přesněji než standardně používané rychlostní charakteristiky (tj. závislosti tlumicí síly na rychlosti), zejména v oblastech s vyšší rychlostí a vyšším zrychlením, a umožňují zpřesnit simulaci systémů, kde jsou tyto prvky použity.

1.1. Přehled o současném stavu problematiky

Tlumiče se v současné době v automobilech používají na dvou místech. Hlavní použití je samozřejmě k tlumení nápravy. Dále jsou používány u některých osobních automobilů a hlavně pak u nákladních automobilů, autobusů a pracovních strojů v tlumicích systémech odpružených sedaček. Naladění pružení a tlumení automobilu musí splnit dva základní úkoly. Zaprvé je to tlumení nárazů, které vznikají při jízdě po nerovnostech a omezení přenosu vibrací na karosérii, tj. že musí vyhovovat z ergonomického a komfortního hlediska. Zadruhé je to omezení kmitání neodpružených hmot tak, aby byl zajištěn neustálý kontakt kola s vozovkou, aby mohly být nepřetržitě přenášeny hnací, brzdné i boční síly, tj. že musí vyhovovat z bezpečnostního hlediska. Tyto dva základní požadavky jsou protichůdné. Při použití neřízeného tlumiče je nutné zvolit přiměřený kompromis. Situaci navíc značně komplikuje velice variabilní zatížení vozidla.

Vylepšení oproti použití standardního kapalinového nebo plynokapalinového tlumiče přináší využití obtokových ventilů ve střední části tlumiče. Tato konfigurace mění velikost tlumicí síly vzhledem k amplitudě propružení, tj. při klidné jízdě klade tlumič menší odpor, protože část pracovní kapaliny se přepouští obtokovým kanálem a při větších amplitudách jsou obtoky vyřazeny a tlumicí síla se zvětší. Tyto tlumiče vyrábí zejména firma Monroe. Výhodou tohoto mechanického principu (PSD - Position Sensitive Damping) je zejména spolehlivost a nízká cena, ovšem charakteristiky tlumiče jsou pevně dány bez možnosti operativního řízení.

Počátkem osmdesátých let se objevily první tlumiče s třemi elektronicky přepínanými charakteristikami tlumení. Oproti mechanickému

řešení byly tyto tlumiče podstatně dražší a nebyly proto zařazeny do sériové výroby. Teprve od roku 2001 se začaly sériově používat elektronicky řízené tlumiče (CDC – Continuous Damping Control) firmy ZF Sachs, které obsahují elektromagnetický řídicí ventil uzavírající průtočné kanály a umožňující tak plynulé nastavení své charakteristiky od měkké po tvrdou. V současnosti jsou montovány tyto tlumiče do nejdražších modelů značek Audi, BMW, Ferrari, Maserati, Rolls Royce, Porsche a od konce roku 2004 i VW a Opel.

V hydrodynamické laboratoři strojní fakulty v Liberci – Doubí byl za účelem výzkumu v oblasti aktivního tlumení zkonstruován čtvrtinový model automobilu. Jedná se o dynamickou soustavu, která je tvořena odpruženou a neodpruženou hmotou. Neodpruženou hmotu reprezentuje kolo osobního automobilu, jehož pneumatika leží na budicím hydraulickém válci simulujícím funkci nerovné vozovky. Odpružená hmota, která se vertikálně pohybuje ve vodících lyžinách je pak spojena s kolem prostřednictvím pružiny a tlumiče. Při identifikaci tohoto čtvrtinového modelu vyšlo najevo, že použitý tlumič nelze jednoduše popsat jeho naměřenou rychlostní charakteristikou, protože tato charakteristika obsahuje hysterezní smyčky závislé na frekvenci buzení, a je tedy nejednoznačná. Z tohoto důvodu bylo nutné navrhnout novou metodu identifikace síly tlumiče. Při provedené rešerši bylo zjištěno, že všechny dosavadní modely, včetně známého Bouc-Wenova modelu, popisují tlumič pouze pomocí polohových a rychlostních závislostí. Navržená metoda rozšiřuje popis navíc o závislost na zrychlení.

Získání modelu tlumiče matematicko-fyzikální analýzou je velice složité, jelikož model je tvořen soustavou mnoha diferenciálních a algebraických rovnic s velmi obtížným určením konkrétních hodnot koeficientů.

1.2. Cíle dizertační práce

Hlavní cíle dizertační práce je možno zformulovat v následujících bodech:

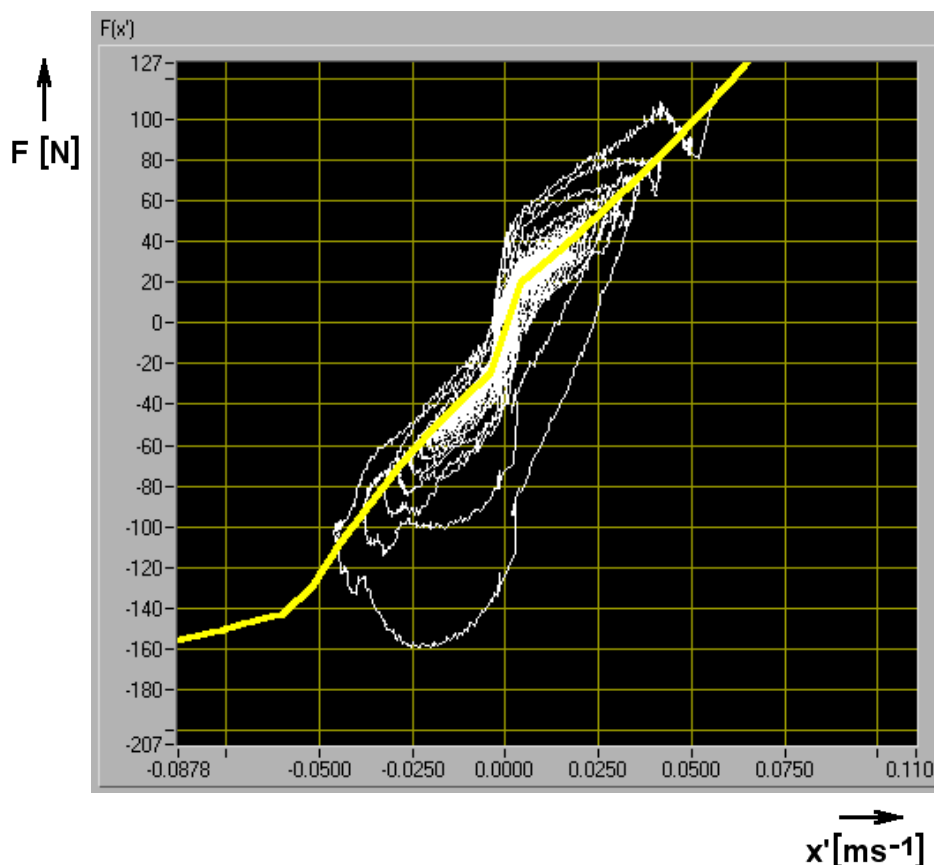
- vytvořit model tlumiče, který bude zohledňovat nejednoznačnost rychlostní charakteristiky a zpřesní tak jeho popis
- provést identifikaci čtvrtinového modelu automobilu zkonstruovaného v Hydrodynamické laboratoři Fakulty strojní v Liberci – Doubí
- provést identifikaci vybraného řízeného tlumiče a navrhnout jeho řízení pro úpravu jeho charakteristik

2. Globální charakteristika

V rámci této dizertační práce je představena nová metoda popisu tlumičů a jiných tlumících jednotek, tzv. globální charakteristika, která s sebou přináší značné zpřesnění modelu, zvláště pak při vysokých rychlostech a zrychleních.

2.1. Motivace

Tradičně je tlumič popisován svojí rychlostní charakteristikou, tj. závislostí síly na relativní rychlosti pístnice a pracovního válce. Při měření na reálných tlumičích se ukazuje, že ve skutečnosti je tato charakteristika nejednoznačná, objevují se na ní hysterezní křivky, jejichž velikost závisí na frekvenci, obr.2-1.



Obr. 2-1 Nejednoznačná rychlostní charakteristika tlumiče

Při modelování dynamického systému, který obsahuje tento prvek, nastává vzhledem k nejednoznačnosti problém s jeho popisem. Ve většině případů nezbyvá než přistopit k zjednodušení a hystereze neuvažovat. Při

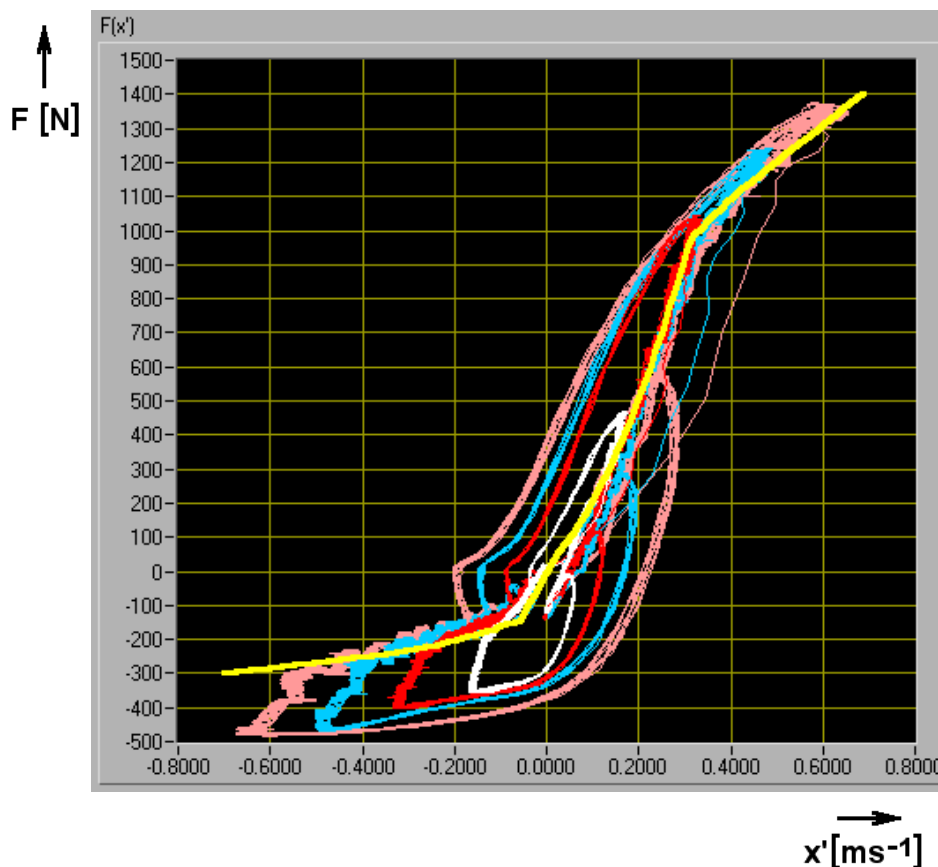
zakomponování tlumiče popsaného prostou rychlostní charakteristikou do celkového čtvrtinového modelu automobilu se ukázalo, že při vyšších zrychleních je odchylka simulace od skutečnosti nepříjemně veliká. Proto bylo nutné vymyslet nový přístup k popisu tlumiče, který bude přesněji vystihovat jeho chování a který bude zohledňovat i nezanedbatelné hysterezní křivky. Takovým vyjádřením je navržená globální charakteristika, která vyjadřuje sílu tlumiče jako závislost minimálně dvou proměnných - rychlosti a zrychlení.

2.2. Standardní popis tlumiče

Standardně chování tlumiče popisuje závislost jeho tlumicí síly na rychlosti.

$$F = F_R(\dot{x}) \quad (2-1)$$

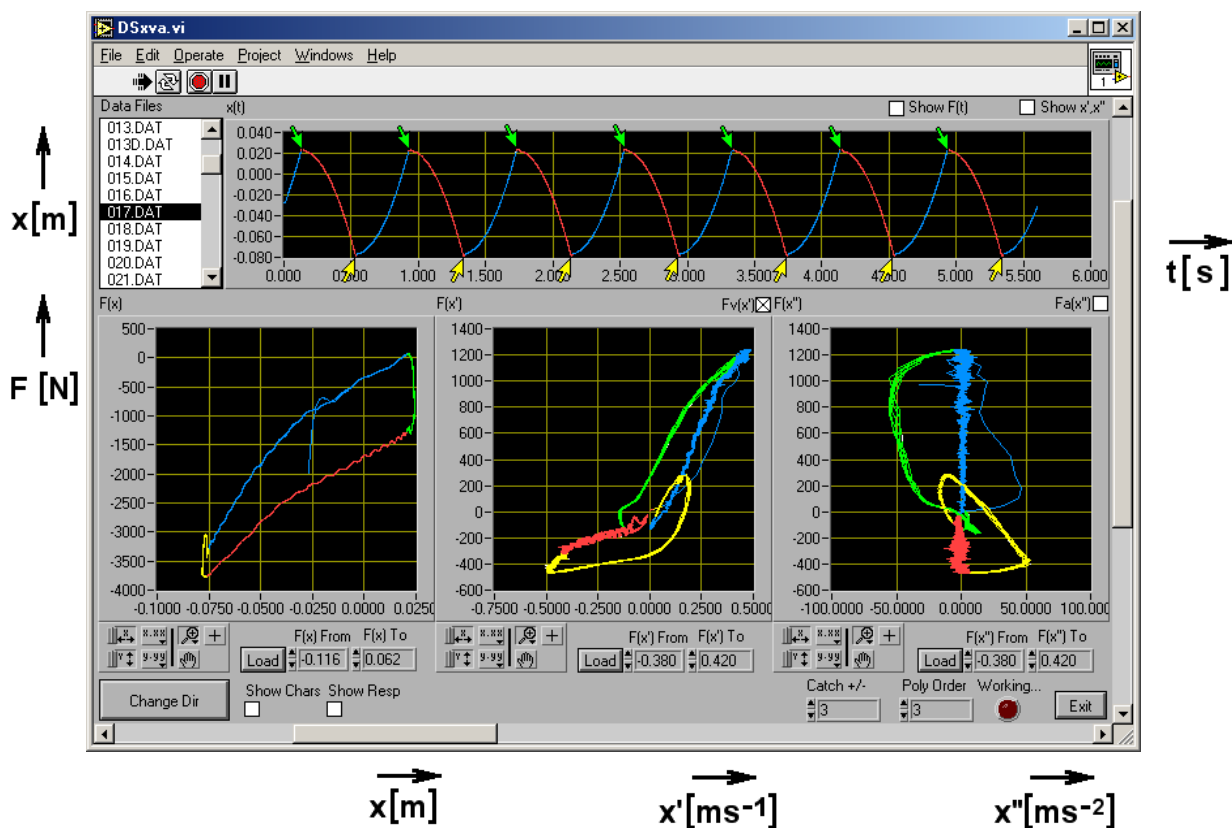
Tato závislost se nazývá rychlostní charakteristika, na obr.2-2 je znázorněna žlutě.



Obr. 2-2 Hysterezní smyčky na rychlostní charakteristice

Při měření na reálném tlumiči odpovídá průběh skutečné tlumicí síly rychlostní charakteristice jen při relativně malých rychlostech. Se zvyšováním frekvence budících kmitů se začínají objevovat odchylky od rychlostní charakteristiky v podobě hysterezních laloků, které jsou na obr.2-2 znázorněny bíle, červeně, modře a hnědě.

Výše popsanou situaci lze dobře demonstrovat, je-li např. tlumicí systém pružina-tlumič zatěžován budícími signály s vyššími frekvencemi nebo signály s nespojitým průběhem polohy, rychlosti nebo zrychlení, kde zrychlení dosahuje vysokých hodnot (prudká změna směru pohybu pístu), a kde se proto objevuje nárůst síly. U závislosti síly na rychlosti se objeví laloky. Takový případ je znázorněn na obr.2-3, kdy je tlumicí systém buzen signálem s po částech konstantním zrychlením. Jednotlivé úseky vybraného budícího signálu jsou barevně odlišeny. Modře je znázorněna část roztahování tlumicího systému, červeně část stlačování systému. Postranní laloky, které nevyhovují proložení jednou křivkou, odpovídají přechodovým dějům při změně směru pohybu (zelená a žlutá barva), kde se dosahuje velkého zrychlení.



Obr. 2-3 Přechodové děje s velkým zrychlením

Závislost síly na rychlosti ani závislost síly na zrychlení není v tomto případě možno určit, jelikož nelze nalézt ani jednu jednoznačnou nelineární

funkci. Oddělit lze pouze závislost síly na poloze, která je daná prakticky téměř pouze vlastností pružiny. Při řešení tohoto problému lze nahradit rychlostní závislost funkcí dvou proměnných, rychlosti a zrychlení. Tzn. že obecnou závislost

$$F = f(x, \dot{x}, \ddot{x}) \quad (2-2)$$

nelze rozložit na

$$F = f_1(x) + f_2(\dot{x}) + f_3(\ddot{x}) \quad (2-3)$$

ale lze ji zjednodušit na

$$F = f_1(x) + f_4(\dot{x}, \ddot{x}) \quad (2-4)$$

2.3. Definice globální charakteristiky

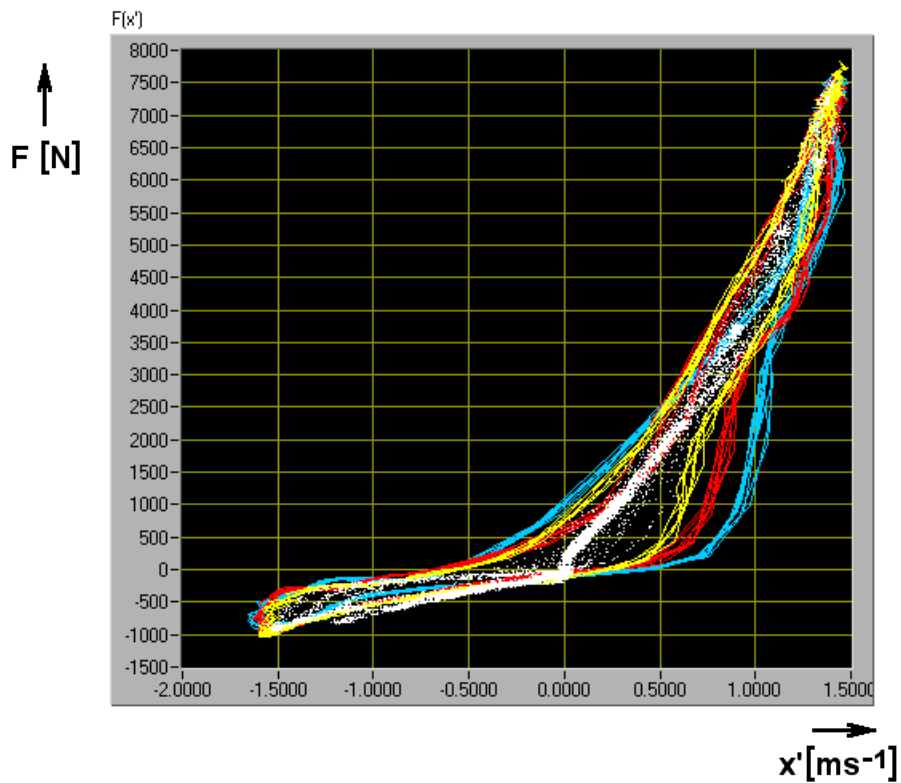
V práci [2] s odvoláním na [1] je identifikována přídavná, tzv. inerciální složka síly hydraulického tlumiče způsobující hysterizi rychlostní charakteristiky. Primární složka závisí na relativní rychlosti pístnice a pracovního válce. Je vytvářena průtokem pracovní kapaliny tlumiče hydraulickými odpory (kalibrované otvory stálého průtoku a proměnné škrticí štěrbinou výkonových ventilů). Podrobným rozбором situace lze deklarovat ještě sekundární, inerciální složku síly. Sekundární složka síly závisí na zrychlení kapaliny v přívodních kanálech ke škrticím elementům tlumiče a na časové změně hybnosti sloupců kapaliny v pracovních prostorách tlumiče. Tato složka síly způsobuje hysterizi rychlostní charakteristiky, kterou nelze matematicky přímo vyjádřit.

