

MULTIDIMENSIONAL CHARACTERISTIC OF DAMPER WITH MAGNETORHEOLOGICAL FLUID

R. Votrubec*

Summary: Příspěvek se zabývá identifikací statické charakteristiky magnetoreologického tlumiče. Tlumičí síla magnetoreologického tlumiče závisí na rychlosti pístitnice a budícím proudu magnetického obvodu. Standardní tlumič ze sedačky automobilu byl přepracován tak, že místo vlastního řídicího obvodu byl připojen přímo na měřicí kartu počítače. To umožňuje provádět na tlumiči libovolná měření. Zpracováním ustálených stavů z rozsáhlého souboru měření na tlumiči byla vytvořena statická charakteristika jako dvourozměrná funkce rychlosti a budícího proudu.

1. Úvod

Za účelem identifikace tlumiče s magnetoreologickou kapalinou bylo provedeno několik sad měření. Budící signály byly vytvořeny v programu na generování průběhů polohy a proudu Generator.vi. Typy signálů byly voleny s ohledem na analýzu statických a dynamických vlastností a charakteristik tlumiče.

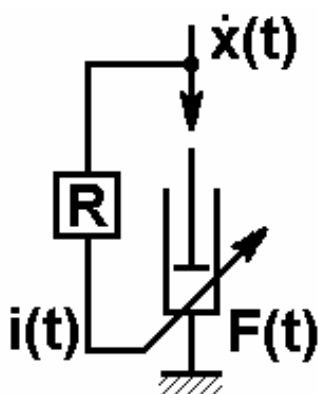


Obr.1 Experimentální měření na magnetoreologickém tlumiči

* Ing. Radek Votrubec, Ph.D.: Department of Applied Cybernetics, Technical University of Liberec, Studentska 2; 461 17 Liberec CZ; tel.: +420 485 351 111, fax: +420 485 351 112; e-mail: radek.votrubec@tul.cz

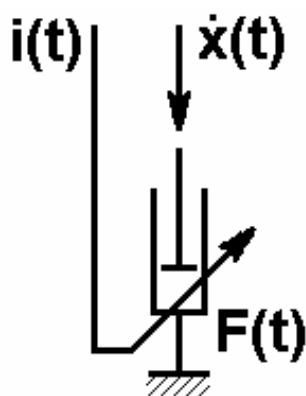
2. Popis magnetoreologického tlumiče

Měřený tlumič je standardní tlumič s magnetoreologickou kapalinou určený pro použití v sedačce. Součástí tlumiče byla dosud vlastní regulační smyčka s možností nastavení tří různých charakteristik tlumiče, obr.2. Při identifikaci tlumiče jako nelineárního dynamického systému s jedním výstupem - tlumicí silou a dvěma vstupy - polohou pístnice a budícím proudem, je potřeba měnit obě vstupní veličiny v daných rozmezích. Budicí proud byl dosud pouze generován vlastním obvodem tlumiče a nebylo ho možno tedy libovolně měnit. Aby byl dostatečně pokryt rozsah akční veličiny, tj. budícího proudu, bylo nutné vhodně volit budicí signály polohy a akční veličinu jako závislou hodnotu pouze měřit.



Obr.2 Tlumič s vlastní regulační smyčkou

Proto bylo nutné odstranit vlastní regulační smyčku a vytvořit převodník se zesilovačem, který umožní generovat akční veličinu nezávisle přímo z měřicí karty počítače, obr.3. Pro měření je tedy nutné připravit vstupní signály polohy a řídicího napětí měřicí karty. Při experimentu se pak měří a zaznamenávají hodnoty polohy, tlumicí síly, řídicího napětí karty, budicí proud magnetického obvodu tlumiče, dále je přidán pro kontrolní účely signál zrychlení a taktéž je měřena teplota pláště tlumiče.

