

EXPERIMENTÁLNE ZARIADENIE PRE MERANIE DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTÍK STROJOVÉHO AGREGÁTU

THE EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR MEASUREMENT OF DYNAMICAL CHARACTERISTICS OF THE MACHINE AGGREGATE

Jozef Mudrik, Eva Labašová, Eva Riečičiarová¹

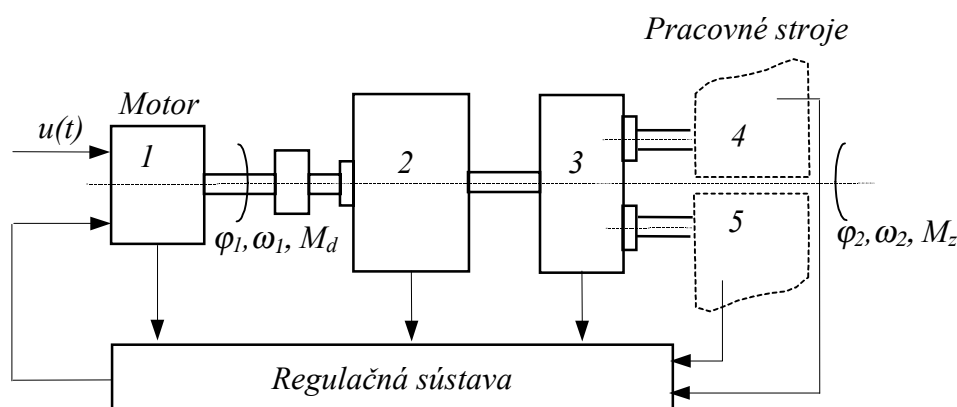
Abstract:

An up-to date electronic device allowing for dynamic loading/breaking a mechatronical (sub)system has been developed as described. Unlike static brakes/dynamometers used so far it is able to generate a dynamical load with a pre-set or arbitrary given waveform and/or time-schedule. It consists of a processor controlled rectifier, a DC motor, a control processor and a PC. The off-line cooperation of the controlling processor with the master PC allows for data pre- and post- processing.

Kľúčové slová: strojový agregát, dynamická charakteristika, mechanický prevod, subsystém zaťaženia, subsystém riadenia, komunikačný subsystém, automatizované meracie pracovisko

1. Dynamické modely strojových agregátov

Strojový agregát predstavuje dynamický systém určený pre pohon pracovného mechanizmu stroja a súčasne pre riadenie technologického procesu [1-4].



Obr. 1 Schéma strojového agregátu

¹ Doc. Ing. Jozef Mudrik, CSc., Ing. Eva Labašová, PhD., Ing. Eva Riečičiarová: Materiálovotechnologická fakulta STU, Katedra aplikovanej mechaniky, Paulínska 16, 917 24 Trnava, tel/fax: +421.805.5511668, e-mail: kam@mtf.stuba.sk, labasova@mtf.stuba.sk, riecicia@mtf.stuba.sk

Na obr. 1 je uvedená schéma rotačného strojového agregátu s elektropohonom. Pozostáva z troch subsystémov: pohonu (elektromotor + prevodový mechanizmus), pracovného stroja, predstavujúceho technologický proces (momenty a sily vznikajúce v technologickom procese) a regulačnej sústavy zabezpečujúcej optimálne riadenie strojového agregátu z pohľadu technologického procesu alebo dynamiky agregátu ako celku.

Charakteristiky motora a kvalita regulačnej sústavy určujú výkonnosť (produktivitu) stroja, presnosť vykonávania technologických operácií a dynamické zaťaženie mechanických častí pohonu [1], [5]. Naopak zaťaženie v mechanickej časti a presnosť prevodov vplyvajú na podmienky práce motora regulačnej sústavy.

Základné charakteristiky strojového agregátu, ako zložitej elektromechanickej sústavy s veľkým počtom pohybujúcich sa častí, vystihujú:

- mechanická charakteristika pohonného motora,
- mechanická charakteristika zaťaženia,
- mechanický prevod.

Proces premeny energie na mechanickú prácu bezprostredne riadi vstupný parameter - napätie $u(t)$. Výstupným parametrom motora je uhlová výchylka φ_1 , uhlová rýchlosť ω_1 a mechanická časť je uvádzaná do pohybu momentom M_d .