Při přesnější identifikaci síly hydraulického tlumiče je nutné respektovat obě složky. a sílu vyjádřit jako funkci rychlosti a zrychlení relativního pohybu pístnice a pracovního válce, tedy

$$F = f_G(\dot{x}, \ddot{x}) \quad (2-5)$$

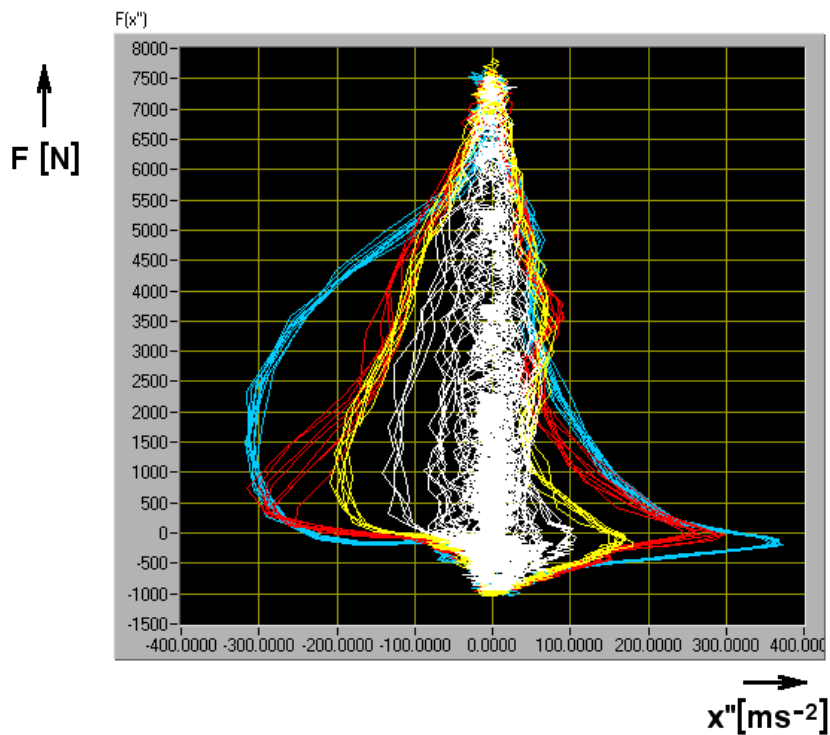
Uvedme, že v literatuře nemáme pro funkci (2-5) vyjádření a zdá se, že nejvhodnějším názvem bude globální (celková, výsledná) charakteristika tlumiče.

Na následujícím příkladu lze demonstrovat, jak byla globální charakteristika zavedena. Na obr.2-4 je naměřená závislost síly na rychlosti při sinusovém budicím signálu se zvyšující se frekvencí. Malé frekvenci odpovídá zřetelně se rýsující bílá jednoduchá rychlostní charakteristika. Pro frekvence vyšší se objevuje zmiňovaná hystereze.



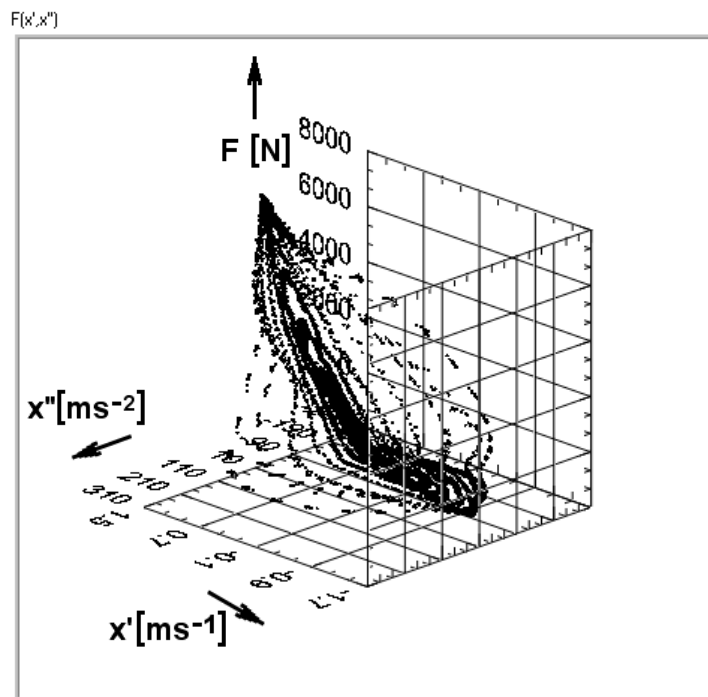
Obr.2-4 Rychlostní charakteristika tlumiče s hysterezí

Na obr.2-5 je znázorněn průmět měření do roviny síla-zrychlení.



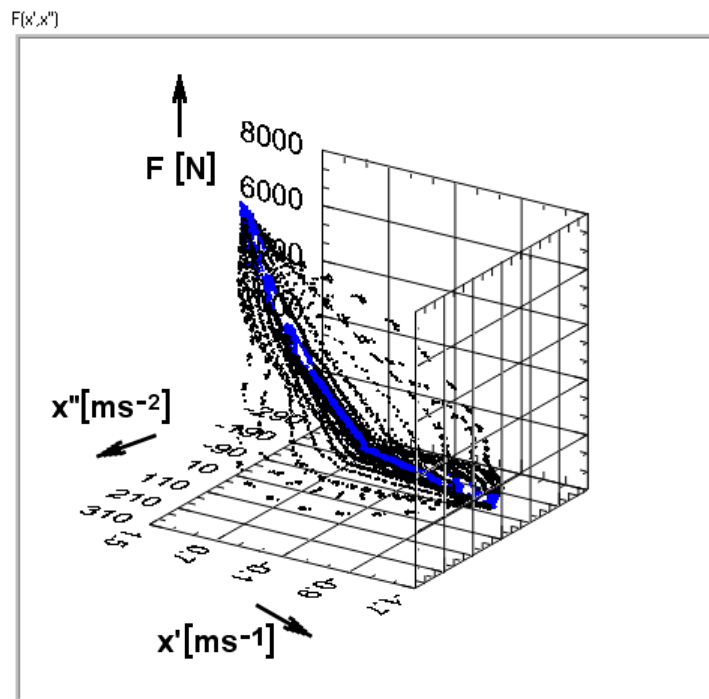
Obr.2-5 Průmět do roviny síla - zrychlení

Vyneseme-li naměřenou sílu v závislosti na rychlosti a zrychlení dostaneme prostorový útvar na obr.2-6.

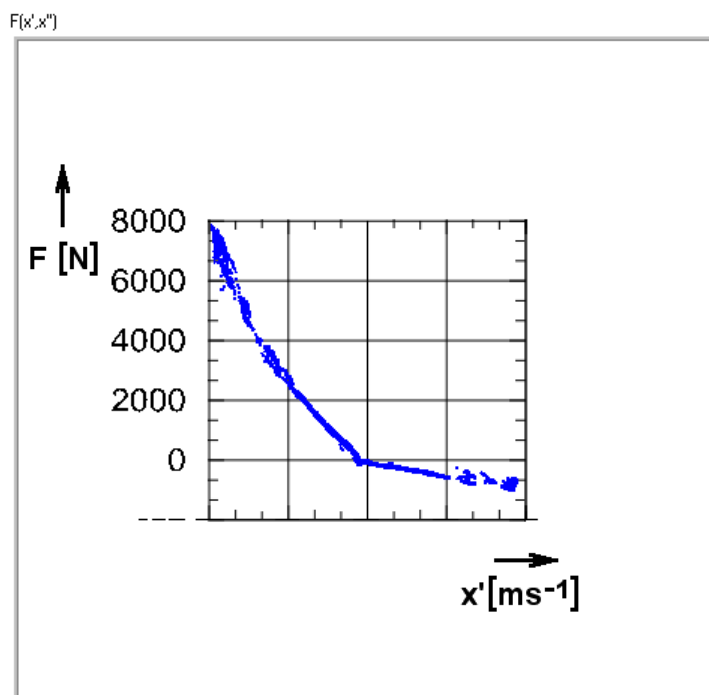


Obr.2-6 Síla v závislosti na rychlosti a zrychlení

Pro nulové zrychlení musíme dostat statickou rychlostní charakteristiku. Na obr.2-7 jsou zvýrazněna data, jimž odpovídá zrychlení z intervalu $-10\text{ms}^{-2} \leq \ddot{x} \leq 10\text{ms}^{-2}$, na obr.2-8 pak jejich průmět do roviny síla-rychlost.

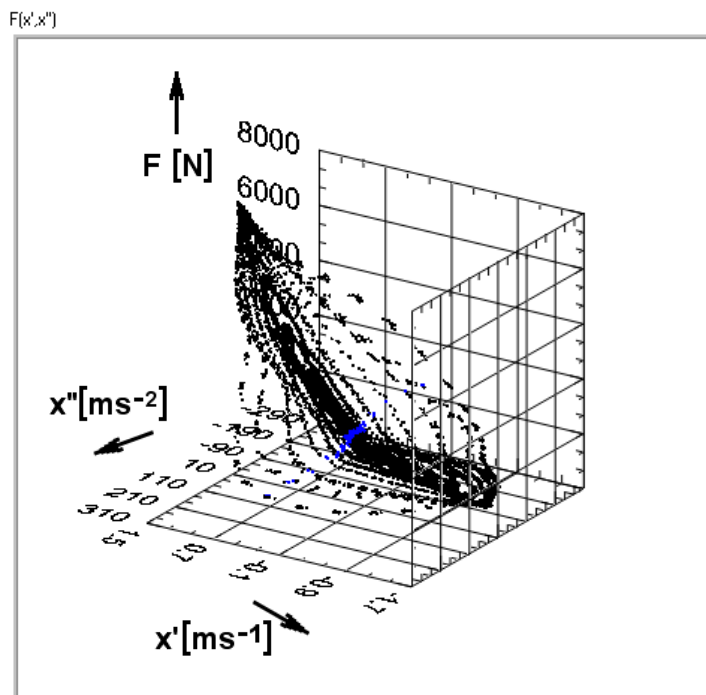


Obr.2-7 Statická rychlostní charakteristika

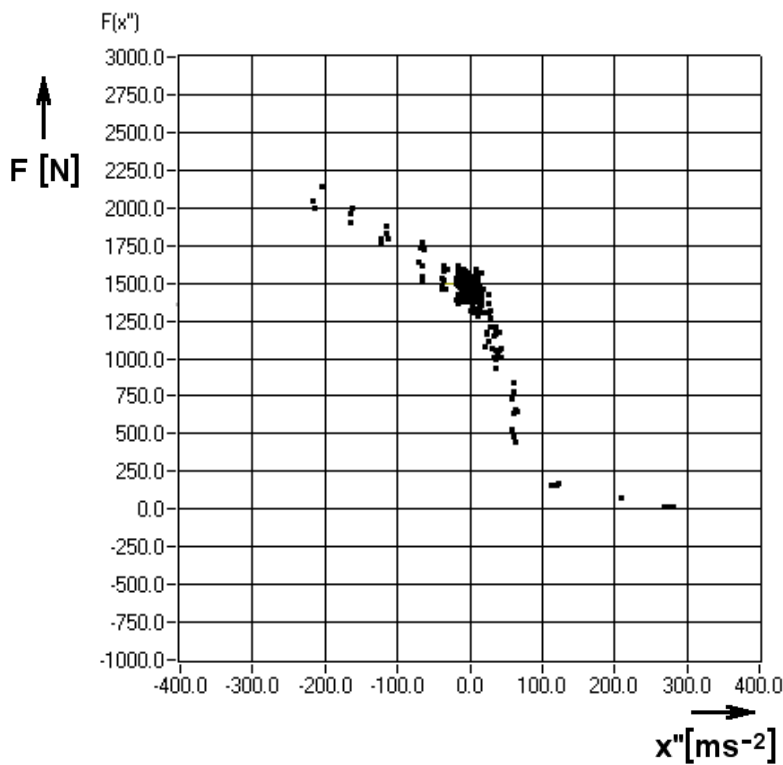


Obr.2-8 Průmět statické rychlostní charakteristiky

Pro lepší ilustraci závislosti na zrychlení jsou na obr.2-9 zvýrazněna data pro úzký interval rychlosti a na obr.2-10 pak jejich průmět do roviny síla-zrychlení.

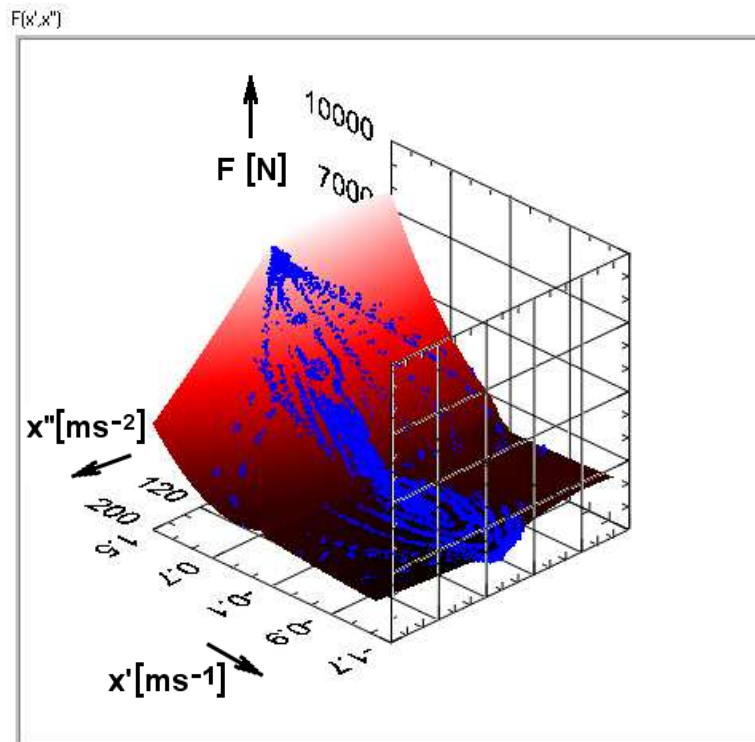


Obr.2-9 Závislost síly na zrychlení pro danou rychlost



Obr.2-10 Průmět závislosti síly na zrychlení pro úzký interval rychlostí

Z obr.2-6 až obr.2-10 je zřejmé, že síla vytváří nad rovinou rychlost-zrychlení plochu, kterou je možno jednoznačně aproximovat dvoudimenzionální matematickou funkcí. Například lze postupovat tak, že se navrhne rozdělení roviny proměnných $\dot{x}\ddot{x}$ na prostorové intervaly, na kterých se provede dvoudimenzionální polynomiální regrese. Přitom je třeba uvažovat vazební podmínky, které zaručí, že průsečíkem identifikované globální charakteristiky s rovinou $\ddot{x}=0$ bude právě statická rychlostní charakteristika. Získaná globální charakteristika je na obr.2-11.



Obr.2-11 Identifikovaná globální charakteristika tlumiče

Nejjednodušším popisem je obecná polynomiální plocha

$$f_G = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} a_{ij} \dot{x}^i \ddot{x}^j \quad (2-6)$$

Při rozdělení základní roviny na větší počet intervalů je postačující volit řády $(n-1)=2$ a $(m-1)=2$ a vynechat členy třetího řádu, tj. použít kvadratickou plochu

$$f_G = a_{00} + a_{01}\ddot{x} + a_{02}\ddot{x}^2 + a_{10}\dot{x} + a_{11}\dot{x}\ddot{x} + a_{20}\dot{x}^2. \quad (2-7)$$

3. Identifikace globálních charakteristik reálných tlumičů

Ve spolupráci s laboratoří TU Liberec Doubí byla provedena identifikace tří tlumičů rozdílných rozměrů a parametrů, tj. tlumič sedačky nákladního automobilu, tlumič osobního automobilu Škoda Favorit a tlumič nákladního automobilu Tatra.

4. Identifikace soustavy pružina-tlumič

Tato kapitola dokumentuje identifikaci tlumicího systému osobního automobilu Škoda Favorit. Jedná se o systém pružina-tlumič, který je použit jako součást čtvrtinového modelu automobilu. Hlavním cílem je identifikace celého čtvrtinového modelu, obr.4-1. Ukazuje se, že je výhodnější a přesnější identifikovat jednotlivé komponenty čtvrtinového modelu samostatně a z nich pak sestavit celkový model s uvažováním příčných vazeb. Dílčí komponenty mají silně nelineární charakteristiky, které lze takto lépe postihnout.