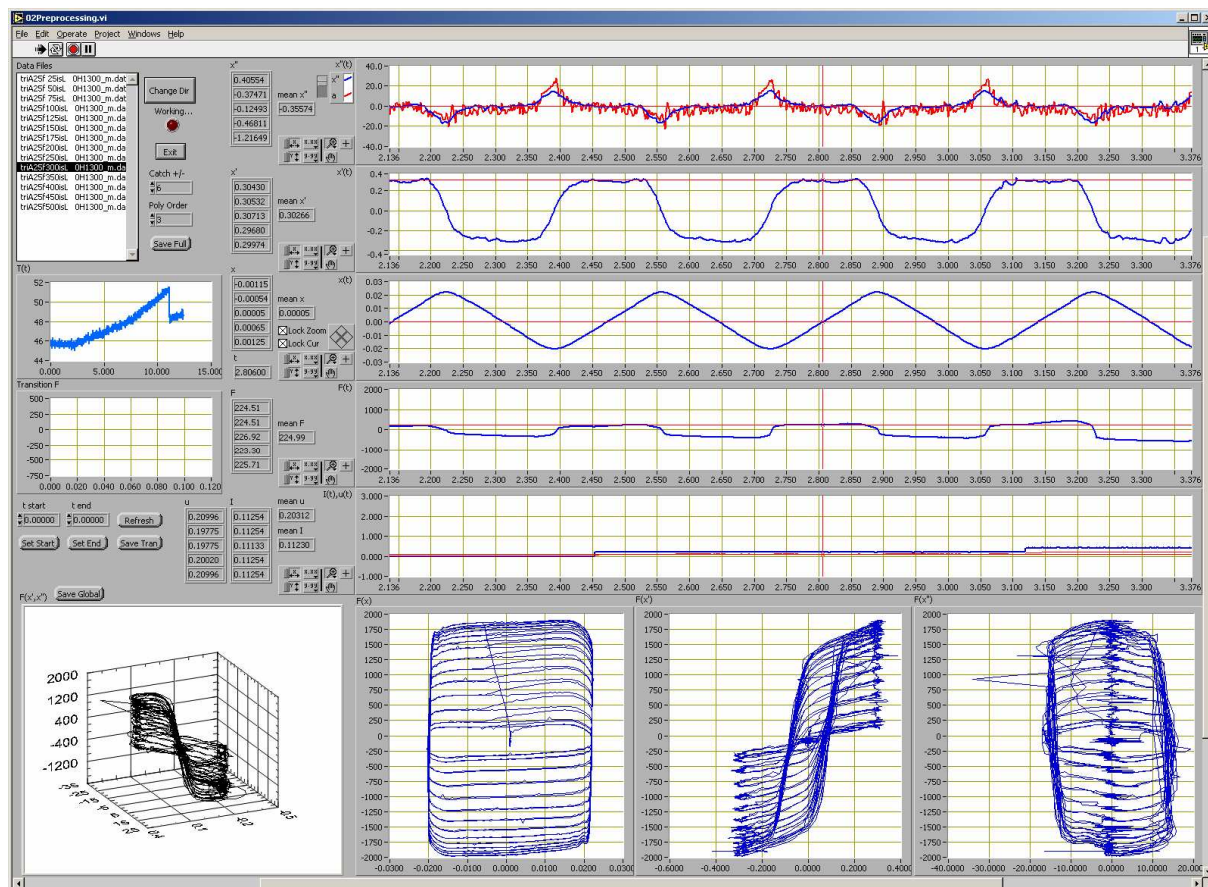


Obr.3 Tlumič po úpravě

Ze signálu polohy se derivací počítá rychlost pístnice a druhou derivací zrychlení, které je možno porovnávat se zrychlením měřeným pomocí kontrolního snímače.

3. Software pro zpracování naměřených dat

Pro zobrazování naměřených dat, jejich zpracování, filtraci, výpočet rychlosti a zrychlení a pro analýzu statických vlastností byla vytvořena aplikace Preprocessing.vi, obr.4.



Obr.4 Aplikace Preprocessing.vi

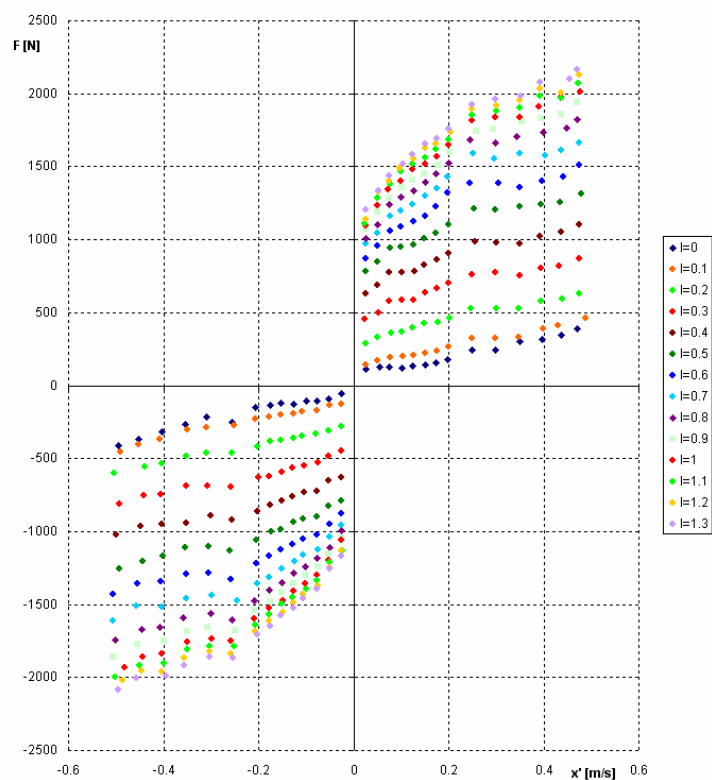
Pro určení ustálených hodnot tlumicí síly pro různé hodnoty rychlostí a budicích proudů byla provedena řada měření s trojúhelníkovými průběhy polohy, přičemž budicí proud byl měněn skokově v rozsahu 0-1.3 A. Pro odečítání hodnot je nutné zvolit střed úseku, na němž je rychlost, budicí proud i síla konstantní