Vlastnosti motora charakterizuje **momentová charakteristika**, ktorá udáva závislosť hnacieho elektromagnetického momentu od parametrov $u(t)$, φ_1 , ω_1 [3].

$$M_d = M[u(t), \varphi_1, \omega_1] \quad (1)$$

Mechanická časť strojového agregátu obsahuje v závislosti od konštrukčného usporiadania a tvaru pracovných mechanizmov rôzne typy prevodov, spojok, náhonov a ďalších častí. Z hľadiska dynamiky je mechanický prevod charakterizovaný momentom zotrvačnosti I_p a stálym prevodom i_p , ktorý je definovaný pomerom uhlových rýchlostí vstupného člena ω_1 a výstupného člena prevodu ω_2

$$i_p = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad (2)$$

V technologickom procese vznikajú sily F_z a momenty M_z , ktoré zaťažujú členy strojového agregátu. Ak sa jedná o rotačný pohyb, potom mechanická charakteristika zaťaženia je vyjadrená vzťahom

$$M_z = M_z(t, \varphi_2, \omega_2, \varepsilon_2), \quad (3)$$

kde φ_2 , resp. ω_2 , resp. ε_2 sú výchylka, resp. uhlová rýchlosť, resp. uhlové zrýchlenie na výstupe prevodu.

Strojový agregát je v dynamickom modeli charakterizovaný momentom zotrvačnosti I , ktorý môže byť:

- stály: $I = \text{konšt.}$
- periodicky premenný v závislosti od polohy hnaného člena agregátu:

$$I(\varphi) = I(\varphi + 2\pi) \quad (4)$$

Premenný moment zotrvačnosti je typický pre mechanizmy s nelineárnymi kinematickými väzbami, teda pre mechanizmy pre premenu rotačného pohybu na priamočiary (kľukové, kulisové, vačkové mechanizmy a pod.).

Zaťažujúci moment vo všeobecnosti môžeme vyjadriť vzťahom

$$M_z(\varphi, \omega) = M_{z\varphi}(\varphi) \pm M_{z\omega}(\omega) = M_{z\varphi}(\varphi) - \text{sgn } \omega M_{z\omega}(\omega), \quad (5)$$

pričom prvý člen predstavuje aktívne momenty súvisiace so zmenou potenciálnej energie a druhý člen tvoria odporové momenty vznikajúce v technologickom procese a trecie momenty. Odporové momenty $M_{zo}(\omega)$ možno spravidla vyjadriť ako nelineárne funkcie v závislosti od uhlovej rýchlosti.

Pre rad technologických operácií má zaťažujúci moment od technologických odporov periodický charakter v závislosti od času t , napr. pri frézovacích strojoch, rotačných rýpadlách, vibračných strojoch, tvárniacich strojoch.

Pri uvažovaní tuhých väzieb vedie výpočet dynamických režimov strojového agregátu k riešeniu pohybovej rovnice, v ktorej vystupuje redukovaný dynamický moment sústavy M_{dyn}

$$M_{dyn} = M_d[u(t), \varphi_1, \omega_1] - M_z(t, \varphi_2, \omega_2, \varepsilon_2), \quad (6)$$

reprezentujúci zotrvačnosť sústavy a jej pohybový stav, ktorý je daný súčinom redukovaného momentu $I(\varphi)$ s príslušným diferenciálnym výrazom pre uhlové zrýchlenie:

$I \frac{d\omega}{dt}$ - agregát s konštantným prevodom,

$I(\varphi) \frac{d\omega}{dt} + \frac{1}{2} \frac{dI(\varphi)}{d\varphi} \omega^2$ - agregát s premenným prevodom,

M_d - hnací elektromagnetický moment motora redukovaný na hlavný člen agregátu,

M_z - zaťažujúci moment redukovaný na hlavný člen agregátu.

Aby bolo možné riešiť pohybovú rovnicu strojového agregátu (6), treba poznať analytické vyjadrenie hnacieho a zaťažujúceho momentu, ktoré definujú mechanické charakteristiky. Hnací moment v prípade elektromotora môžeme vyjadriť v okolí pracovného bodu v tvare lineárnej dynamickej charakteristiky

$$\tau_e \frac{dM_d}{dt} + M_d = M_s(u, \varphi, \omega), \quad (7)$$

kde τ_e je časová elektromagnetická konštanta a M_s - statická momentová charakteristika.