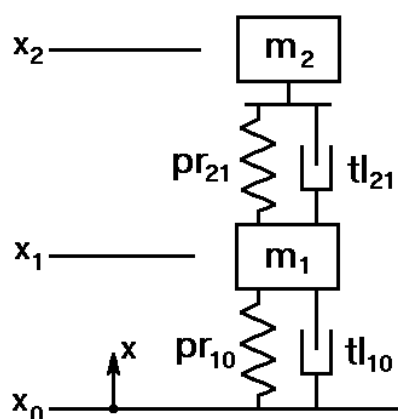


Obr.4-1 Čtvrtinový model

Při identifikaci bylo zjištěno, že pneumatiku lze aproximovat systémem pružina-tlumič s popisem pomocí nelineárních závislostí síly na poloze a síly na rychlosti. Skutečný tlumicí systém pružina-tlumič mezi odpruženou a neodpruženou hmotou je nutno popsat jeho globální charakteristikou, jelikož při standardním popisu tlumiče jeho nelineární rychlostní charakteristikou nedosahuje simulační model uspokojivých výsledků.

4.1. Popis čtvrtinového modelu automobilu

Čtvrtinový model se skládá z odpružené hmoty m_2 o souřadnici x_2 , soustavy pružina-tlumič pr_{21} - tl_{21} , neodpružené hmoty m_1 o souřadnici x_1 a pneumatiky pr_{10} - tl_{10} , budicí deska má souřadnici x_0 , obr.4-2.



Obr.4-2 Schéma čtvrtinového modelu

Standardní identifikace tohoto modelu spočívá v určení obou hmotností m_1 a m_2 a ve stanovení parametrů pr_{21} , tl_{21} , pr_{10} a tl_{10} , přičemž u pružných členů se jedná o nalezení nelineární závislosti síly na stlačení

$$F_{pr21} = k_{pr21}(x_2 - x_1) \quad (4-1)$$

a

$$F_{pr10} = k_{pr10}(x_1 - x_0) \quad (4-2)$$

a u tlumicích členů se jedná o nalezení nelineární závislosti síly na rychlosti

$$F_{tl21} = k_{tl21}(x'_2 - x'_1) \quad (4-3)$$

a

$$F_{tl10} = k_{tl10}(x'_1 - x'_0). \quad (4-4)$$

Matematicko-fyzikální analýzou celého čtvrtinového modelu pak dojdeme k následujícím diferenciálním rovnicím, které popisují vazby mezi jednotlivými komponenty.

Pro odpruženou hmotu lze psát pohybovou rovnicí ve tvaru

$$m_2 \bar{x}_2'' = -k_{tl21}(\bar{x}_2' - \bar{x}_1') - k_{pr21}(\bar{x}_2 - \bar{x}_1) + m_2 g. \quad (4-5)$$

Proměnné označené pruhem \bar{x}_2 a \bar{x}_1 mají počátky souřadnic odpovídající situaci před montáží. Vlivem hmotnosti m_2 a m_1 dojde při montáži k posunutí do nového ustáleného stavu s odpovídajícím způsobem stlačenými pružinami. V tomto stavu je výhodné zvolit nový počátek souřadnicového systému. V uvedených rovnicích to znamená eliminovat členy $m_2 g$ a $m_1 g$ a přejít do souřadnic označených proměnnými bez pruhů. Takto přepsaná diferenciální rovnice bude pak mít tvar

$$x_2'' + \frac{k_{tl21}(x_2' - x_1')}{m_2} + \frac{k_{pr21}(x_2 - x_1)}{m_2} = 0. \quad (4-6)$$

Pro neodpruženou hmotu lze podobně psát pohybovou rovnicí ve tvaru

$$m_1 \bar{x}_1'' = k_{tl21}(\bar{x}_2' - \bar{x}_1') + k_{pr21}(\bar{x}_2 - \bar{x}_1) - k_{tl10}(\bar{x}_1' - x_0') - k_{pr10}(\bar{x}_1 - x_0) + m_1 g, \quad (4-7)$$

po úpravě pak

$$x_1'' + \frac{k_{tl21}(x_1' - x_2')}{m_1} + \frac{k_{pr21}(x_1 - x_2)}{m_1} + \frac{k_{tl10}(x_1' - x_0')}{m_1} + \frac{k_{pr10}(x_1 - x_0)}{m_1} = 0. \quad (4-8)$$

V případě použití globální charakteristiky pro popis soustavy pružina-tlumič jsou síly (4-1) a (4-3) nahrazeny silou

$$F_{G21} = k_{PG21}(x_2 - x_1) + k_{TG21}((x_2' - x_1'), (x_2'' - x_1'')) \quad (4-9)$$

Pohybová rovnice (4-5) pro odpruženou hmotu se změní na

$$m_2 \bar{x}_2'' = -k_{TG21}((\bar{x}_2' - \bar{x}_1'), (\bar{x}_2'' - \bar{x}_1'')) - k_{PG21}(\bar{x}_2 - \bar{x}_1) + m_2 g. \quad (4-10)$$

po úpravě pak

$$x_2'' + \frac{k_{TG21}((x_2' - x_1'), (x_2'' - x_1''))}{m_2} + \frac{k_{PG21}(x_2 - x_1)}{m_2} = 0. \quad (4-11)$$

Pohybová rovnice (4-7) pro neodpruženou hmotu se změří na

$$m_1 \bar{x}_1'' = k_{TG21}((\bar{x}_2' - \bar{x}_1'), (\bar{x}_2'' - \bar{x}_1'')) + k_{PG21}(\bar{x}_2 - \bar{x}_1) - k_{H10}(\bar{x}_1' - x_0') - k_{PR10}(\bar{x}_1 - x_0) + m_1 g, \quad (4-12)$$

po úpravě pak

$$x_1'' + \frac{k_{TG21}((x_2' - x_1'), (x_2'' - x_1''))}{m_1} + \frac{k_{PG21}(x_2 - x_1)}{m_1} + \frac{k_{H10}(x_1' - x_0')}{m_1} + \frac{k_{PR10}(x_1 - x_0)}{m_1} = 0. \quad (4-13)$$

4.2. Identifikace

Zkoumaný dynamický systém pružina-tlumič je velice nelineární. Hledané závislosti síly na poloze a jejích derivacích se vyznačují zlomy. Řešením je rozdělení charakteristiky na více intervalů a nalezení jednotlivých polynomů pro vzniklé úseky. Pro analýzu naměřených dat bylo použito jednak běžných optimalizačních metod založených na minimalizaci kvadratického kritéria a jednak interaktivních metod vycházejících z předpokládaných fyzikálních podstat systému. Vzhledem ke složitosti popisu hledané charakteristiky a s uvážením výrazných nelinearit vznikají při pokusech o optimalizaci problémy s konvergencí řešení a k častému uvíznutí v lokálních minimech. Proto je lépe se zpočátku vydat cestou interaktivního hledání charakteristik a jeho výsledky použít jako počáteční podmínky pro optimalizaci.

4.2.1. Charakteristika pružiny

Určení charakteristiky pružiny vychází z předpokladu, že síla od tlumiče při nulové rychlosti je nulová a při malé rychlosti je vůči síle pružiny zanedbatelná. Nejde vlastně pouze o charakteristiku pružiny, ale o polohovou závislost síly tlumicího systému jako celku.

Při aproximaci daného úseku se postupuje tak, že se jeho hranice zvolí přibližně. Body zlomů a tedy hranice jednotlivých úseků se určí dodatečně z průsečíků sousedních nalezených polynomů.

Polynomiální regresí byla určena charakteristika pružiny následovně

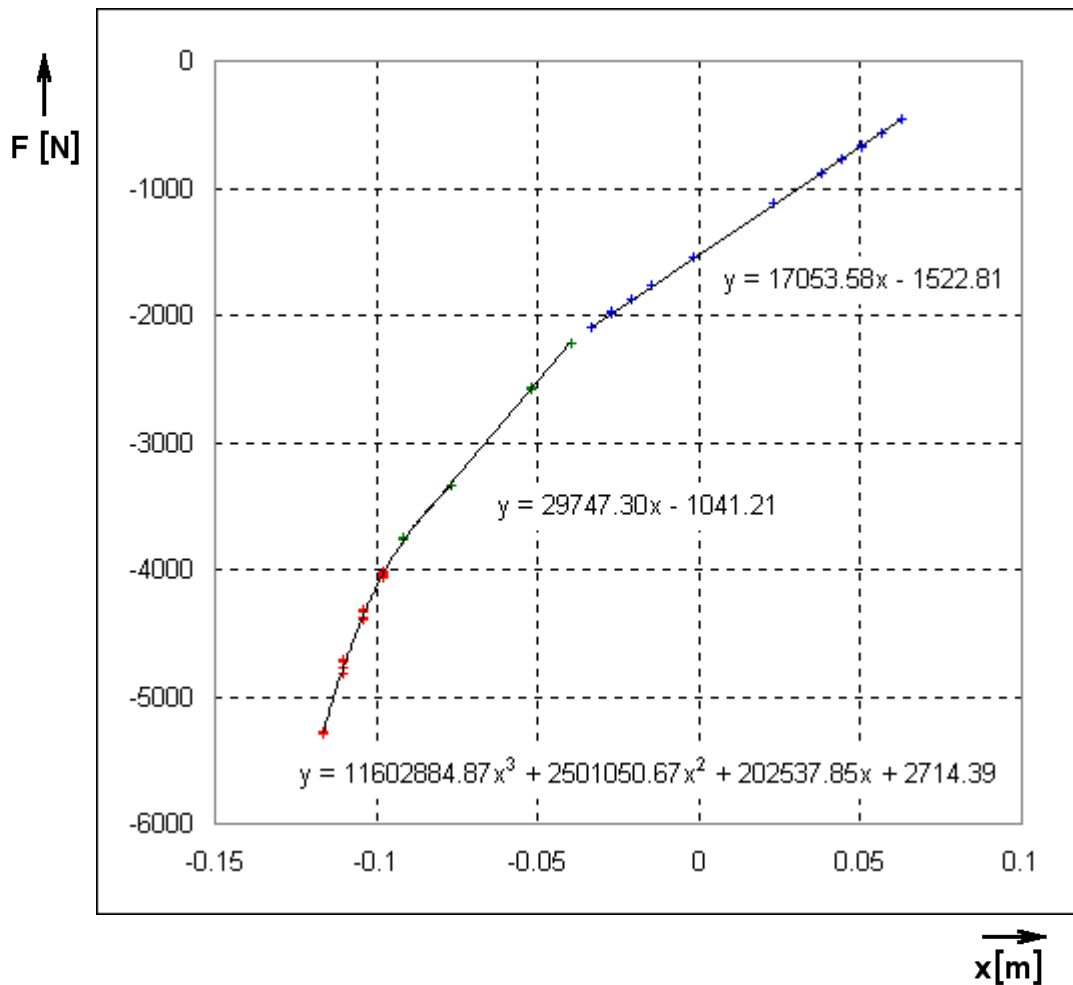
$$F_p(x) = 2714.39 + 202537.85x + 2501050.67x^2 + 11602884.87x^3, \quad (4-14)$$

pro $x < -0.09087215$

$$F_p(x) = -1041.21 + 29747.30x \quad \text{pro } -0.09087215 \leq x < -0.03794002, \quad (4-15)$$

$$F_p(x) = -1522.81 + 17053.58x \quad \text{pro } x \geq -0.03794002. \quad (4-16)$$

a je zobrazena na obr.4-3.



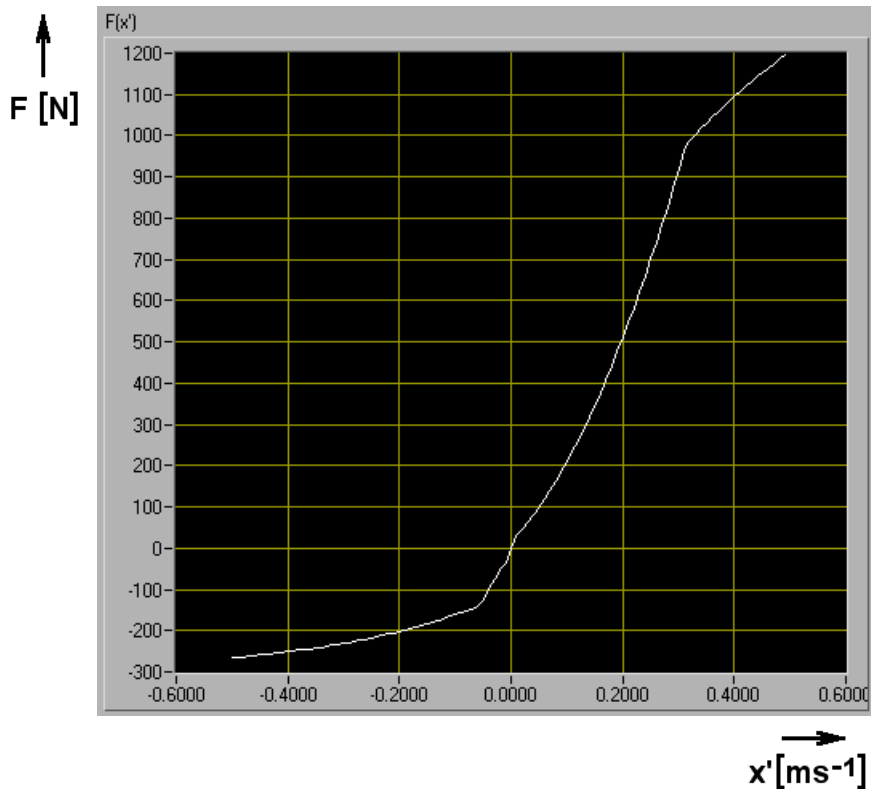
Obr.4-3 Charakteristika pružiny

4.2.2 Charakteristika tlumiče

Identifikace charakteristiky tlumiče respektive celé tlumicí jednotky jako celku spočívá v nalezení její globální charakteristiky, tzn. závislosti síly na rychlosti a zrychlení.

Nejprve je potřeba určit statickou rychlostní charakteristiku tlumiče. Data pro její určení získáme tak, že od celkové naměřené síly odečteme složku síly od pružiny, kterou simulujeme pomocí získané charakteristiky (4-14) až (4-16). Pro určení rychlostní charakteristiky tlumiče jsou vhodné zejména signály s vyšší frekvencí.

Identifikovaná rychlostní charakteristika tlumicího systému pružina-tlumič je zobrazena na obr.4-4 a je popsána rovnicemi (4-17) až (4-23).



Obr.4-4 Rychlostní charakteristika tlumicího systému

$$F_t(x') = -186.20 + 161.11x' \quad \text{pro } x' < -0.38 \quad (4-17)$$

$$F_t(x') = -110.91 + 557.35x' + 521.37x'^2 \quad \text{pro } -0.38 \leq x' < -0.05624 \quad (4-18)$$

$$F_t(x') = -17.61 + 1520.04x' - 11857.30x'^2 \quad \text{pro } -0.05624 \leq x' < -0.0001788 \quad (4-19)$$

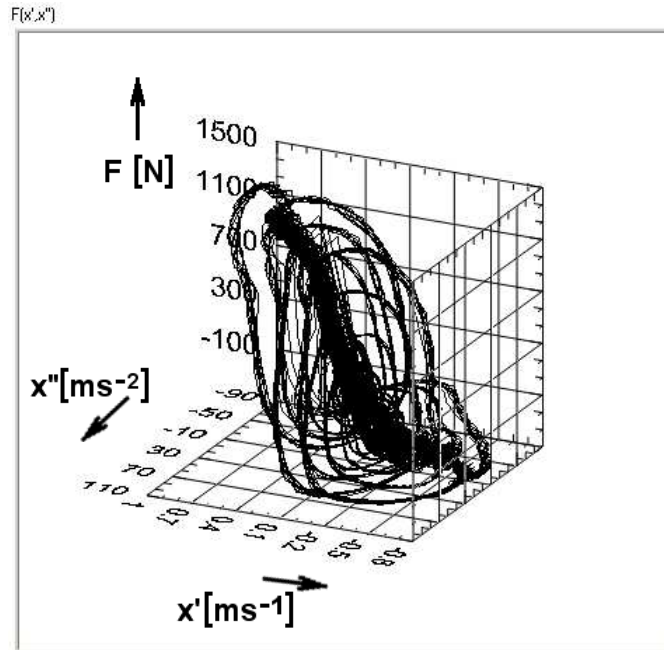
$$F_t(x') = 100000x' \quad \text{pro } -0.0001788 \leq x' < 0.00014343 \quad (4-20)$$

$$F_t(x') = 14.14 + 1415.52x' + 5332.91x'^2 \quad \text{pro } 0.00014343 \leq x' < 0.31219 \quad (4-21)$$

$$F_t(x') = 387.67 + 2292.67x' - 1309.43x'^2 \quad \text{pro } 0.31219 \leq x' < 0.42 \quad (4-22)$$

$$F_t(x') = 670.77 + 1068.64x' \quad \text{pro } x' \geq 0.42. \quad (4-23)$$

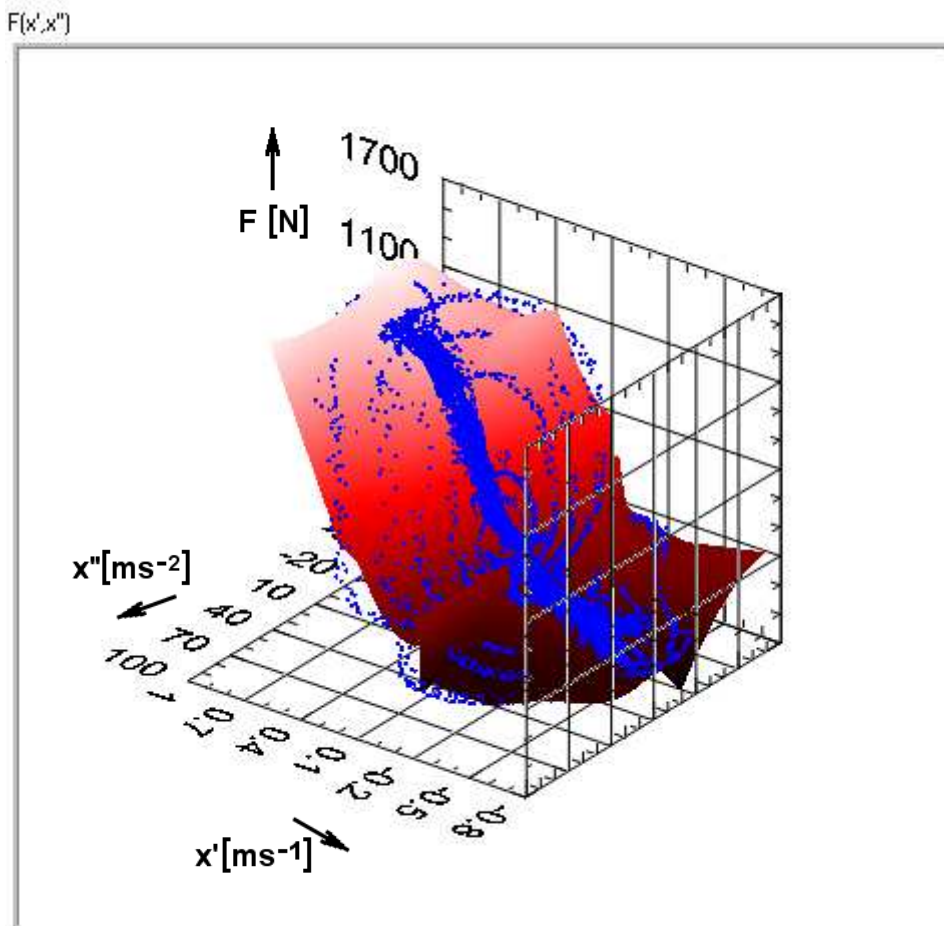
Data upravená pro hledání rychlostní závislosti, tj. od celkové naměřené síly je odečtena složka síly od pružiny, simulovaná pomocí charakteristiky pružiny (4-14) až (4-16), lze analyzovat jako funkci dvou proměnných, obr.4-5.