4. Analýza statických vlastností magnetoreologického tlumiče

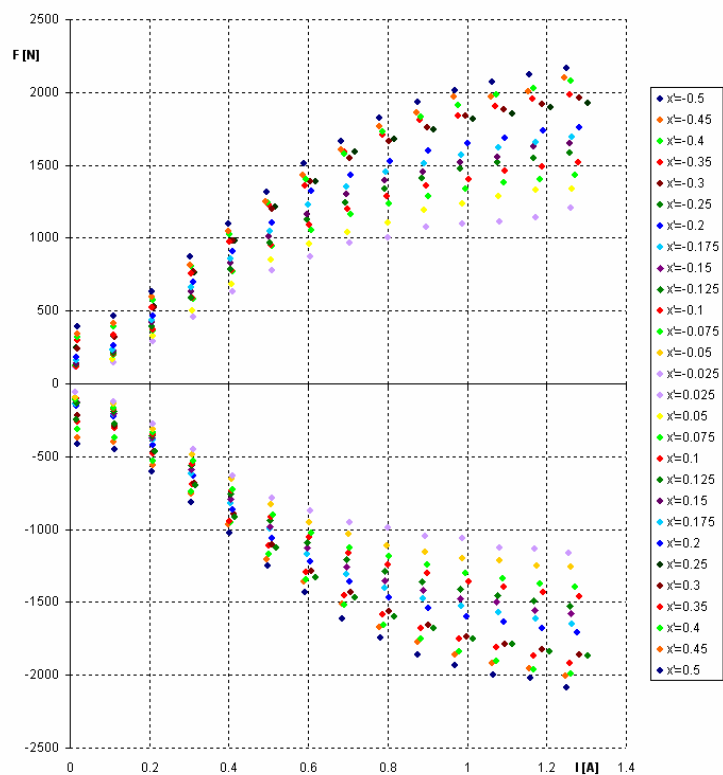
Hodnoty tlumicí síly lze vynést buď jako závislost na rychlosti při konstantním proudu, obr.5, nebo jako závislost na budicím proudu při konstantní rychlosti, obr.6.

Tlumicí sílu je potřeba vyjádřit jako funkci dvou proměnných, rychlosti a budicího proudu. Jako vhodná funkce se jeví dvoudimenzionální polynomiální plocha popsaná rovnicí

$$F = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} a_{ij} x^i I^j \quad (1)$$



Obr.5 Síla jako závislost na rychlosti při konstantním proudu



Obr.6 Síla v závislosti na proudu při konstantní rychlosti

Vzhledem k členitosti a složitosti popisované závislosti není možné popsat sílu na celém intervalu rychlosti a proudu pouze jednou rovnicí. Rozdělení roviny nezávisle proměnných lze provést např. na základě sledování dat v jednotlivých průmětech. Obvykle platí, že čím jsou intervaly menší, tím lze pro aproximaci použít menší řád polynomů. Nejjednodušší je definovat intervaly obdélníkové. Na hranicích jednotlivých intervalů je při aproximaci potřeba splnit vazební podmínky zaručující, že bude výsledná funkce spojitá.

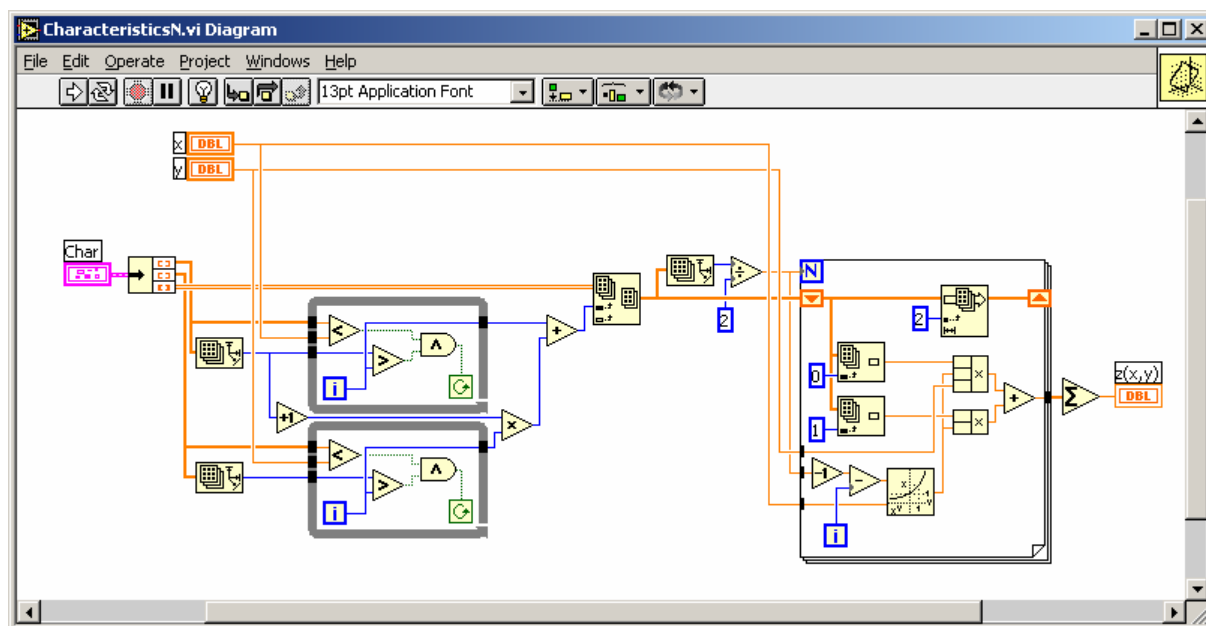
Pro účely identifikace statické charakteristiky byl navržen speciální typ polynomiální aproximační funkce libovolného řádu pro jednu proměnnou a lineární funkce pro druhou proměnnou