Zaťažujúci premenný moment môžeme uvažovať v harmonickom tvare

$$M_z = M_{z\Phi} + M_{za} \cos(v, t), \quad (8)$$

kde $M_{z\Phi}$ je stredná hodnota zaťažujúceho momentu, M_{za} - amplitúda premennej zložky momentu, v - uhlová frekvencia zmeny momentu.

Cieľom analytického riešenia je určenie ustáleného pohybu v tvare [1], [2]

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \omega_\Phi + \omega_\pi(\omega_\Phi t) \\ M(t) &= M_\Phi + M_\pi(\omega_\Phi t) \end{aligned} \quad (9)$$

kde index Φ označuje neznáme stredné hodnoty a index π centované periodické zložky veličín. Rovnice (9) sú parametrickými rovnicami trajektórie - **dynamickej charakteristiky agregátu**. Pracovný bod (ω_Φ, M_Φ) agregátu sa pohybuje po uzavretej trajektórii s frekvenciou otáčok [1], [3].

2. Štruktúra experimentálneho zariadenia

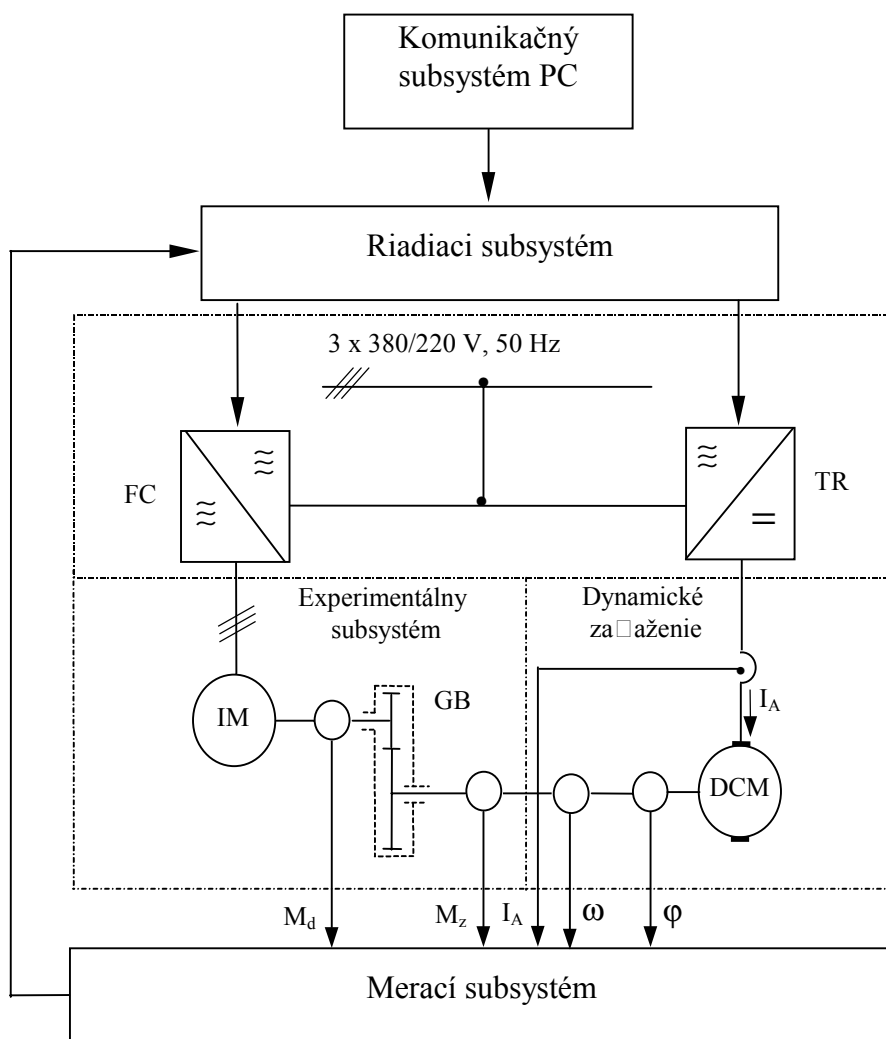
Experimentálne zariadenie pre dynamické zaťažovanie strojových agregátov umožňuje sledovať vplyv parametrov agregátu na nerovnomernosť uhlovej rýchlosti $\omega(t)$

a hnacieho momentu $M(t)$ v zmysle vzťahov (9), alebo získať dynamickú charakteristiku strojového agregátu v ustálenom a prechodnom stave v tvare $M(\omega)$. Umožňuje posúdiť vhodnosť konštrukcie stroja z hľadiska prevádzkovej spoľahlivosti, presnosti, výkonnosti pri rôznych typoch zaťaženia [4].