Obr.4-5 Určení charakteristiky tlumiče jako funkce dvou proměnných

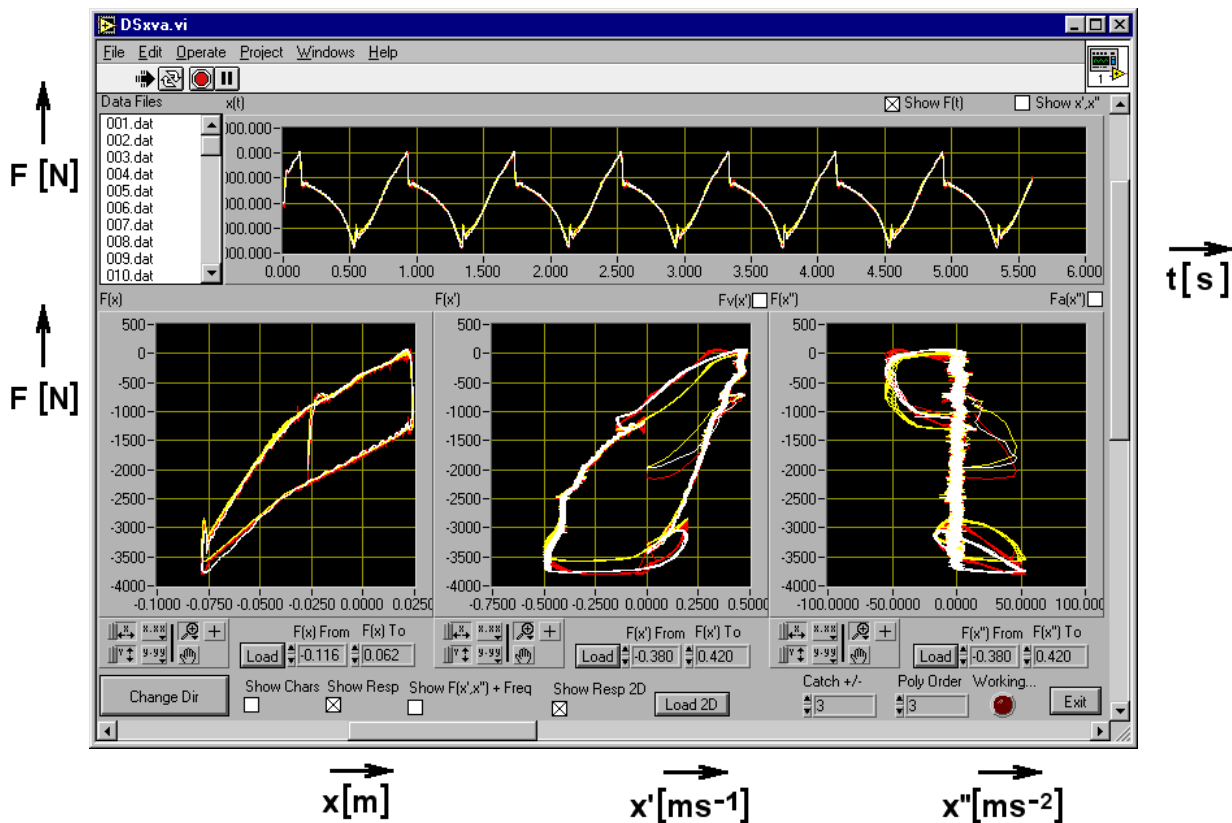
Při vytváření složené kvadratické plochy globální charakteristiky se vychází ze statické rychlostní charakteristiky, která definuje vazební podmínky pro sousední intervaly. Rovina $x'-x''$ je s ohledem na nelinearity interaktivně rozdělena na obdelníkové intervaly. Na těchto intervalech je pak postupně hledána regresní plocha, přičemž jsou zohledňovány vazební podmínky na hranicích intervalů tak, aby nalezená plocha byla spojitá.

Identifikovaná globální charakteristika je na obr.4-6 a je popsána soustavou čtyřiceti rovnic.

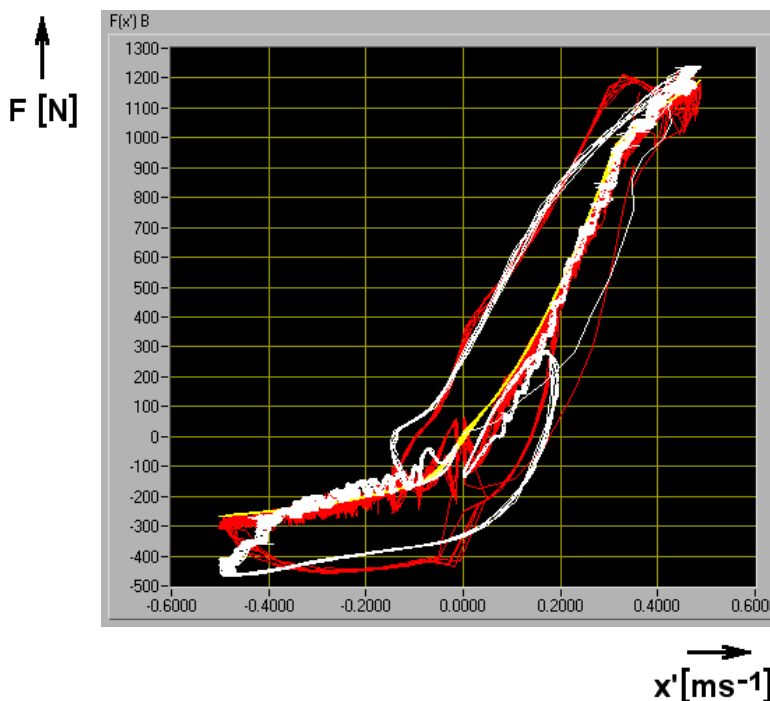


Obr.4-6 Globální charakteristika soustavy pružina-tlumič

Výsledky identifikace jsou dokumentovány na obr.4-7 a na obr.4-8. Bíle jsou zobrazena naměřená data, žlutě simulace pouze pomocí jednodimenzionální rychlostní charakteristiky a červeně simulace pomocí dvoudimenzionálního modelu globální charakteristiky, u které jsou postihnuty i nárůsty síly při změnách směru pohybu. Na obr.4-8 jsou zobrazeny průběhy tlumicí síly obou modelů a měření po odečtení složky závislé na poloze.



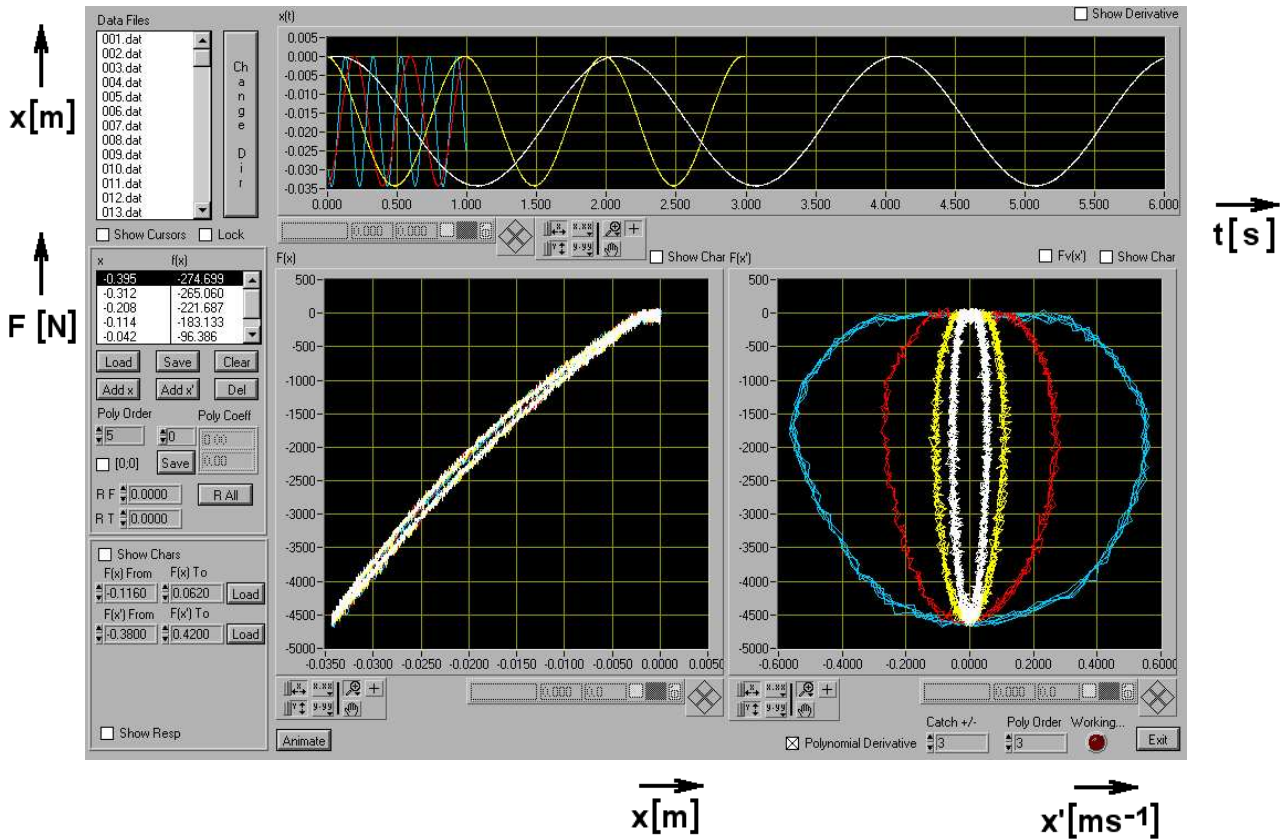
Obr.4-7 Porovnání výsledků 1D a 2D popisu



Obr.4-8 Porovnání výsledků 1D a 2D popisu – detail bez polohové složky

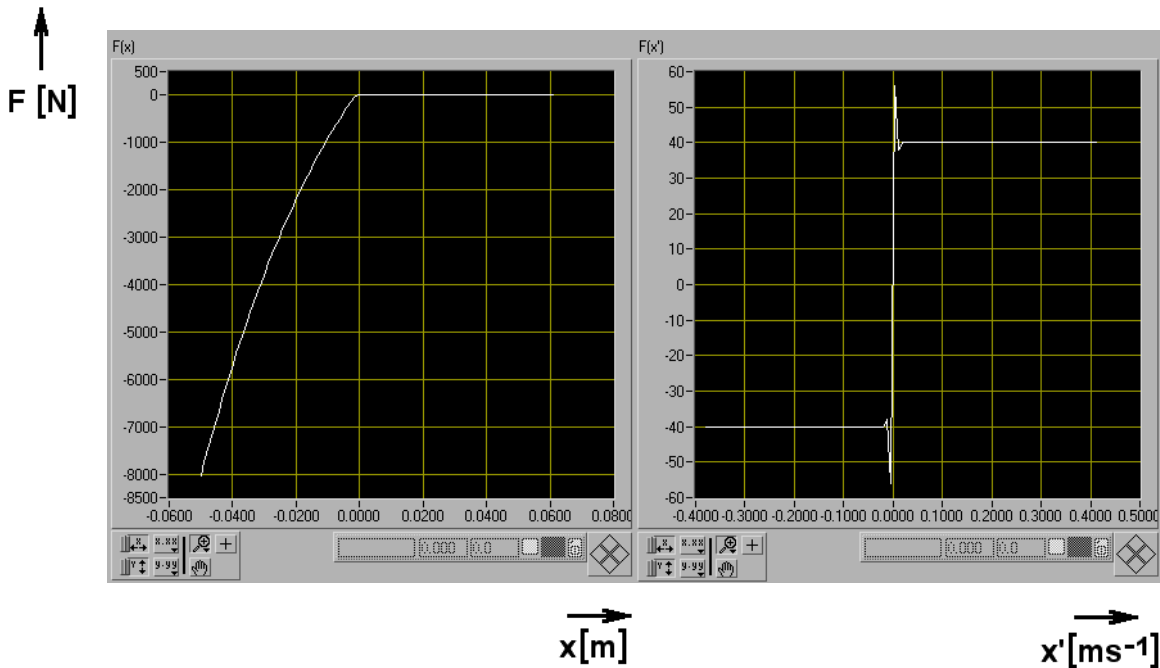
4.2.3. Charakteristika pneumatiky

Pneumatiku lze popsat stejně jako systém pružina-tlumič. Je proto možné použít stejných metod a stejný software pro její identifikaci, obr.4-9.



Obr.4-9 Identifikace pneumatiky

Síla pneumatiky je závislá převážně na stlačení, tj. na poloze. Na naměřených datech, obr.4-9, se objevuje mírná hystereze. Tato hystereze se narozdíl od klasického tlumiče zmenšuje se zvyšující se frekvencí budicího signálu. Je to pravděpodobně způsobeno třecí silou na dezénu pneumatiky při její deformaci. Tento jev se objevuje pouze za klidu, za jízdy, tj. při rotaci se třecí síla neobjevuje. Lze jí tedy buď úplně zanedbat, nebo popsat závislostí podle obr.4-10 vpravo.



Obr.4-10 Charakteristiky pneumatiky

Na obr.4-10 vlevo je znázorněna nalezená závislost na poloze. Nulová část odpovídá ztrátě kontaktu mezi pneumatikou a budicí deskou.

Pneumatiku lze tedy popsat jako závislost síly na poloze

$$F_{\text{tyre}} = 117.5 + 90819.5x - 1054460.8x^2 + 7788759x^3 \quad \text{pro } x \leq -0.00127, \quad (4-24)$$

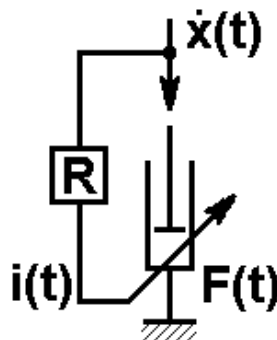
$$F_{\text{tyre}} = 0 \quad \text{pro } x > -0.00127. \quad (4-25)$$

4.3. Nelineární čtvrtinový model

Pro sestavení čtvrtinového modelu chybí pouze změřit obě hmotnosti m_1 a m_2 . Hmotnost odpružené hmoty byla stanovena pomocí siloměru $m_2 = 244 \text{ kg}$. Hmotnost neodpružené hmoty $m_1 = 40 \text{ kg}$.

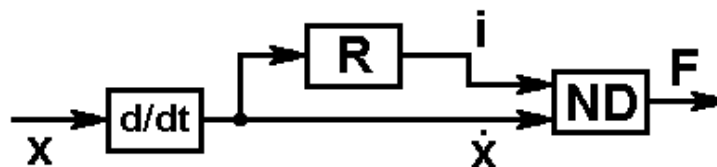
5. Identifikace a řízení magnetoreologického tlumiče

Magnetoreologický tlumič, obr.5-1, je řízený tlumič, v němž je použito pracovní medium, které mění svoje vlastnosti v závislosti na magnetickém poli a u něhož lze tedy jeho charakteristiku ovlivňovat řízením budicího magnetického obvodu. Zkoumaný magnetoreologický tlumič je sériově vyráběný tlumič americké provenience používaný v odpružených sedačkách nákladních automobilů. Součástí tlumiče je vlastní řídicí obvod, který umožňuje nastavení tří jízdních režimů, soft, medium a hard. Práci s tímto tlumičem je možno rozložit na dvě základní etapy. Nejdříve byl tlumič identifikován jako celek včetně vlastního řídicího obvodu ve všech režimech. Aby bylo možno vytvořit simulační model za účelem návrhu vlastního řízení, bylo nutné ve druhé fázi identifikovat tlumič i bez jeho vlastního řídicího obvodu.