$$F = c_{2n+1}\dot{x}^n I + c_{2n}\dot{x}^n + \dots + c_5\dot{x}^2 I + c_4\dot{x}^2 + c_3\dot{x}I + c_2\dot{x} + c_1I + c_0 \quad (2)$$

neboli

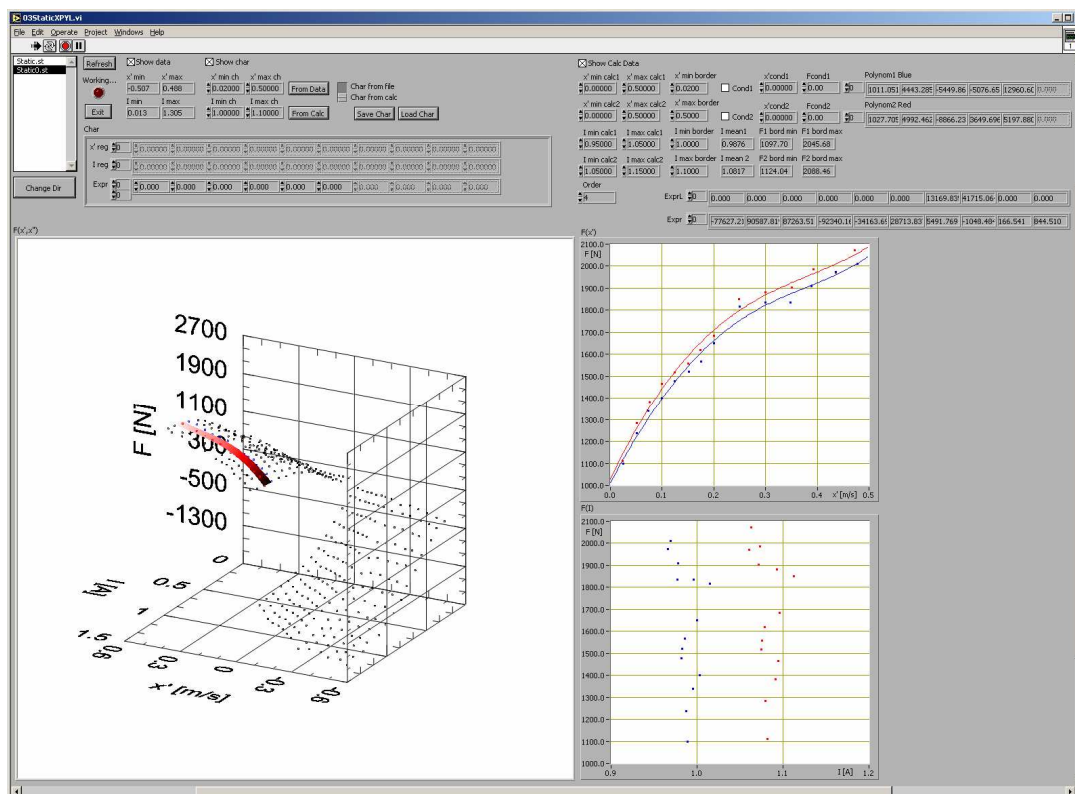
$$F = \sum_{i=0}^n (c_{2i+1}\dot{x}^i I + c_{2i}\dot{x}^i) \quad (3)$$

K popisu této plochy je nutno definovat strukturu obsahující data o hranicích intervalů a rovnice dílčích ploch na jednotlivých intervalech. V LabView je vytvořena komponenta CharacteristicsN.vi, která ze zadaných parametrů x, y vypočítává funkční hodnotu z(x,y), obr.7.



Obr.7 Komponenta CharacteristicsN.vi

Na postupnou aproximaci složené polynomiální funkce spočívající v postupném určení parametrů rovnice (2) resp. (3) na jednotlivých intervalech byla vytvořena v LabView aplikace StaticXPYL.vi, jejíž hlavní okno je na obr.8.



Obr.8 Aplikace StaticXPYL.vi

Výpočet koeficientů aproximační rovnice na vybraném intervalu probíhá ve třech krocích. Nejprve jsou pomocí jednorozměrné polynomiální regrese s využitím translace souřadnic nalezeny hraniční polynomy reprezentující sílu v závislosti na rychlosti pro hraniční hodnoty proudu. Poté je na základě použití těchto polynomů jako vazebních podmínek určena rovnice aproximační plochy. Konečně pak je z funkčních hodnot na hranici intervalu pro minimální (nebo maximální) hraniční rychlost vypočtena rovnice sousedícího intervalu.

Základem je tedy jednorozměrná polynomiální regrese. Součástí LabView je funkce General LS Linear Fit.vi umožňující zadat libovolnou strukturu aproximační funkce

$$y = f(a, x) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i f_i(x) \quad (4)$$

kde $f_i(x)$ je $(n-1)$ libovolných funkcí proměnné x .

Z těchto funkcí je nutné sestavit tzv. Observation Matrix H tvaru

$$H = \begin{bmatrix} f_0(x_0) & f_1(x_0) & \cdots & f_{n-1}(x_0) \\ f_0(x_1) & f_1(x_1) & \cdots & f_{n-1}(x_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_0(x_{m-1}) & f_1(x_{m-1}) & \cdots & f_{n-1}(x_{m-1}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

kteřá je vstupem pro komponentu General LS Linear Fit.vi, m je velikost vektoru x .