Skúšobný stend pozostáva z nasledujúcich subsystémov:

- vstupný energetický podsystem, napr. skúšaný pohon,
- prevodový subsystém, napr. skúšaná prevodovka, spojka, hriadel',
- zaťažovací subsystém s možnosťou aktívnej a pasívnej záťaže,
- riadiaci subsystém so svojimi podsystemami, medzi ktoré patrí: merací subsystém so snímačmi rýchlosti, polohy, momentu, elektrických veličín, regulačný subsystém s riadiacim počítačom a jeho riadiacim programom,
- komunikačný subsystém s prácou on line alebo off line na PC.

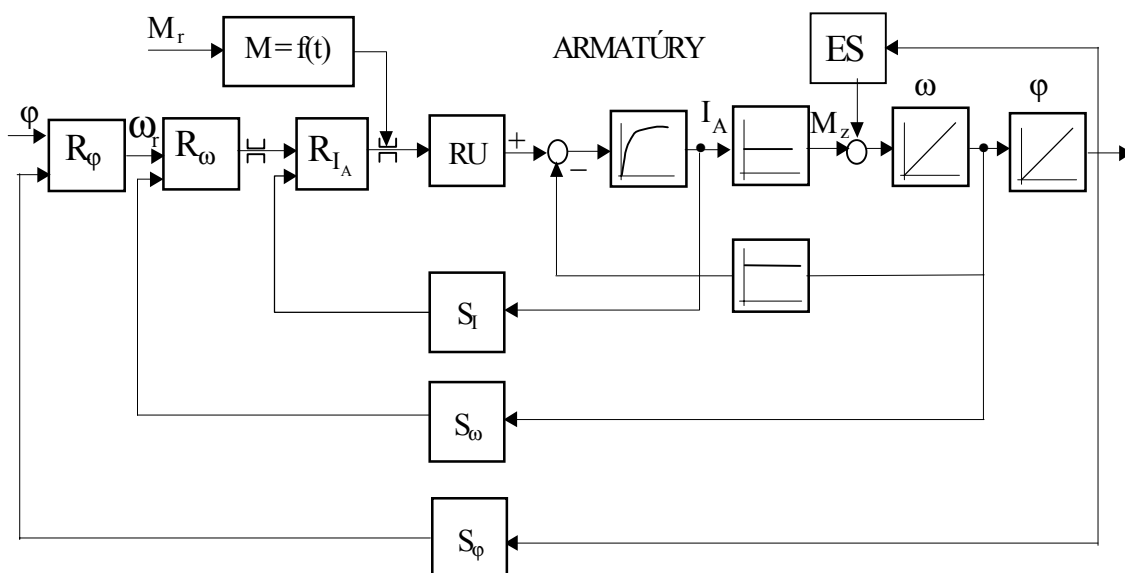
Riadiaci program v riadiacom počítači možno realizovať tak, že pozostáva z programovaného automatu PLC, komunikačného PC a príslušných programových prostriedkov, alebo je regulačná a komunikačná funkcia sústredená do regulačného a komunikačného PC [4]. Konfigurácia skúšobného stendu je na obr. 2.



Obr. 2 Konfigurácia simulátora dynamického zaťažovania

3. Zat'azovací dynamický subsystém stendu

Dynamické vlastnosti zaťažujúceho momentu sa realizujú dynamickou zmenou prúdu kotvy, napr. pomocou prúdového obmedzenia v regulátore prúdovej slučky usmerňovača [4]. Bloková schéma simulátora dynamického zaťažovania je na obr.3.



Obr. 3 Bloková schéma simulátora dynamického zaťažovania

Realizovaný dynamický simulátor používa výkonovú elektroniku a elektrický jednosmerný motor zo systému MEZOMATIC – MEZ Brno. Mikroprocesor používaný v systéme uľahčí inicializáciu simulátora.