Obr.5-1 Schéma magnetoreologického tlumiče

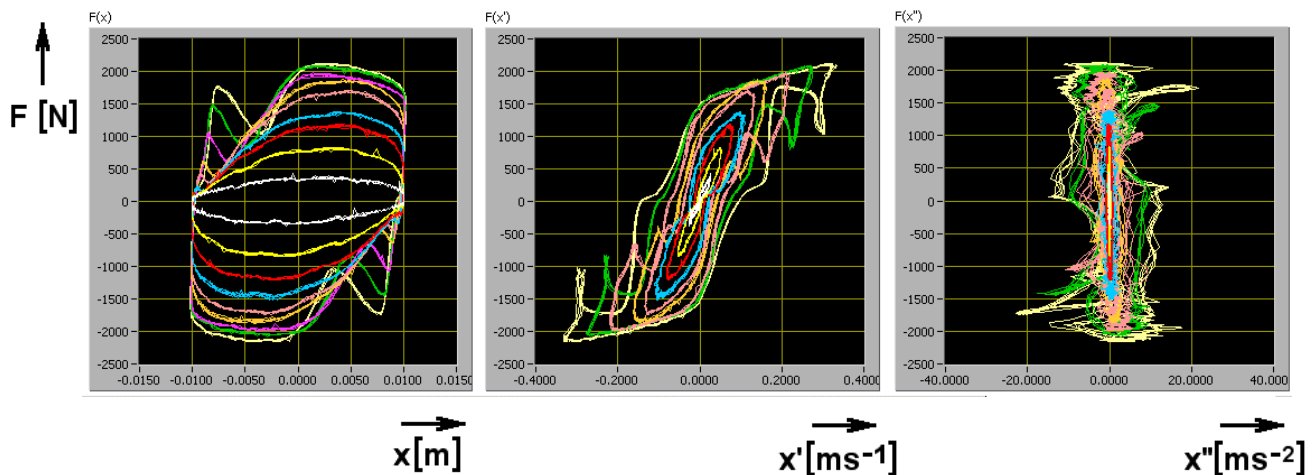
Pro identifikaci tlumiče včetně budicího proudu je nutné vycházet ze situace na obr.5-2. Budicí proud jako jedna vstupní veličina dynamické soustavy je generován vlastním regulátorem tlumiče, je tedy proměnnou závislou, odvozenou od druhé vstupní veličiny, tj. od rychlosti pohybu pístnice. Na vlastní identifikaci tato skutečnost nemá vliv, je pouze nutné vhodně volit budicí signály, aby byly dostatečně pokryty rozsahy obou vstupních veličin.



Obr.5-2 Identifikace včetně budicího proudu

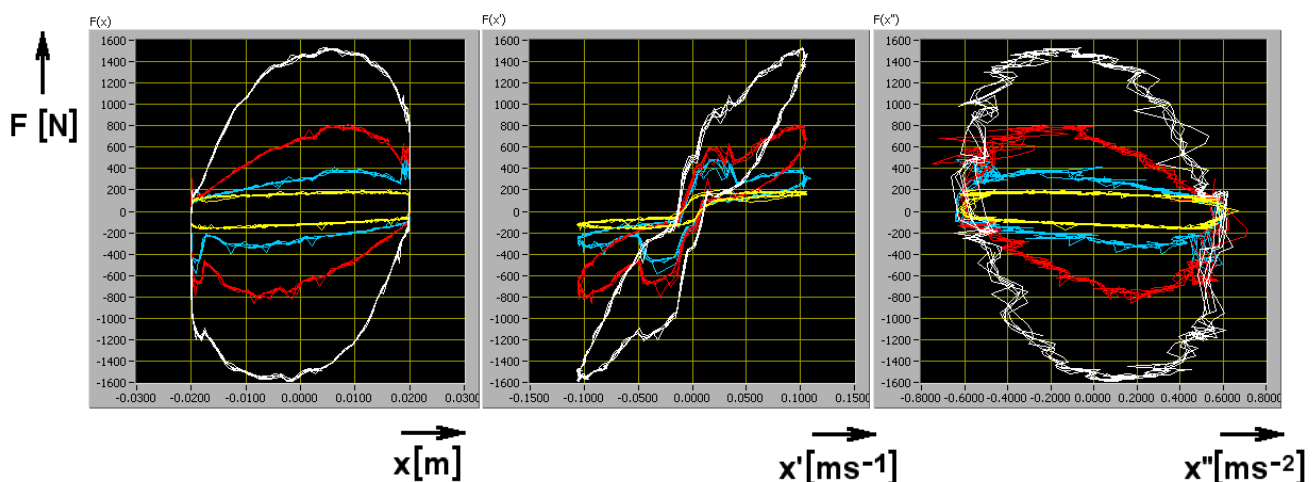
5.1. Měření na tlumiči

Měření byla prováděna na elektrodynamickém pulzátoru. Při měření byly sledovány následující veličiny: poloha, zrychlení, teplota pláště, síla při pohybu a řídicí proud z elektroniky tlumiče určující jeho útlumovou sílu na základě informace ze snímače.

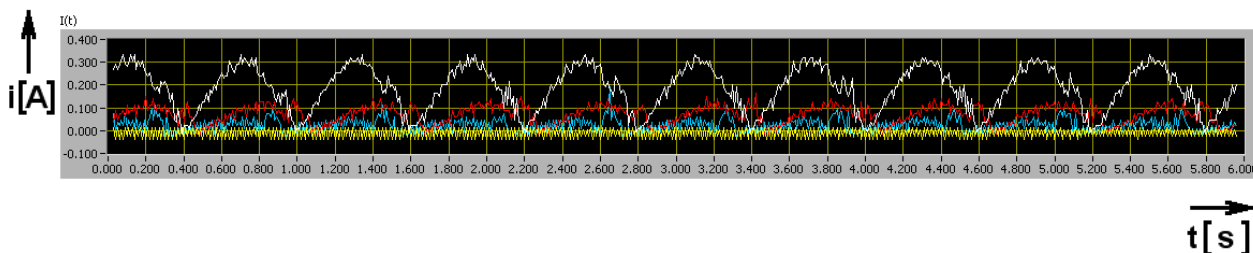


Obr.5-3 Závislost měřené síly na poloze, rychlosti a zrychlení, režim hard

Měření bylo provedeno pro všechny jízdní režimy, tj. pro tři nastavení vlastní regulační smyčky soft, medium a hard a při nezapojené regulační smyčce. Na obr.5-4 jsou zobrazeny závislosti tlumicí síly na poloze, rychlosti a zrychlení pro jeden vybraný harmonický budicí signál při různých režimech. Na obr.5-5 jsou odpovídající průběhy řídicího proudu. Žlutý průběh je s nezapojenou regulací, modrý pro režim soft, červený pro režim medium a bílý pro režim hard.



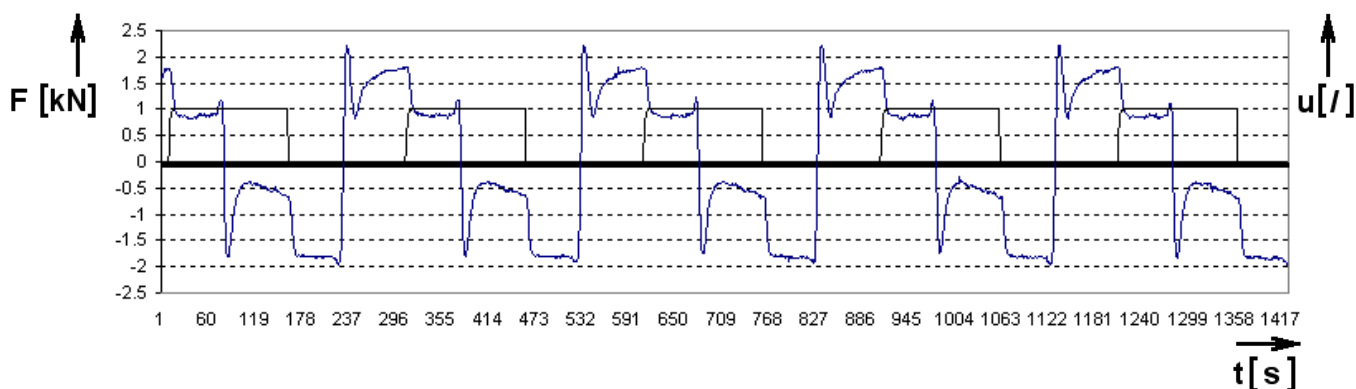
Obr.5-4 Režimy tlumiče



Obr.5-5 Režimy tlumiče – průběhy řídicího proudu

Kromě měření pro určení globální charakteristiky byla provedena měření pro zjištění dynamiky vlastního řízení tlumiče.

Jako vstupní signál dynamického systému lze pro tento účel definovat signál přepínání režimů, konkrétně stavů soft – hard. Tomuto odpovídá obdelníkový signál na obr.5-6. Druhý signál je měřená síla. Přepínání režimů se provádí na trojúhelníkových signálech různých frekvencí, tj. při konstantní rychlosti pístnice.

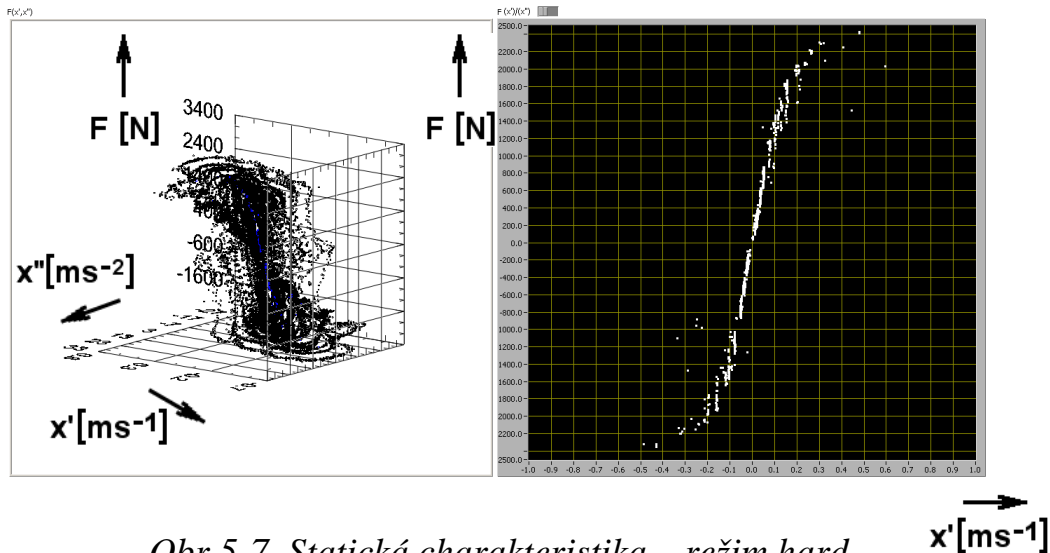


Obr.5-6 Měření pro zjištění dynamiky vlastního řízení tlumiče

Tato analýza umožnila vytvoření názoru na možnost použití zkoumaného tlumiče jako regulačního prvku. Časové konstanty se pohybují v řádu jednotek až desítek milisekund.

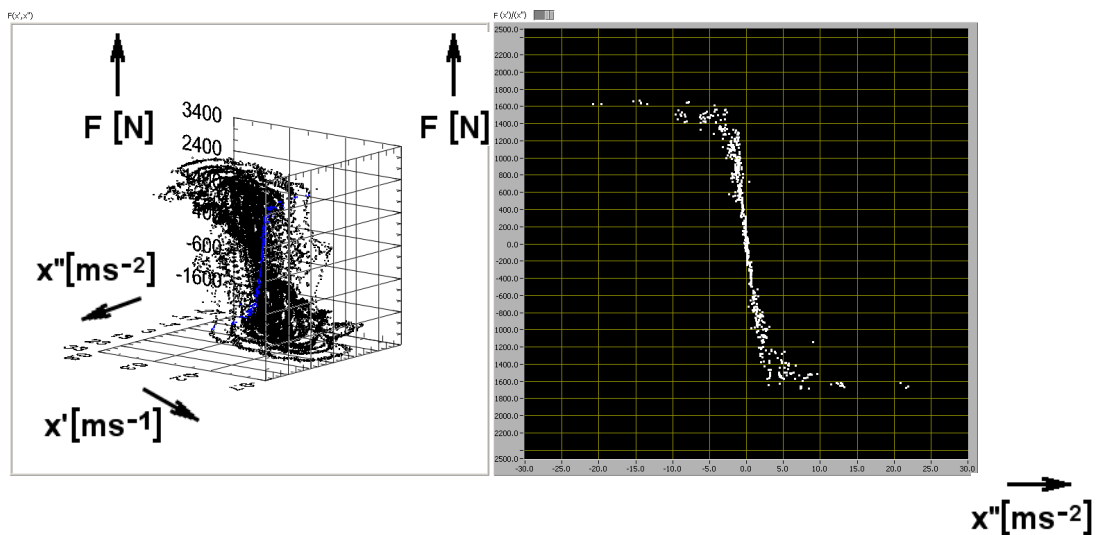
5.2. Globální charakteristiky

Na obr.5.7 je naměřená síla znázorněna jako funkce dvou proměnných: rychlosti a zrychlení. Vpravo je zobrazena statická charakteristika, která je dána řezem globální charakteristiky rovinou síla-rychlost pro zrychlení blízké nule.



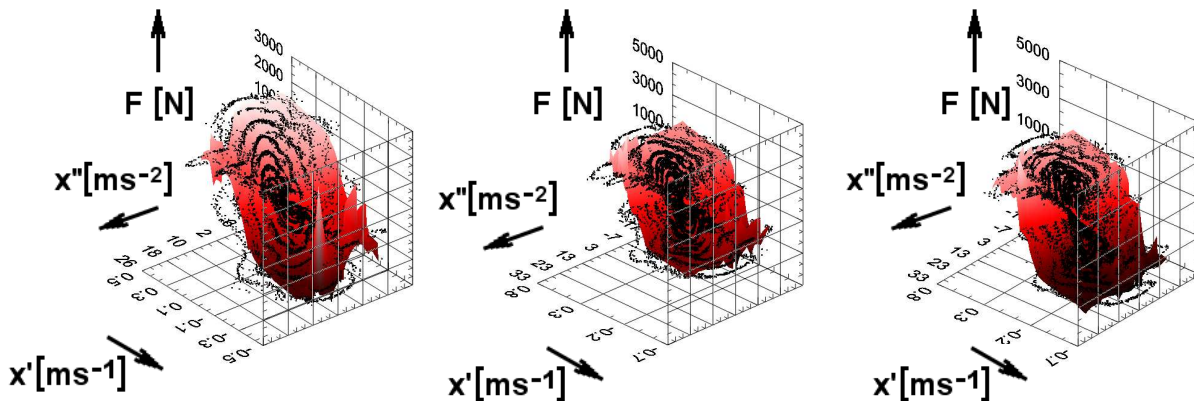
Obr.5-7 Statická charakteristika – režim hard

Tvar globální charakteristiky je nejlépe vidět na jednotlivých řezech. Na obr.5-8 je vidět závislost síly na zrychlení v rovině nulové rychlosti.



Obr.5-8 Závislost síly na zrychlení pro $\dot{x} = 0$ – režim hard

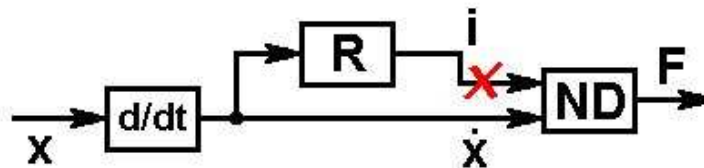
Nalezené globální charakteristiky pro všechny režimy jsou na obr.5-9.



Obr.5-9 Globální charakteristika – režim hard, medium a soft

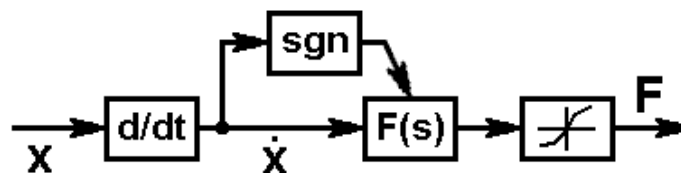
5.3. Identifikace neřízeného tlumiče

Identifikační schéma je na obr.5-10, vlastní regulační smyčka tlumiče je rozpojená, jedná se tedy pouze o SISO systém.



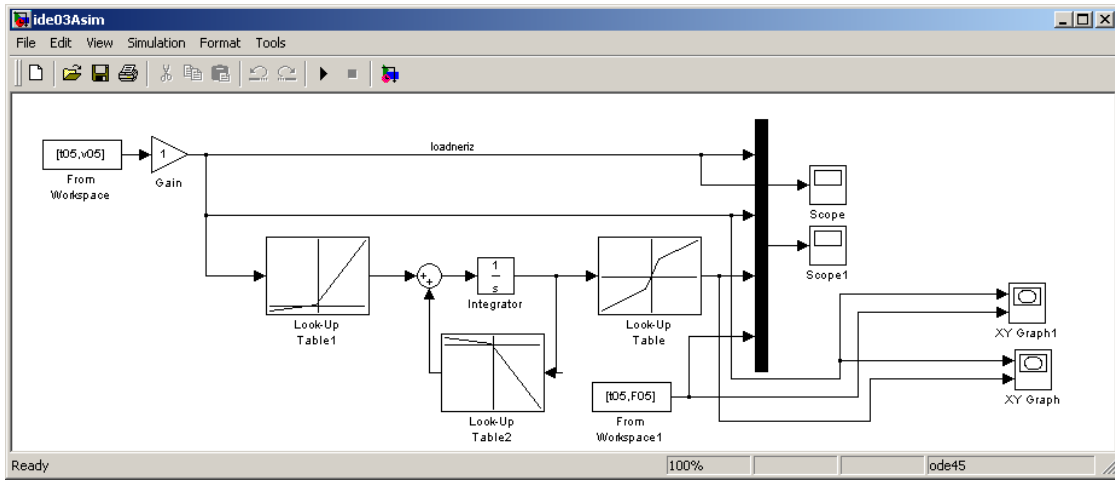
Obr. 5-10 Neřízený tlumič

Struktura nelineárního modelu neřízeného tlumiče je na obr.5-11. Nelineární rychlostní charakteristice je předřazen lineární dynamický systém s různými časovými konstantami pro každý směr pohybu.