Speciálně pro proložení polynomem řádu r

$$A(x) = a_r x^r + \cdots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (6)$$

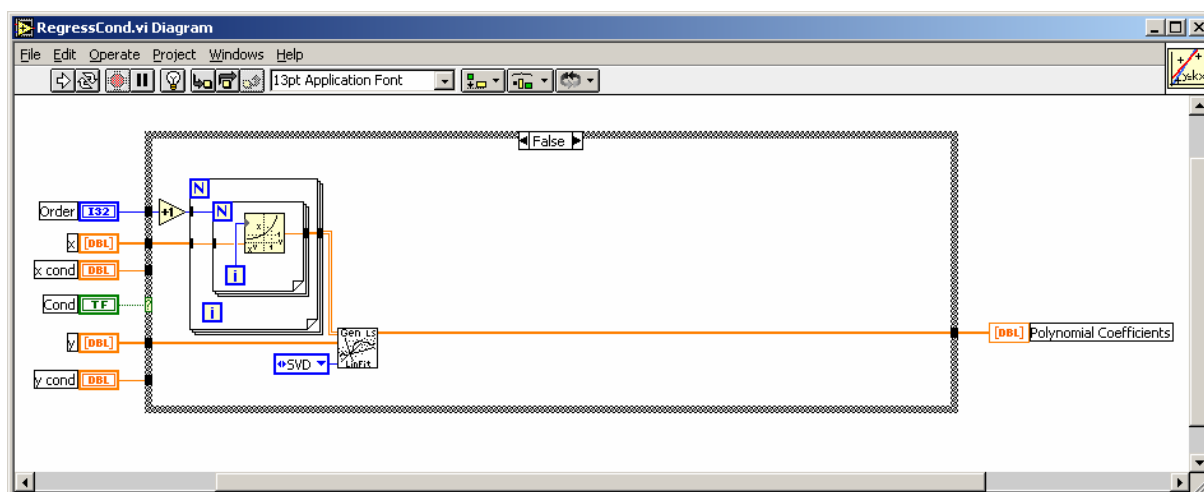
je soustava funkcí $f_i(x)$ dána jako

$$f_i(x) = \sum_{j=0}^r x^j \quad (7)$$

matice H je pak

$$H = \begin{bmatrix} 1 & x_0 & x_0^2 & \cdots & x_0^r \\ 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^r \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^r \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{m-1} & x_{m-1}^2 & \cdots & x_{m-1}^r \end{bmatrix} \quad (8)$$

Na výpočet aproximačního polynomu byla vytvořena funkce RegressCond.vi, jejíž blokový diagram je na obr.9.



Obr.9 RegressCond.vi bez podmínky - diagram

Speciálním případem je proložení polynomem řádu r s nulovým absolutním členem, tj. polynomem, který prochází bodem $[0;0]$

$$A(x) = a_r x^r + \cdots + a_2 x^2 + a_1 x \quad (9)$$

Soustava funkcí je potom dána vztahem

$$f_i(x) = \sum_{j=1}^r x^j \quad (10)$$

a matice H je následující

$$H = \begin{bmatrix} x_0 & x_0^2 & \cdots & x_0^r \\ x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^r \\ x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^r \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m-1} & x_{m-1}^2 & \cdots & x_{m-1}^r \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dále je nutné nalézt rovnici polynomu, který prochází libovolným bodem. Toho lze dosáhnout použitím polynomu procházejícího bodem [0;0] a translací systému souřadnic.

Polynom (6) tedy transponujeme o hodnotu x_0

$$B(x) = A(x - x_0) = a_r (x - x_0)^r + a_{r-1} (x - x_0)^{r-1} + \dots + a_1 (x - x_0) + a_0 \quad (12)$$

Roznásobením a seskupením členů se stejnou mocninou dostáváme např. pro pátý řád polynomu následující koeficienty

$$b_5 = a_5 \binom{5}{0} (-1)^0 x_0^0 \quad (13)$$

$$b_4 = a_4 \binom{4}{0} (-1)^0 x_0^0 + a_5 \binom{5}{1} (-1)^1 x_0^1 \quad (14)$$

$$b_3 = a_3 \binom{3}{0} (-1)^0 x_0^0 + a_4 \binom{4}{1} (-1)^1 x_0^1 + a_5 \binom{5}{2} (-1)^2 x_0^2 \quad (15)$$

$$b_2 = a_2 \binom{2}{0} (-1)^0 x_0^0 + a_3 \binom{3}{1} (-1)^1 x_0^1 + a_4 \binom{4}{2} (-1)^2 x_0^2 + a_5 \binom{5}{3} (-1)^3 x_0^3 \quad (16)$$

$$b_1 = a_1 \binom{1}{0} (-1)^0 x_0^0 + a_2 \binom{2}{1} (-1)^1 x_0^1 + a_3 \binom{3}{2} (-1)^2 x_0^2 + a_4 \binom{4}{3} (-1)^3 x_0^3 + a_5 \binom{5}{4} (-1)^4 x_0^4 \quad (17)$$