1/ Ovládací počítač cez sériovú linku RS 232C obojsmerne komunikuje s meničom napájajúcim motor - priame číslicové riadenie meniča.

2/ Prvá koncepcia je doplnená o programovateľný automat (PLC). Tento obojsmerne komunikuje cez RS 232 s ovládacím PC a súčasne zadáva anológové hodnoty meniču, ktorý napája motor - nepriame číslicovo - analógové riadenie meniča.

V našom prípade bol použitý druhý spôsob.

4. Použitie experimentálneho stendu

Principiálne použitie stendu pre dynamické zaťažovanie strojových agregátov a mechanizmov sa môže orientovať na tvorbu dynamickej záťaže v technologickom procese (valcovanie, strihanie, lisovanie, rezanie a pod.) s požadovanými statickými a dynamickými parametrami. Ďalej na laboratórne, výrobné, výstupné skúšky a skúšky životnosti ktoréhokoľvek subsystému mechatronického systému, podrobeného danej dynamickej záťaži. Ďalšie použitie sa orientuje buď na technologický proces alebo na mechanický subsystém: prevodovky, spojky, hriadeľ, motor, menič, regulátor, snímač.

Ďalšou aplikáciou môže byť sledovanie toku energie a signálu mechatronického systému, nech je už ich fyzikálna podstata akákoľvek, a to elektrická, hydraulická, pneumatická a mechanická. Pod mechatronickým systémom rozumieme integráciu výkonovej časti elektromechanickej sústavy s riadiacou elektronickou časťou, zabezpečujúcou optimálne riadenie strojového agregátu z pohľadu technologického procesu alebo dynamiky agregátu ako celku.

Z aplikačného hľadiska stend umožňuje simulovať technologické zariadenia. Pod simuláciou rozumieme buď len náhradu zariadenia alebo jeho vytvorenie v zmysle teórie modelovania - malým zariadením simulovať veľké zariadenie.

Technologický proces je simulovaný programovo riadenou záťažou vyvíjanou jednosmerným motorom DCM. Skúšaný mechatronický subsystém môže byť napr. prevodovka G - obr. 4. Hnacie zariadenie je simulované asynchrónnym motorom IM, ktorý môže preverovať vhodnosť ako zariadenia tak aj pracovného cyklu technologického procesu.

V blokovej schéme je: FC - frekvenčný menič, IM - asynchrónny motor, G - prevodovka, T_1 , T_2 - snímače momentu, ω - snímač rýchlosti, ϕ - snímač polohy, DCM - zaťažovací stroj (jednosmerný stroj), A/D - prevodníky, CC - riadiaci počítač, CR - riadený usmerňovač, PC - komunikačný počítač.

Pohonným mechanizmom skúšanej prevodovky je asynchrónny motor (frekvenčne riadený). Na jej druhej strane sa nachádza jednosmerný motor a riadený usmerňovač v invertorickom režime, cez ktorý sa energia dostáva späť do elektrickej siete. Usmerňovač je riadený prúdovým regulátorom, na ktorého vstupe sa nachádza generátor voliteľného tvarovaného riadiaceho napätia. Jeho tvar zodpovedá tvaru dynamického zaťažovacieho momentu prevodového mechanizmu. Technická realizácia využila MEZOMATIC V 112 S8 (5kW) MEZ Brno a procesorový riadiaci systém RSK1 MicroStep s.r.o. Bratislava. Táto firma zostavila aj programové vybavenie.

Dynamický záťažný moment môže byť funkciou času, alebo polohy hriadeľa. V oboch prípadoch možno zadať priebeh momentu tabelárne, alebo možno voliť štandardné priebehy a zadať len ich charakteristické parametre. Štandardom je obdĺžniková, trojuholníková, pílová alebo harmonická periodická zložka M_{z2} , superponovaná na konštantný moment $M_{z\phi}$.

$$M_z(\varphi, t) = M_{z\varphi}(\varphi, t) + M_{z2}(\varphi, t) = M_{z\varphi} + M_{za} \cos vt \quad (10)$$

Diagram illustrating the control system for a machine tool (pracovný stroj). The system components and their interconnections are as follows:

- PC (Program Controller)** provides input to the **CC (Control Computer)**.
- CC (Control Computer)** outputs to the **FC (Feedforward Controller)** and the **CR (Control Reference)**.
- FC (Feedforward Controller)** outputs to the **IM (Integrator/Motor)**.
- IM (Integrator/Motor)** outputs to the **T₁** summing junction.
- CR (Control Reference)** outputs to the **T₁** summing junction and the **A/D** converter.
- T₁** summing junction outputs to the **G** gain block.
- G** gain block outputs to the **T₂** summing junction.
- T₂** summing junction outputs to the **ω** (omega) block.
- ω** (omega) block outputs to the **φ** (phi) block.
- φ** (phi) block outputs to the **DCM** (Digital Control Module) block.
- DCM** block outputs to the **zaťaženie** (load) and the **A/D** converter.
- A/D** (Analog-to-Digital) converter outputs to the **CR** block.
- CR** block is labeled **riadenie** (control) and **napájanie** (power supply).

4.1 Meranie

V prvej etape sa pomocou programu spustením na PC zadajú vstupné údaje, ktoré sa prenesú cez sériový port do riadiacej jednotky RKS1 umiestnenej v zariadení. Zvolíme „ručnú“, alebo „automatickú“ prevádzku, zadefinujeme nezávislé premenné (čas, poloha), hodnotu konštantnej zložky momentu, počet vzoriek atď.

V tretej etape sa namerané údaje spracovávajú a archivujú sa požadované úseky meraní. Táto etapa prebieha „off line“.

Aj keď pôvodným zámerom bolo zaťažovanie prevodových mechanizmov, experimentálne zariadenie je možné použiť na dynamické skúšky iných elektromechanických mechatronických subsystémov, napr. spojok, brzd, hriadeľov, (servo)motorov, variátorov a

pod. Jeho aplikácia sa rozšíri dokončením riadenia frekvenčného meniča na napájanie asynchrónneho motora a rozšírením usmerňovača na štvorkvadrantovú prevádzku. Potom bude možné zaťažovať aktívnym aj pasívnym záťažovacím dynamickým momentom a lepšie vyšetrovať typické nelinearity prevodových mechanizmov.

Merací stend umožňuje, v zmysle úloh mechatroniky, pri dynamickom zaťažovaní merať, modelovať, simulovať, overovať, vyhodnocovať vzájomnú interakciu mechanických, elektrických (a iných) výkonových a regulačných subsystémov. Celok je príkladom automatizovaného meracieho pracoviska riadeného pomocou PC a riadiacou jednotkou zabudovanou do meniča.

Moderné diskrétné programovateľné riadenie umožňuje skvalitniť predprojekčnú dokumentáciu pomocou dynamických simulačných experimentov na matematicko - fyzikálnom modeli. Rovnako možno skvalitniť skúšobníctvo. Novým prvkom sú dynamické experimenty na dynamometroch novej generácie. Dynamický dynamometer umožňuje konfrontovať namerané výsledky s výsledkami získanými prostriedkami CAMS.

Obmedzený moment (do 40Nm) umožňuje priamo merať len zariadenia určené na prenos malých záťažovacích momentov. Pri zariadeniach určených na prenos väčších momentov treba použiť teóriu podobnosti.

Literatúra:

- [1] Mudrik, J.: Meranie dynamických charakteristík strojového agregátu s elektropohonom. Strojnícky časopis, 42, 1991 č.5, s. 411-425.
- [2] Mudrik, J.: Measurement of dynamical properties of the machine aggregates with variable parameters. Theoretical and Applied Mechanics, 1992 N^o 1, Sofia, p. 36 - 47.
- [3] Mudrik, J. - Michalčonok, G. F.: Problematika modelovania strojových agregátov. In: Vedecké práce MtF, 1997, zväzok 7, s. 111 - 118.
- [4] Kosorín, D. - Mudrik, B.: Automatic Device for Dynamical Load. Inženýrska mechanika, 1994, č.4, s. 239 - 247.
- [5] Stradiot, J. - Mudrik, J. a kol.: Dynamika strojov. ALFA, Bratislava, 1991.

PodĎakovanie

V príspevku sú prezentované výsledky výskumu získané v rámci spolupráce s Ústavom mechaniky telies Fakulty strojného inžinierstva VUT v Brně při řešení grantovej úlohy č. 101/98/0972 finančne podporovanej Českou grantovou agentúrou.