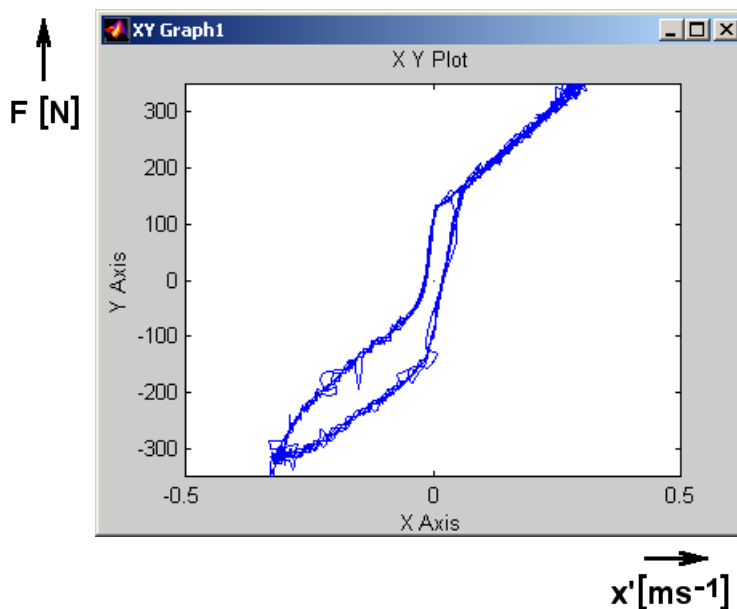
Obr.5-11 Struktura modelu neřízeného tlumiče

Simulační model neřízeného tlumiče je na obr.5-12

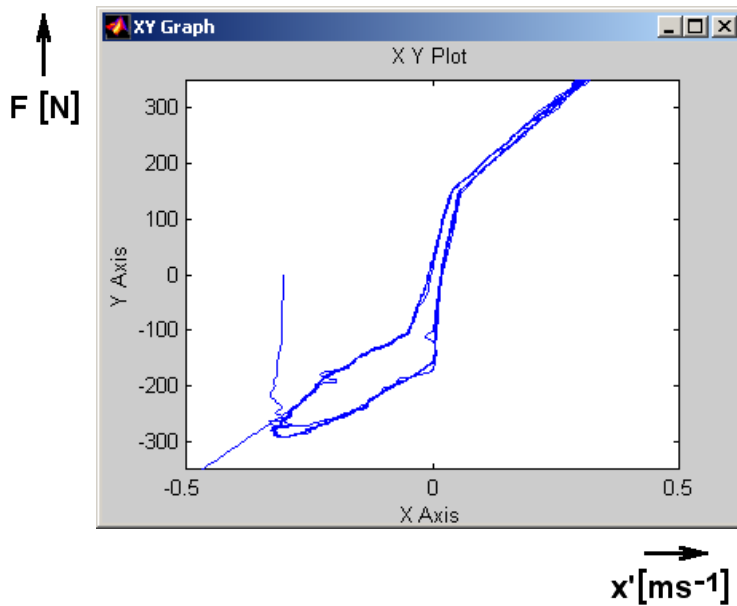


Obr.5-12 Simulační model neřízeného tlumiče

Nelineární rychlostní charakteristika byla zkonstruována na základě statických charakteristik neřízeného tlumiče. Časové konstanty jednotlivých obrazových přenosů byly určeny optimalizací, tj. minimalizací kvadratické odchylky identifikovaných a skutečných hodnot síly tlumiče. Směrnice nalezených závislostí v bloku LookUp Table1 a LookUp Table2 na obr.5-24 jsou $k_-=64,1$ a $k_+=705,5$. Výsledky identifikace jsou prezentovány na závislosti síly na rychlosti na obr.5-13 a obr.5-14 a na časových průbězích síly na obr.5-15.



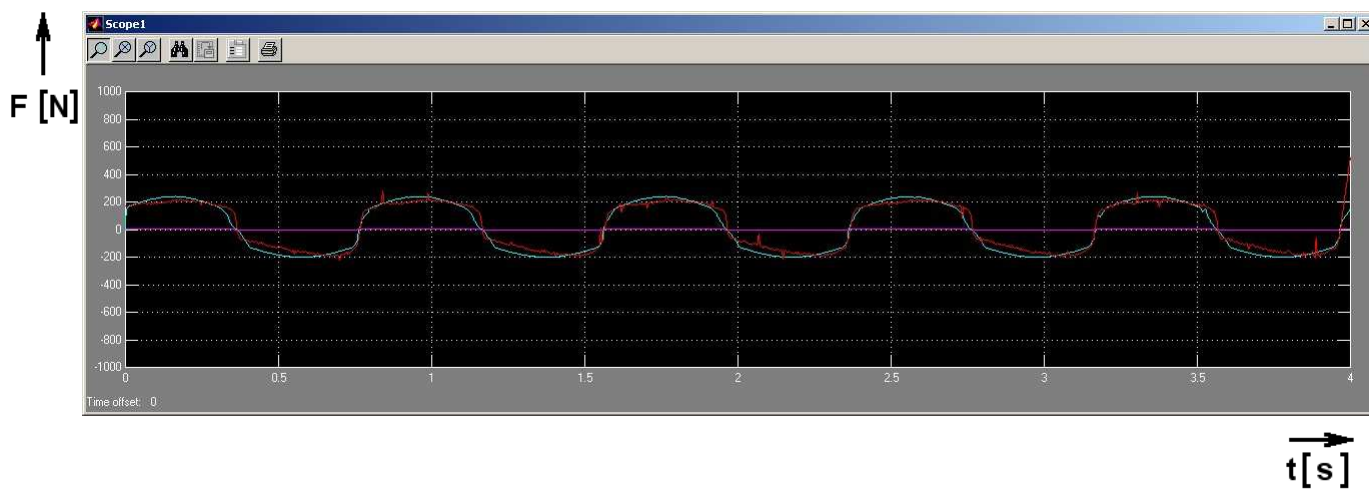
Obr.5-13 Závislost síly na rychlosti pro neřízený tlumič - naměřená



Obr. 5-14 Závislost síly na rychlosti proneřížený tlumič - identifikovaná



Obr. 5-15a Průběh síly v čase, červená naměřená, modrá identifikovaná

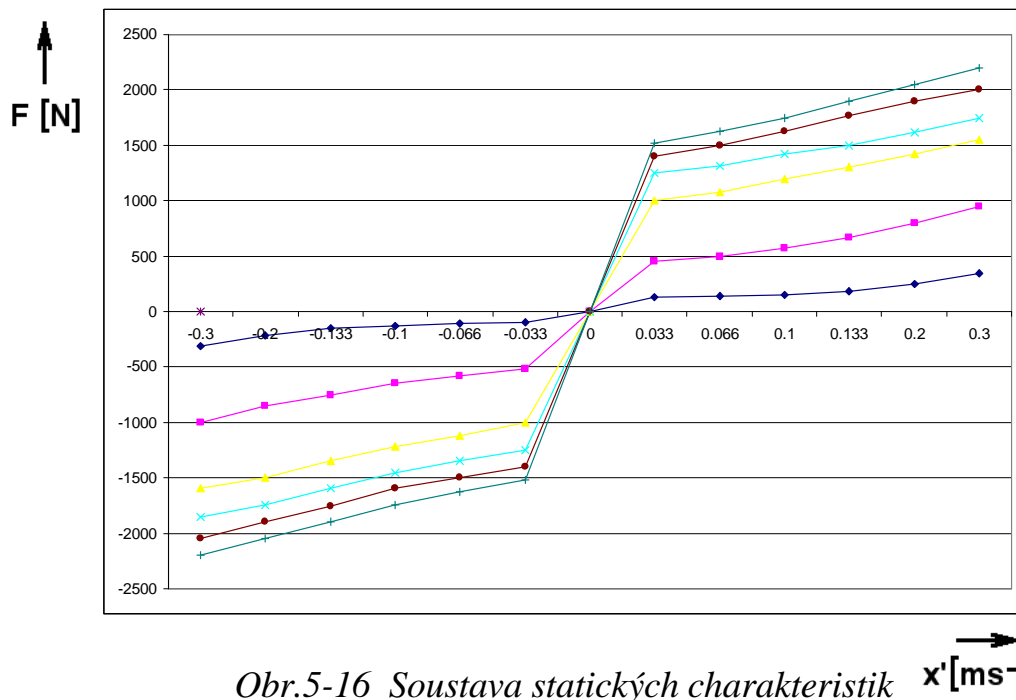


Obr. 5-15b Průběh síly v čase, červená naměřená, modrá identifikovaná

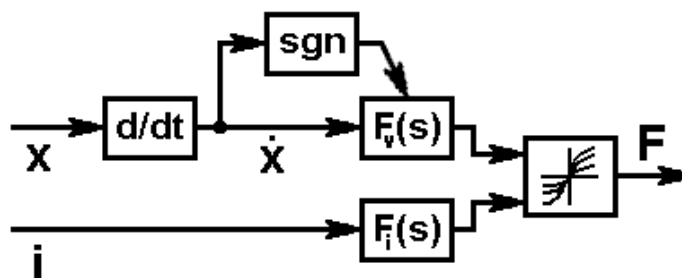
5.4. Identifikace tlumiče se závislostí na budicím proudu

Při identifikaci tlumiče včetně budicího proudu uvažujeme nelineární dynamický systém se dvěma vstupy, budicím proudem a rychlostí, a jedním výstupem, silou tlumiče.

Na obr.5-16 je soustava nalezených statických charakteristik tlumiče jako závislost síly na rychlosti při konstantním budicím proudu.

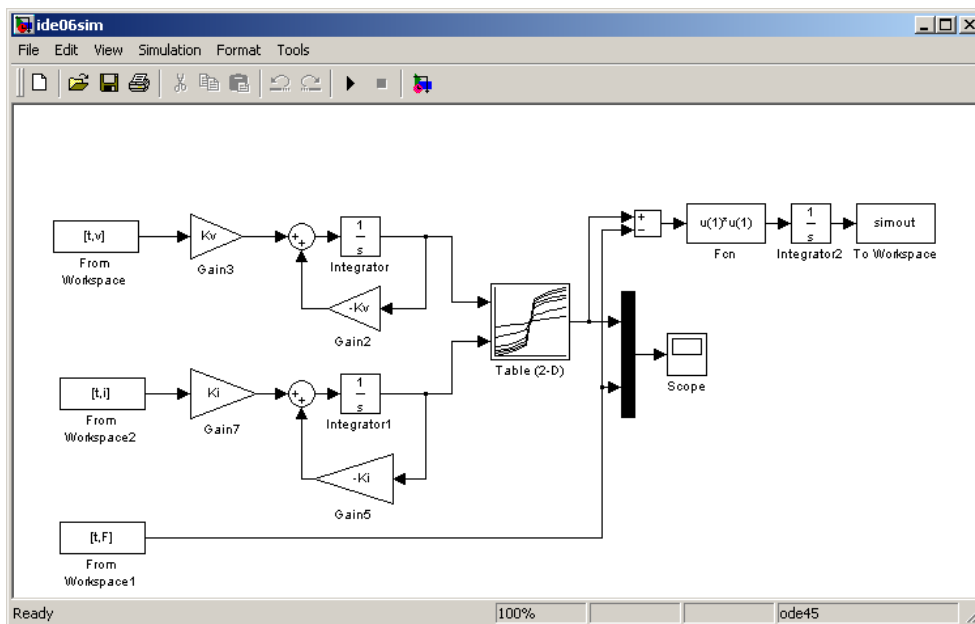


Struktura nelineárního modelu tlumiče je na obr.5-17. Nelineární prostorové charakteristice je předřazen lineární dynamický systém s různými časovými konstantami pro každý směr pohybu a lineární dynamický systém na vstupu budicího proudu.



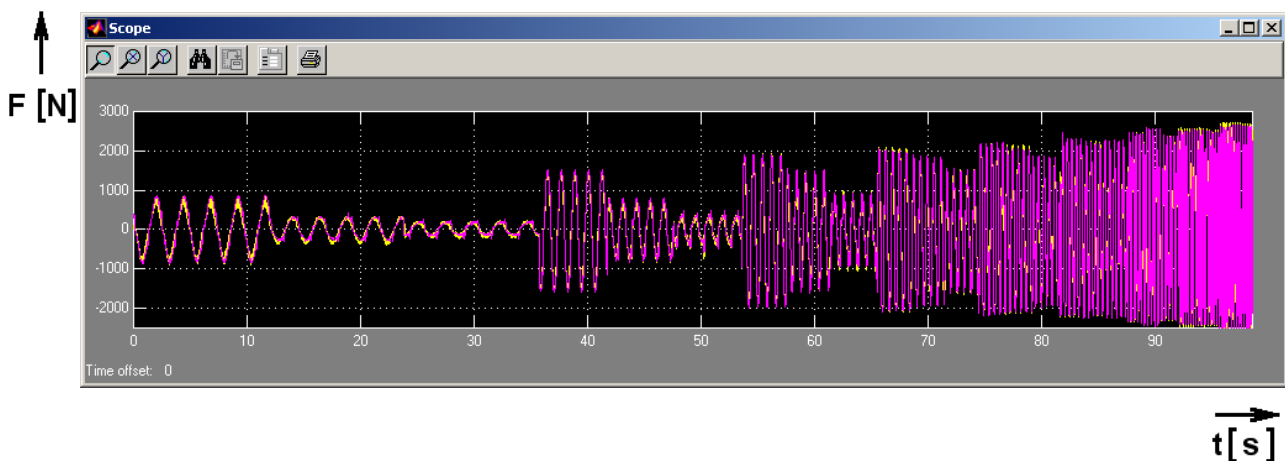
Obr.5-17 Struktura tlumiče pro identifikaci

Pro model tlumiče byla vybrána struktura na obr.5-18.



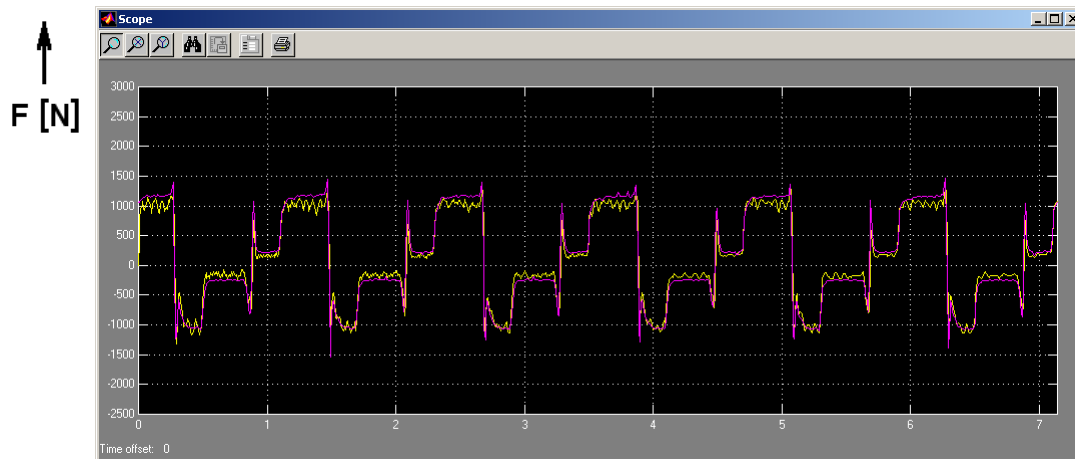
Obr.5-18 Identifikace řízeného tlumiče

Optimalizace parametrů modelu proběhla se vstupními signály rychlosti a budícího proudu odpovídajícími průběhu síly na obr.5-19, které vznikly složením naměřených hodnot na tlumiči v různých režimech při různých frekvencích. Hodnoty konstant modelu byly určeny následovně: $K_v = 92,9$ a $K_i = 173,1$.

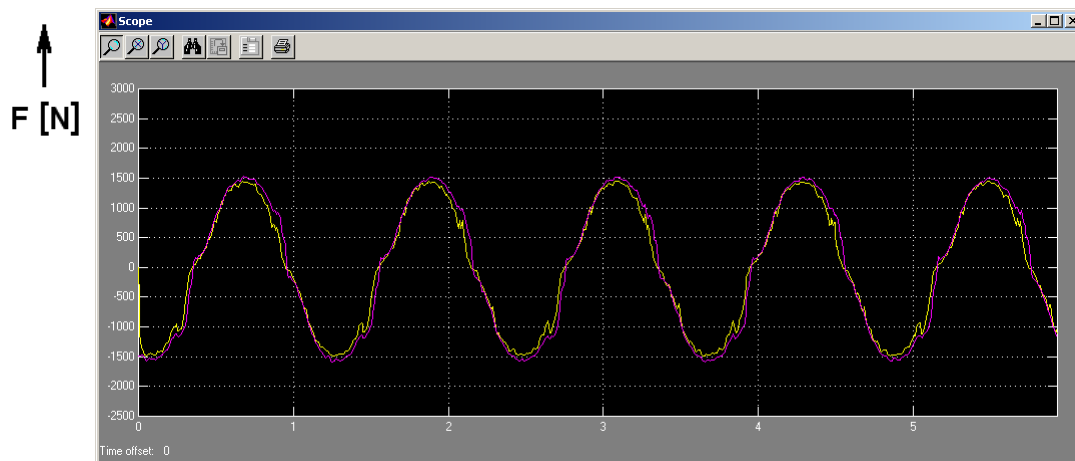


Obr.5-19 Vstupní signál pro optimalizaci

Výsledek identifikace je demonstrován na obr.5-20, kde jsou znázorněny průběhy síly naměřené (růžová) a průběhy síly simulované (žlutá) při různých režimech a buzeních.