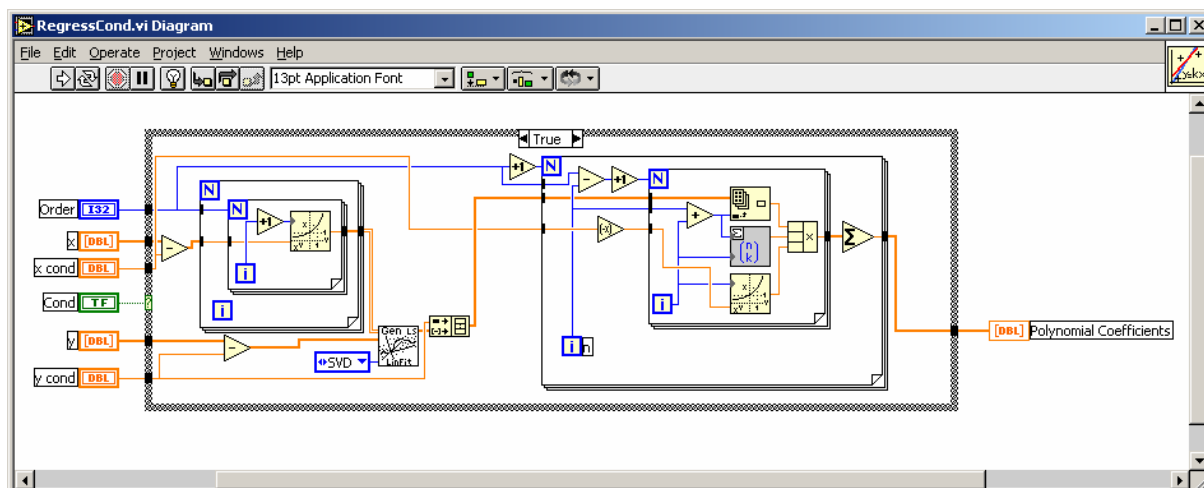
$$b_0 = a_0 \binom{0}{0} (-1)^0 x_0^0 + a_1 \binom{1}{1} (-1)^1 x_0^1 + a_2 \binom{2}{2} (-1)^2 x_0^2 + a_3 \binom{3}{3} (-1)^3 x_0^3 + a_4 \binom{4}{4} (-1)^4 x_0^4 + a_5 \binom{5}{5} (-1)^5 x_0^5 \quad (18)$$

což lze obecně zapsat jako

$$b_n = \sum_{i=0}^{N-n} a_{n+i} \binom{n+i}{i} (-1)^i x_0^i \quad (19)$$

kde $n=0,1,\dots,N$ a $i=0,1,\dots,N-n$

Odpovídající blokový diagram této varianty je na obr.10.



Obr.10 RegressCond.vi s podmínkou průchodu daným bodem - diagram

Pokud tedy takto určíme dva polynomy závislosti síly na rychlosti pro obě hraniční hodnoty proudu, musíme v druhém kroku určit plochu, která je nad tímto intervalem a prochází na hranici právě těmito polynomy. Jelikož uprostřed intervalu nejsou žádná naměřená data, a síť hranic intervalů v tomto směru volíme dostatečně hustou, může být závislost v tomto směru lineární.

Hledáme tedy parametry rovnice (2) resp. (3). Nejprve je možno popsat případ, kdy je závislost na obou proměnných lineární.

Hraniční polynomy necht' jsou tedy lineárními závislostmi $z=f(x)$

$$z = a_1x + a_0 \text{ pro } y = y_1 \quad (20)$$

a

$$z = b_1x + b_0 \text{ pro } y = y_2 \quad (21)$$

Hledáme parametry c_3 až c_0 plochy $z=f(x,y)$

$$z = c_3xy + c_2x + c_1y + c_0 \quad (22)$$

Dosažením dostáváme rovnice

$$c_3xy_1 + c_2x + c_1y_1 + c_0 = a_1x + a_0 \quad (23)$$

$$c_3xy_2 + c_2x + c_1y_2 + c_0 = b_1x + b_0 \quad (24)$$

Porovnáním koeficientů dostáváme čtyři rovnice o čtyřech neznámých

$$c_3y_1 + c_2 = a_1 \quad (25)$$

$$c_1y_1 + c_0 = a_0 \quad (26)$$

$$c_3y_2 + c_2 = b_1 \quad (27)$$

$$c_1y_2 + c_0 = b_0 \quad (28)$$

řešením těchto tří rovnic dostáváme hledané parametry rovnice (22)

$$c_3 = \frac{a_1 - b_1}{y_1 - y_2} \quad (29)$$

$$c_2 = a_1 - c_3 y_1 = a_1 - \frac{a_1 - b_1}{y_1 - y_2} y_1 \quad (30)$$

$$c_1 = \frac{a_0 - b_0}{y_1 - y_2} \quad (31)$$

$$c_0 = a_0 - c_1 y_1 = a_0 - \frac{a_0 - b_0}{y_1 - y_2} y_1 \quad (32)$$

Tato lineární verze polynomiální plochy je použita na všech intervalech sousedících s rovinou $x' = 0$, kdy jedna z hraničních podmínek je dána fyzikální podstatou tlumiče, a sice, že síla je pro nulovou rychlost také nulová, tj. jedna z podmínek (20) nebo (21) je $z=0$.

Obecně pak lze tuto lineární situaci rozšířit na obecný případ s hraničními polynomy libovolného řádu

$$z = a_n x^n + \dots + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \text{ pro } y = y_1 \quad (33)$$

$$z = b_n x^n + \dots + b_2 x^2 + b_1 x + b_0 \text{ pro } y = y_2 \quad (34)$$

kdy hledáme parametry c_{2n+1} až c_0 rovnice

$$z = c_{2n+1} x^n y + c_{2n} x^n + \dots + c_5 x^2 y + c_4 x^2 + c_3 x y + c_2 x + c_1 y + c_0 \quad (35)$$

neboli

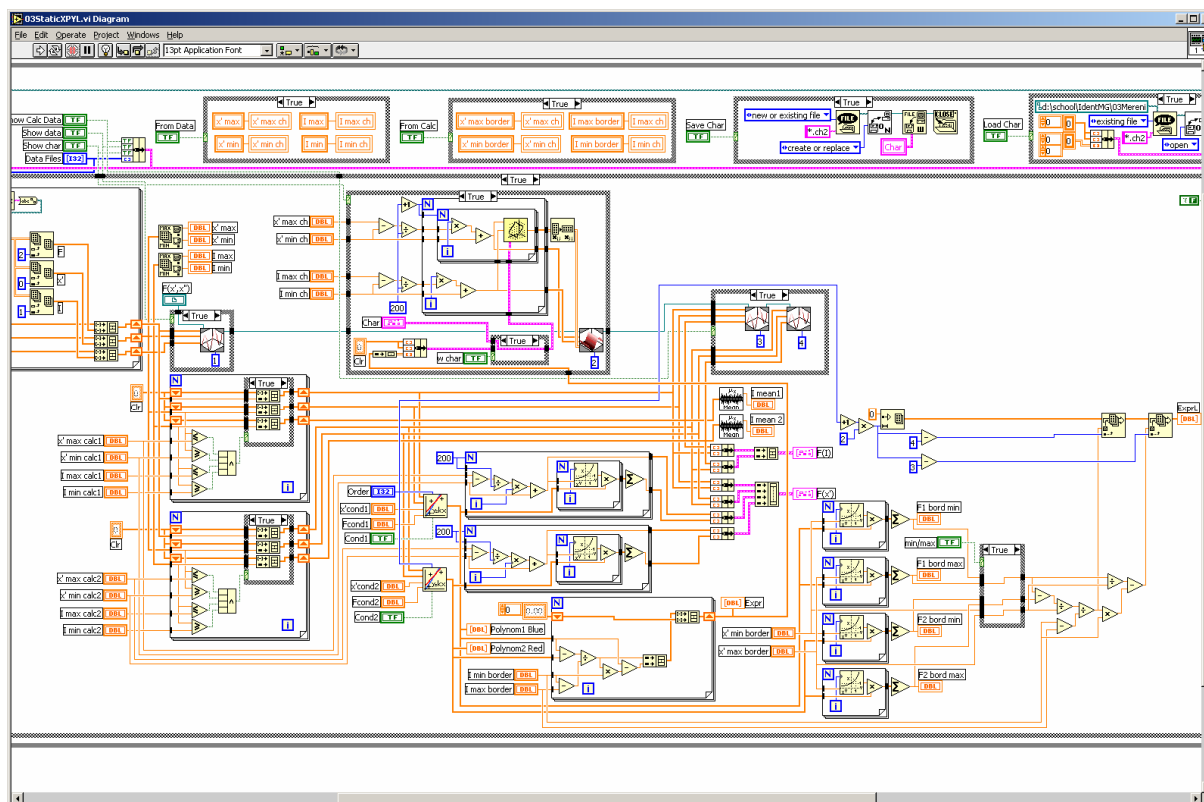
$$z = \sum_{i=0}^n (c_{2i+1} x^i y + c_{2i} x^i) \quad (36)$$

Analogicky dostáváme jednotlivé parametry porovnáním koeficientů

$$c_{2i+1} = \frac{a_i - b_i}{y_1 - y_2} \quad (37)$$

$$c_{2i} = a_i - c_{2i+1} y_1 = a_i - \frac{a_i - b_i}{y_1 - y_2} y_1 \quad (38)$$

Na obr.11 je diagram výpočtu obou popsaných variant plochy. Parametry rovnice plochy na hlavním intervalu jsou v poli Expr, parametry lineární plochy na sousedním intervalu jsou v poli ExprL.



Obr.11 Výpočet parametrů složené polynomiální plochy - diagram

Výpočet lineární plochy vychází ze skutečnosti, že pro nulovou rychlost $\dot{x}=0$ je tlumicí signál.

Platí podmínky

$$z_1 = \frac{F_{1board\ min}}{\dot{x}_{min\ board}} x + 0 \text{ pro } y = y_1 \quad (39)$$

a

$$z_2 = \frac{F_{2board\ min}}{\dot{x}_{min\ board}} x + 0 \text{ pro } y = y_2 \quad (40)$$

kde $F_{1board\ min}$ a $F_{2board\ min}$ jsou funkční hodnoty hraničních polynomů na hlavním intervalu na hranici mezi hlavním a sousedním intervalem $\dot{x}'_{min\ board}$.

Z těchto podmínek plynou koeficienty rovnice lineární plochy na sousedním intervalu, přičemž jejich počet je dán řádem polynomu na hlavním intervalu, aby celá struktura byla homogenní, tj. se stejným řádem.