Obr.5-20a Porovnání výsledků – přepínání režimů

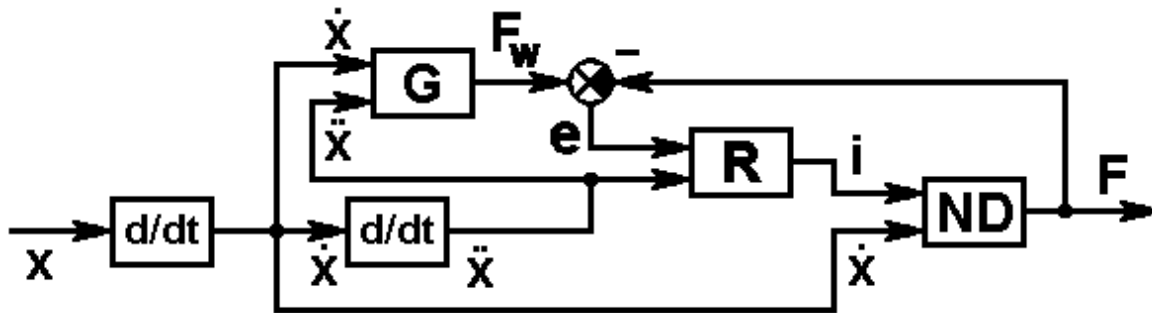


Obr.5-20b Porovnání výsledků – harmonický průběh

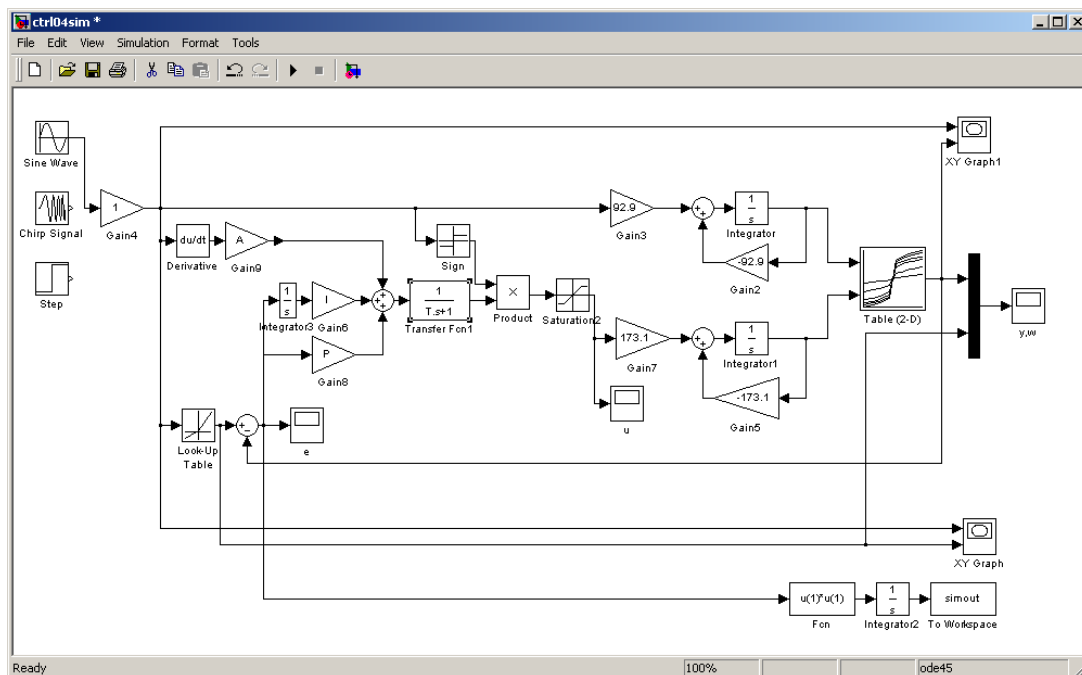
Vytvořený model zkoumaného tlumiče projevil dobrou shodu s naměřenými daty v celém spektru režimů, jak při malých, tak při velkých frekvencích vstupního signálu rychlosti i v celém rozsahu budicího proudu.

5.5. Vlastní řízení magnetoreologického tlumiče

Pro řízení magnetoreologického tlumiče byla zvolena struktura na obr.5-21, tj. kombinace přímovazebního regulátoru od zrychlení v kombinaci se zpětnovazebním PI regulátorem. Na obr.5-22 je simulační model tlumiče s navrženým řídicím obvodem jehož parametry byly optimalizovány s ohledem na několik požadovaných charakteristik tlumiče.



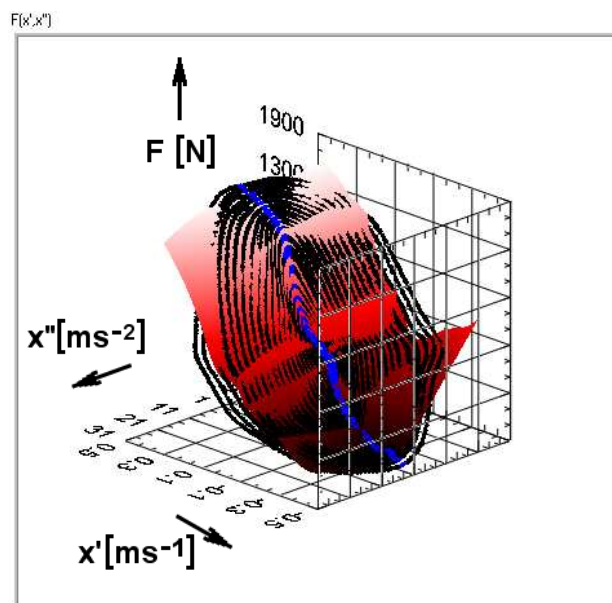
Obr.5-21 Schéma řídicího obvodu



Obr.5.22 Model řídicího obvodu

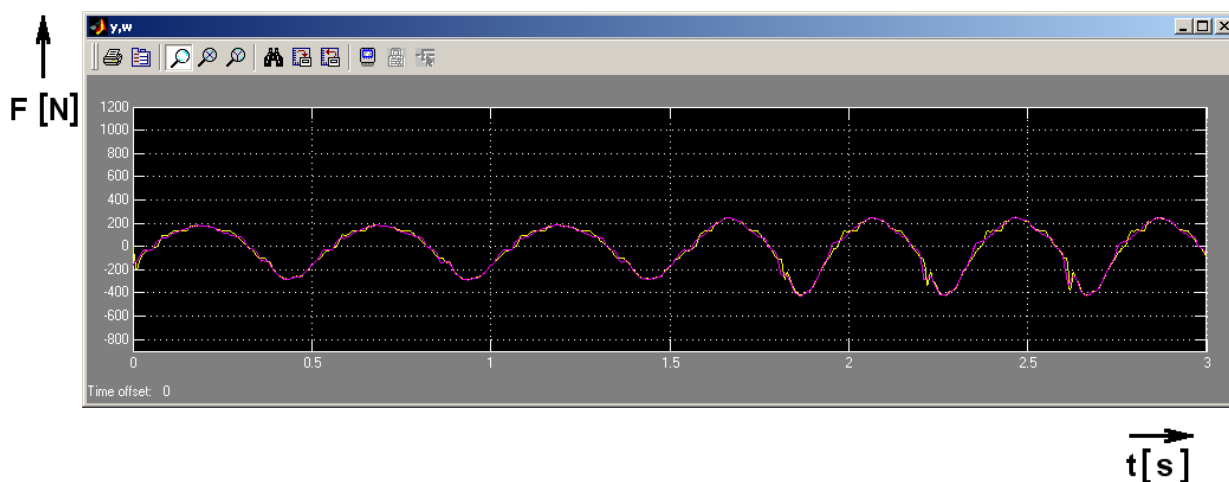
Hodnoty parametrů regulačního obvodu byly určeny následovně: $A = 0,0637$; $P = 0,275$; $I = 0,0032$, hodnota časové konstanty filtru budícího proudu byla zvolena $T = 0,001$ a saturace budícího proudu má rozsah 0 až 0,8, což odpovídá reálnému tlumiči.

Jako žádaná hodnota byla použita mimo jiné i globální charakteristika tlumiče sedačky zmíněná v kapitole 3, obr.5-23.

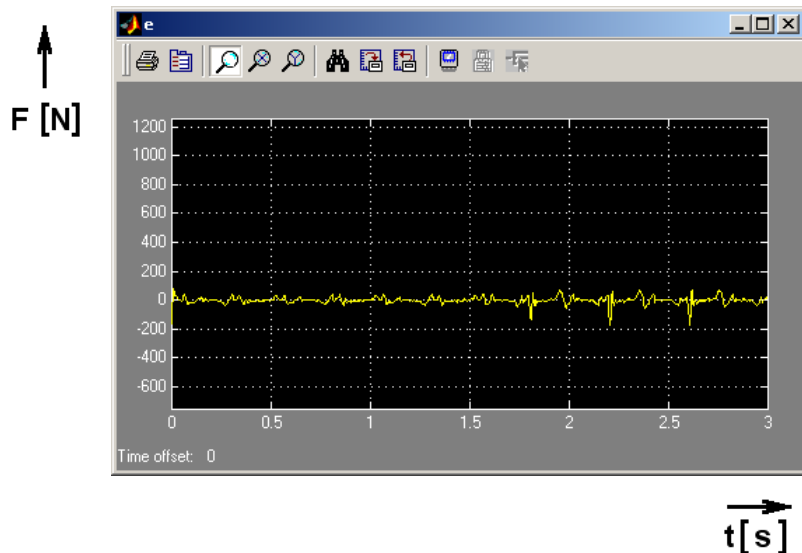


Obr.5-23 Tlumič sedačky – globální charakteristika

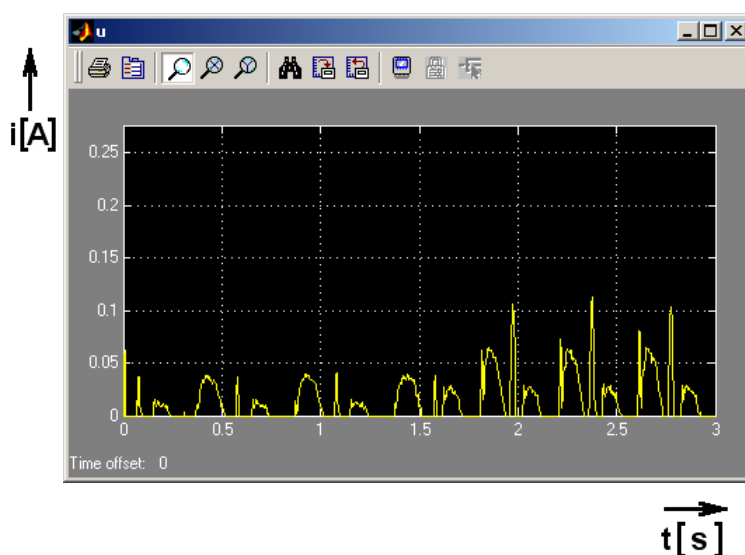
Výsledky řízení jsou dokumentovány na příkladech buzení s třemi různými frekvencemi. Na obr.5-24, 5-27 a 5-30 jsou průběhy síly neřízeného tlumiče sedačky znázorněny fialově a průběhy síly řízeného magnetoreologického tlumiče žlutě.. Na obr.5-25, 5-28 a 5-31 jsou pak vidět odpovídající regulační odchylky a na obr.5-26, 5-29 a 5-32 odpovídající průběhy budícího proudu řízeného tlumiče.



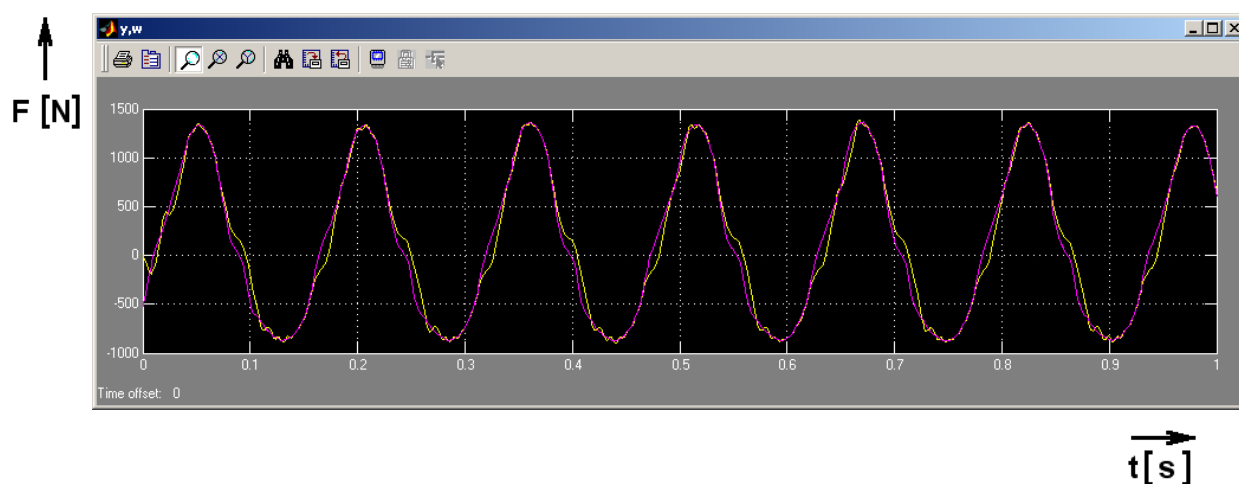
Obr.5-24 Porovnání průběhu síly obou tlumičů – nízká frekvence



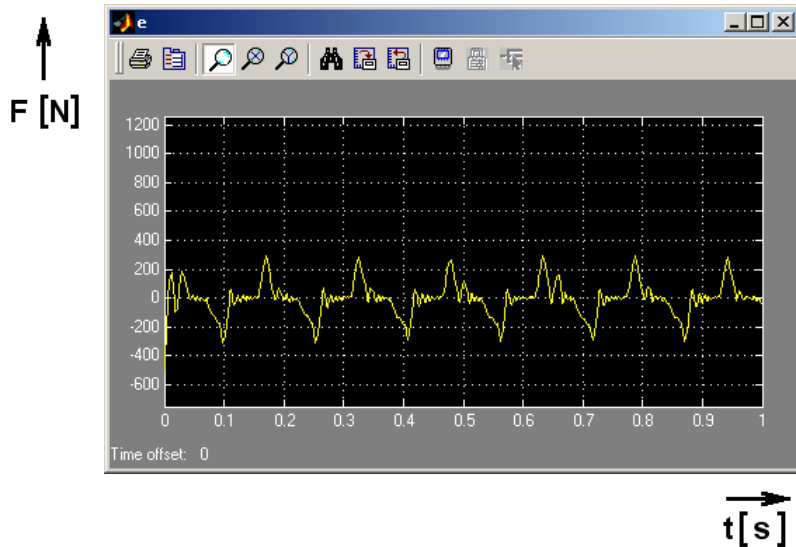
Obr.5-25 Regulační odchylka – nízká frekvence



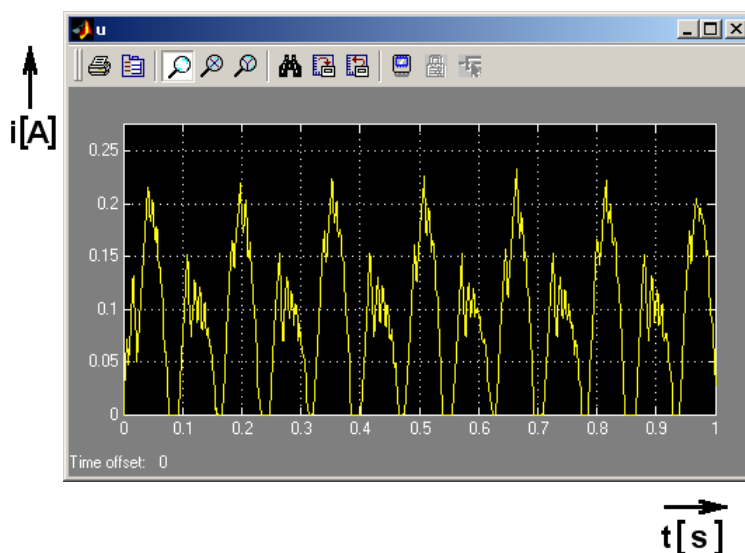
Obr.5-26 Akční veličina – průběh budicího proudu – nízká frekvence



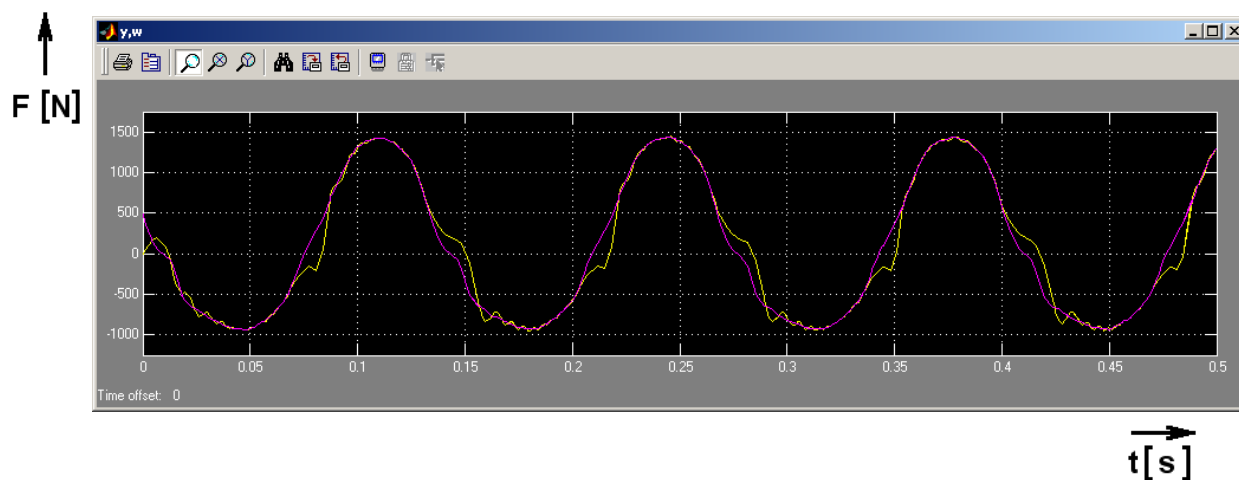
Obr.5-27 Porovnání průběhu síly obou tlumičů – střední frekvence



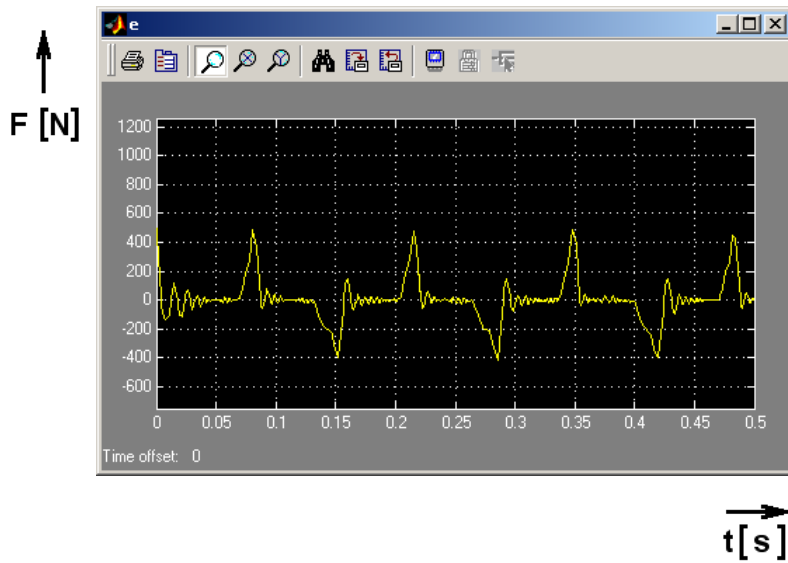
Obr.5-28 Regulační odchylka – střední frekvence



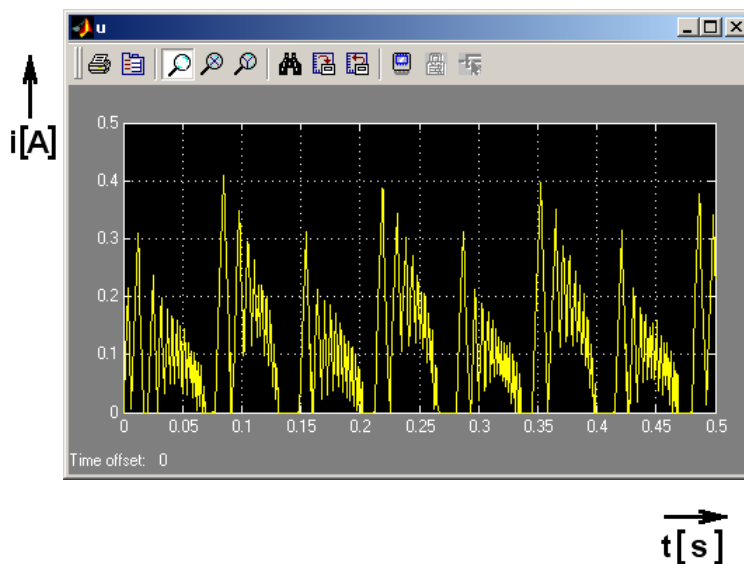
Obr.5-29 Akční veličina – průběh budicího proudu – střední frekvence



Obr.5-30 Porovnání průběhu síly obou tlumičů – vysoká frekvence



Obr.5-31 Regulační odchylka – vysoká frekvence



Obr.5-32 Akční veličina – průběh budicího proudu – vysoká frekvence

Z uvedených obrázků je vidět, že u řízeného magnetoreologického tlumiče bylo s navrženou regulací dosaženo podobné charakteristiky jako u dříve měřeného neřízeného tlumiče sedačky. Lze tedy u něho nastavit libovolnou požadovanou charakteristiku, samozřejmě v rámci rozsahu použitelnosti tlumiče s ohledem na velikost tlumicí síly, tj. zhruba do 2000N.

6. Závěr

V rámci této dizertační práce je představena nová metoda popisu tlumičů a jiných tlumicích jednotek, tzv. globální charakteristika.

Tradičně je tlumič popisován svojí rychlostní charakteristikou, tj. závislostí síly na relativní rychlosti pístnice a pracovního válce. Při měření na reálných tlumicích se však ukazuje, že ve skutečnosti je tato charakteristika nejednoznačná, objevují se na ní hysterezní křivky, jejichž velikost závisí na frekvenci budicího signálu, což s sebou přináší problém s jejich popisem. Ve většině případů nezbývá než přistopit k zjednodušení a hystereze prostě neuvažovat.

Navržená globální charakteristika vyjadřuje sílu tlumiče jako závislost dvou proměnných - rychlosti a zrychlení relativního pohybu pístnice a pracovního válce. Takovýto popis s sebou přináší značné zpřesnění modelu, zvláště pak při vyšších rychlostech a zrychleních. Všechny dosavadní modely, např. Bouc-Wenův model, popisují tlumič pouze pomocí polohových a rychlostních závislostí. Navržená metoda rozšiřuje popis navíc o závislost na zrychlení.

Byla nastíněna spojitost mezi globální charakteristikou a inerciální složkou síly tlumiče a byly ukázány způsoby konstrukce globální charakteristiky z experimentu na elektrohydraulickém pulzátoru.

Pro identifikaci globálních charakteristik byl vytvořen soubor programů v prostředí LabVIEW, pro něž bylo vytvořeno několik knihoven funkcí řešících problematiku polynomiální regrese, optimalizace účelové funkce a simulace dynamických systémů.

Globální charakteristiky byly identifikovány u reálných tlumičů různých parametrů a rozměrů, konkrétně u tlumiče odpružené sedačky používané v autobusech, tlumiče osobního automobilu Škoda Favorit a tlumiče nákladního automobilu Tatra. Globální charakteristiky budou dále využity při vývoji tlumičů v rámci spolupráce Technické Univerzity v Liberci s podnikem Karosa ve Vysokém Mýtě.

Pomocí globální charakteristiky byl popsán tlumicí systém pružina-tlumič z osobního automobilu Škoda Favorit, který je součástí čtvrtinového modelu automobilu. Jedná se o dynamickou soustavu, která je tvořena odpruženou a neodpruženou hmotou. Neodpruženou hmotu reprezentuje kolo osobního automobilu, jehož pneumatika leží na budicím hydraulickém válci simulujícím funkci nerovné vozovky. Odpružená hmota, která se vertikálně pohybuje ve vodících lyžinách je pak spojena s kolem prostřednictvím jednotky pružina-tlumič. Díky přesnějšímu popisu tlumicí jednotky pomocí globální charakteristiky se podařilo výrazně zlepšit simulační model celého

čtvrtinového modelu oproti verzi, která uvažuje pouze s rychlostní charakteristikou použitého tlumiče .

Globální charakteristiky dále bylo využito k popisu tlumiče s magnetoreologickou kapalinou. Magnetoreologický tlumič je řízený tlumič, v němž je jako pracovní médium použita kapalina, která mění svoje fyzikální vlastnosti v závislosti na intenzitě magnetického pole, které na ni působí. Lze tak působením budicího magnetického pole ovlivňovat jeho chování a charakteristiky. Součástí tlumiče je vlastní řídicí obvod, který umožňuje nastavení tří jízdních režimů: soft, medium a hard. Globální charakteristika tohoto tlumiče byla identifikována jak ve všech třech řízených režimech, tak s rozpojenou řídicí smyčkou.

Aby bylo možno vytvořit simulační model za účelem návrhu vlastního řízení, bylo nutné identifikovat tlumič i bez jeho řídicího obvodu, tzn. popsat jeho tlumicí sílu jako závislost na rychlosti a na budicím proudu magnetického obvodu. Vytvořený model zkoumaného tlumiče projevil dobrou shodu s naměřenými daty v celém spektru režimů, jak při malých, tak při velkých frekvencích vstupního signálu rychlosti i v celém rozsahu budicího proudu.

Poslední etapou této práce bylo navrhnout vlastní řídicí systém magnetoreologického tlumiče, který by umožňoval vhodně modifikovat požadovanou charakteristiku tlumiče. Jako žádané hodnoty pro regulaci bylo využito globální charakteristiky. Pro řízení byla navržena struktura s využitím přímovazebního regulátoru od zrychlení v kombinaci se zpětnovazebním PI regulátorem. Parametry řídicího obvodu byly optimalizovány s ohledem na několik požadovaných charakteristik tlumiče. Takovými byly jednak náhodně zvolené charakteristiky, tak globální charakteristika neřízeného tlumiče odpružené sedačky. Při navrženém řízení bylo dosaženo, že zkoumaný magnetoreologický tlumič má stejnou charakteristiku jako jiný reálný neřízený tlumič. Je tedy u něho možno nastavit libovolnou požadovanou charakteristiku, samozřejmě v rámci rozsahu použitelnosti tlumiče s ohledem na velikost tlumicí síly, tj. zhruba do 2000N.

Aplikace magnetoreologických tlumičů v systémech s řízeným tlumením se ukazuje být velmi perspektivní. Bylo provedeno kompletní ověření jejich vlastností v simulačním prostředí LabView, z technických důvodů však v době uzavření disertační práce nebylo možné dokončit ověřování na konkrétním reálném systému. Je však již technicky připravena realizace aktivního řízení odpružení sanitního transportního lehátka s aplikací magnetoreologických tlumičů. V současné době již pokračuje ověřování vlastností tohoto systému zlepšujícího komfort a šetrnost transportu zraněného do zdravotnického zařízení.

Literatura:

- [1] Šklíba, J.: Inerciální složka výsledné síly jednoplášťového hydraulického tlumiče, Konference “Dynamika, pevnost a pružnost stojních konstrukcí”, Svratka 1992
- [2] Šklíba, J.; Svoboda, R.: Identifikace sekundární složky síly dvojpášťového tlumiče, VII. mezinárodní konference “Teorie strojů a mechanismů”, Liberec 1996
- [3] Šklíba, J.; Svoboda, R.: Some problem of hydraulic damper modeling, Colloquium Dynamics of Machines 2000, Praha 2000
- [4] Šklíba, J.; Svoboda, R.: Rozložení tlaků v hydraulickém tlumiči, VIII. mezinárodní konference “Teorie strojů a mechanismů”, Liberec 2000
- [5] Svoboda, R.; Šklíba, J.: Problémy numerické integrace modelu hydraulického tlumiče, Computational Mechanics 2000, konference s mezinárodní účastí, Nečtiny 2000
- [6] Šklíba, J.: Zur Problematik der Modellierung eines hydraulischen Dämpfers, Sborník XIV. konference “Dynamika strojů”, Liblice 1983
- [7] Šklíba, J.; Svoboda, R.: Modelování hydraulického tlumiče, Výzkumná zpráva Liberec 2000
- [8] Nise, N.S.: Control System Engineering, John Wiley&Sons Inc., 2000
- [9] Wen, Y.K.: Method of Random Vibration of Hysteretic Systems, In: ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1976
- [10] Šika, Z.: Aktivní a poloaktivní snižování mechanického kmitání strojů, habilitační práce, ČVUT Praha, 2004
- [11] Preumont, A.: Vibration Control of Active Structures – An Introduction, Solid Mechanics and its Applications, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 1997
- [12] Preumont, A.: An Introduction to Active Vibration Control, In: Responsive Systems for Active Vibration Control, NATO Science Series, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2002
- [13] Sharp, R.S.; Crolla, D.A.: Road vehicle suspension system design – a review, Vehicle System Dynamics, 1994
- [14] Mark, J.; Jonathan, B.: Lord Research Centre Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids, SPIE 5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 1998

Publikační činnost:

- [1] Votrubec, R.: Řízení aktivního tlumicího systému osobního automobilu. Diplomová práce, TU Liberec, květen 1999
- [2] Votrubec, R.; Klečka, T.: Identifikace nelineárního čtvrtinového modelu automobilu. In: Aplikovaná mechanika 2000, TU Liberec, únor 2000
- [3] Votrubec, R.: LabView for Windows. Studijní materiál – učební text, TU Liberec, únor 2000
- [4] Votrubec, R.: Control for LabView. Studijní materiál – manuál k vytvořené nadstavbě, TU Liberec, únor 2000
- [5] Votrubec, R.: Řízení nelineárních dynamických systémů se zubovou vůlí. In: Řízení procesů 2000, Kouty nad Desnou, duben 2000
- [6] Votrubec, R.: Identifikace soustavy pružina-tlumič. Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, květen 2000
- [7] Votrubec, R.: Program pro podporu seřizování regulačních obvodů. In: Pedagogický software 2000, České Budějovice, květen 2000
- [8] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Návody k laboratorním úlohám. Studijní materiál - učební texty v němčině, TU Liberec, červen 2000
- [9] Votrubec, R.: Nelineární čtvrtinový model automobilu. Seminární přednáška TU Liberec, červen 2000
- [10] Votrubec, R.: Wonderware Intouch. Studijní materiál – učební text, TU Liberec, srpen 2000
- [11] Votrubec, R.: Identifikace soustavy pružina-tlumič II. Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, srpen 2000
- [12] Votrubec, R.: Identifikace pneumatiky. Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, srpen 2000
- [13] Votrubec, R.; Klečka, T.: Identification of nonlinear system spring-damper. In: Proc.of 5th International Workshop on ECMS. Université Paul Sabatier, Toulouse, France, únor 2001
- [14] Votrubec, R.; Klečka, T.: Identification of quarter car model. In: Proc.of 5th International Workshop on ECMS. Université Paul Sabatier, Toulouse, France, únor 2001
- [15] Votrubec, R.; Šklíba, J.: Identification of Global Characteristic of Damper. In: Proc.of International Conference on Engineer Mechanics 2001, Svratka, březen 2001
- [16] Votrubec, R.: Nonlinear Identification of Global Characteristic of Damping Car System. In: Proc.of 26th Workshop ASR2001, VŠB-TU Ostrava, duben 2001
- [17] Votrubec, R.: Globální charakteristiky tlumičů. Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, květen 2001

- [18] Votrubec, R.: Identifikace čtvrtinového modelu automobilu.
Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, květen 2001
- [19] Votrubec, R.: Identifikace nelineární soustavy pružina – tlumič.
Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, květen 2001
- [20] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Concept of Teaching and Practice of Fuzzy Control. In: Proc.of International Fuzzy Colloquium 2001, Zittau, červenec 2001
- [21] Votrubec, R.: Sdílení a přenos dat mezi aplikacemi na jednom nebo více počítačích. Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, červenec 2001
- [22] Votrubec, R.; Modrlák, O.-Anders,G: Drehzahlregelung bei Elastischer Kupplung mit Einem PID-regler. Návod k laboratornímu cvičení mezinárodního praktika studentů FM TU Liberec / HTWS Zittau, srpen 2001
- [23] Votrubec, R.; Modrlák, O.; Anders, G: Hubschrauber Modell-Regelung mit Einem PID-regler. Návod k laboratornímu cvičení mezinárodního praktika studentů FM TU Liberec / HTWS Zittau, srpen 2001
- [24] Votrubec, R.; Modrlák, O; .Anders, G: Temperaturregelung von Fließendem Wasser mit Einem PID-regler. Návod k laboratornímu cvičení mezinárodního praktika studentů FM TU Liberec / HTWS Zittau, srpen 2001
- [25] Votrubec, R.; Modrlák, O.; Anders, G: Steuerung Eines Pneumatisch-Elektrischen Manipulators. Návod k laboratornímu cvičení mezinárodního praktika studentů FM TU Liberec / HTWS Zittau, srpen 2001
- [26] Votrubec, R.; Šklíba, J.: Analysis of Global Characteristic of Damper. In: Applied Mechanics 2002 , VŠB-TU Ostrava, duben 2002
- [27] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Fuzzy Control of Helicopter Model. In: Applied Mechanics 2002 , VŠB-TU Ostrava, duben 2002
- [28] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Podpora výuky předmětů automatického řízení na internetu. In: Pedagogický software 2002, České Budějovice, květen 2002
- [29] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Koncepce laboratoře řídicí techniky v rámci výuky s podporou internetu. In: Pedagogický software 2002, České Budějovice, květen 2002
- [30] Votrubec, R.: Realizace úloh pro potřeby automatického řízení a identifikace v prostředí Labview. In: Pedagogický software 2002, České Budějovice, květen 2002
- [31] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Fuzzy řízení modelu helikoptéry. In: Řízení procesů 2002, Kouty nad Desnou, květen 2002

- [32] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Two Dimensional Fuzzy Control of Non-Linear Helicopter Position. In: Proc.of International Fuzzy Colloquium 2002, Zittau, září 2002
- [33] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Laboratory Tasks For Fuzzy Control. In: Proc.of International Fuzzy Colloquium 2002, Zittau, září 2002
- [34] Votrubec, R.; Šklíba, J.; Matějec, R.; Zůbek, T.: Globální charakteristika magnetoreologického tlumiče. In: Interaction and Feedbacks 2002, Institute of Thermomechanics AS-CR, Praha, listopad 2002
- [35] Votrubec, R.: Analýza tlumiče s magnetoreologickou kapalinou. Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, prosinec 2002
- [36] Votrubec, R.: Identification of Damper with Magnetoreological Fluid. In: Proc.of International Conference on Engineer Mechanics 2003, Svratka, duben 2003
- [37] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Measure and Control of Laboratory Models in InTouch. In: Proc.of 6th International Workshop on ECMS. TU Liberec, duben 2003
- [38] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Internet assisted Learning and Teaching in Automatic Control. In: Proc.of 6th International Workshop on ECMS. TU Liberec, duben 2003
- [39] Votrubec, R.; Modrlák, O.; Volejník, O.: Practice and New Laboratory Concept of Control. In: Proc.of 6th International Workshop on ECMS. TU Liberec, duben 2003
- [40] Votrubec, R.: Globální charakteristiky tlumičů. Seminární přednáška TU Liberec, květen 2003
- [41] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Measure and Control of Laboratory Tasks from Remote Computer. In: Process Control 2003, Štrbské pleso, Slovakia, červen 2003
- [42] Votrubec, R.; Modrlák, O.; Lev, J: Some Aspects and Performances of a Robust PID Controller Designed by the Root Loci. In: Process Control 2003, Štrbské pleso, Slovakia, červen 2003
- [43] Votrubec, R.; Modrlák, O.: States Controller Implementation on PLC SystemTecomat. In: Process Control 2003, Štrbské pleso, Slovakia, červen 2003
- [44] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Remote Control and Visualization of Real Models in Laboratory Realized in Control Web. In: DAAAM 2003, Sarajevo, Bosna, září 2003
- [45] Votrubec, R.: Global Characteristics of Dampers, Damping Elements and Other Mechanical Systems. In: DAAAM 2003, Sarajevo, Bosna, září 2003
- [46] Votrubec, R.: Analysis of Damper with Magnetoreological Fluid. In: ICOVP 2003, Liberec, září 2003

- [47] Votrubec, R.: Rozšířená analýza tlumiče s magnetoreologickou kapalinou. Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, listopad 2003
- [48] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Multidimensional Laboratory Model of Water Tanks with Level Control. In: ICC2004, Zakopane, Polsko, květen 2004
- [49] Votrubec, R.: Software pro realizaci dálkového řízení s využitím Matlabu. In: PS2004, České Budějovice, červen 2004
- [50] Votrubec, R.; Modrlák, O.: Concept Implementation of Internet Assisted Laboratory of Control Technology. In: Process Control 2004, Kouty n. Desnou, červen 2004
- [51] Votrubec, R.: Control of Damper with Magnetoreological Fluid. In: Process Control 2004, Kouty n. Desnou, červen 2004
- [52] Votrubec, R.: Fuzzy Control of Damper with Magnetoreological Fluid. In: EuroMech 2004, Praha, červenec 2004
- [53] Votrubec, R.; Modrlák, O.; Volejník, O.: Internet Assisted Practicing of Automatic Control. In: IFAC 2004, Grenoble, France, září 2004
- [54] Votrubec, R.; Skliba, J.; Zubek, T.: The Application of Controlled Dampers in the Spring Embedded Ambulance Stretcher. In: Vibroengineering 2004, Kaunas University of Technology, Litva, říjen 2004
- [55] Votrubec, R.; Modrlák, O.; Volejník, O.: Experiences in Creating and Using of E-Laboratory in Automatic Control. In: Workshop e-learning , Zittau, Germany, prosinec 2004
- [56] Votrubec, R.: Problematika řízení magnetoreologického tlumiče. Výzkumná zpráva KŘT, TU Liberec, prosinec 2004