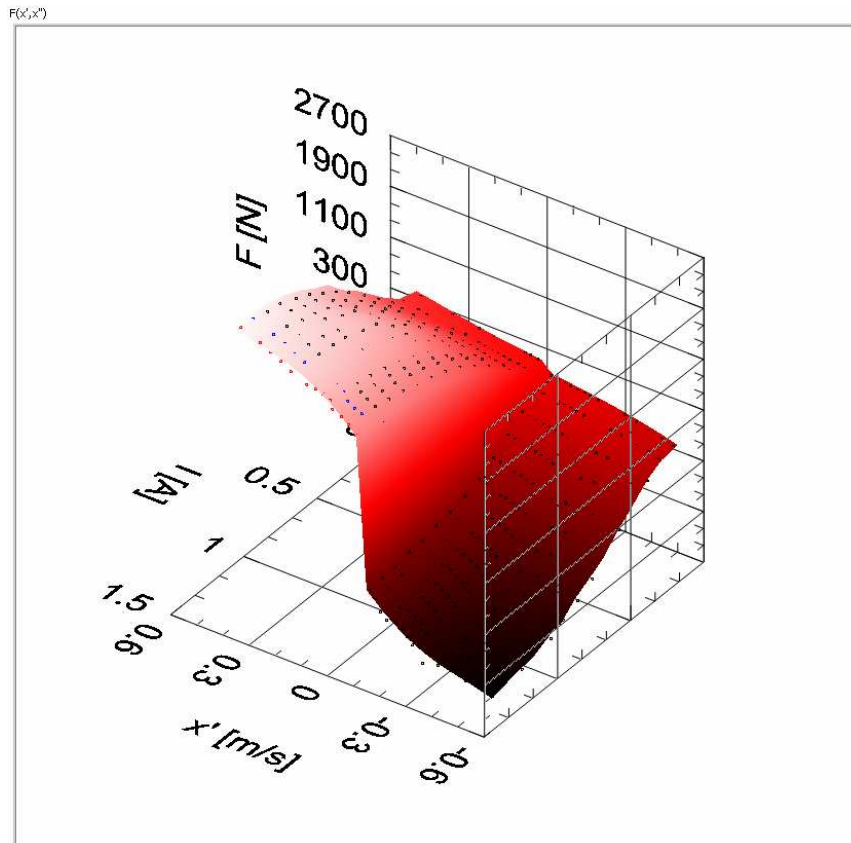
$$c_{2i+1} \dots c_4 = 0 \quad (41)$$

$$c_3 = \frac{\frac{F_{1board\ min}}{\dot{x}_{min\ board}} - \frac{F_{2board\ min}}{\dot{x}_{min\ board}}}{y_1 - y_2} \quad (42)$$

$$c_2 = \frac{F_{1board\ min}}{\dot{x}_{min\ board}} - c_3 y_1 = \frac{F_{1board\ min}}{\dot{x}_{min\ board}} - \frac{\frac{F_{1board\ min}}{\dot{x}_{min\ board}} - \frac{F_{2board\ min}}{\dot{x}_{min\ board}}}{y_1 - y_2} y_1 \quad (43)$$

$$c_1 \dots c_0 = 0 \quad (44)$$

Zkonstruovaná statická charakteristika měřeného tlumiče je na obr.12.



Obr.12 Statická charakteristika magnetoreologického tlumiče

5. Závěr

Magnetoreologický tlumič byl přestavěn tak, že z něho byla odstraněna vlastní regulační smyčka, která byla nahrazena novým převodníkem budicího proudu, pomocí kterého byl tlumič řízen z měřicí karty PC.

Za účelem identifikace bylo provedeno několik sad měření. Typy signálů byly voleny s ohledem na analýzu statických a dynamických vlastností tlumiče. Na zpracování naměřených dat byla v LabView vytvořena aplikace Preprocessing.vi, která umožňuje filtraci, výpočet rychlosti z polohy pístnice a přípravu dat pro další zpracování.

Statické vlastnosti tlumiče byly určeny na základě analýzy ustálených hodnot u měřených signálů v širokém rozsahu rychlostí i budicího proudu. Byl definován nový způsob popisu dvourozměrné statické charakteristiky tlumiče, obecná polynomiální složená funkce. V

LabView byla vytvořena aplikace StaticXPYL.vi umožňující aproximaci dvourozměrné statické charakteristiky s využitím polynomiální regrese z naměřených dat.

Pomocí aplikace StaticXPYL.vi byla identifikována a představena dvourozměrná statická charakteristika měřeného magnetoreologického tlumiče.

Poděkování

Článek vznikl v rámci řešení výzkumného záměru MSM 4674788501 finančně podporovaného MŠMT ČR..

Literatura

ŠKLÍBA, J.; SVOBODA, R.: Some problem of hydraulic damper modeling, Colloquium Dynamics of Machines 2000, Praha 2000

ŠKLÍBA, J.; SVOBODA, R.: Rozložení tlaků v hydraulickém tlumiči, VIII. mezinárodní konference "Teorie strojů a mechanismů", Liberec 2000

SVOBODA, R.; ŠKLÍBA, J.: Problémy numerické integrace modelu hydraulického tlumiče, Computational Mechanics 2000, konference s mezinárodní účastí, Nečtiny 2000