

# PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

zveřejněná podle § 31 zákona č. 527/1990 Sb.

(19)  
ČESKÁ  
REPUBLIKA



ÚŘAD  
PRŮMYSLOVÉHO  
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **23.10.2009**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **04.05.2011**  
(Věstník č. 18/2011)

(21) Číslo dokumentu:

**2009-695**

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

**G01M 13/02**

(2006.01)

(71) Přihlašovatel:

Vysoká škola báňská - Technická universita Ostrava,  
Ostrava-Poruba, CZ

(72) Původce:

Tůma Jiří prof. Ing. CSc., Štramberk, CZ  
Dejl Zdeněk prof. Ing. CSc., Ostrava-Poruba, CZ  
Moravec Vladimír prof. Ing. CSc., Kopřivnice, CZ  
Smutný Lubomír prof. Dr. RNDr., Ostrava-Poruba, CZ

(54) Název přihlášky vynálezu:

**Způsob měření chyby převodu ozubeného  
soukolí**

(57) Anotace:

Způsob měření chyby převodu ozubeného soukolí, kde v průběhu otáčení ozubeným soukolím se snímají a zaznamenávají vibrace převodové skříně společně se signálem prvního inkrementálního úhlového snímače, spojeného s hřídelí a současně nebo následně se snímají vibrace převodové skříně společně se signálem druhého inkrementálního úhlového snímače, spojeného s hnanou hřídelí. Signály obou inkrementálních snímačů se odděleně digitalizují, čímž se převádějí na posloupnosti vzorků signálů, které se přepočítávají na konstantní počet vzorků připadajících na jednu otáčku, což se provádí opakovaně. Synchronní filtrací se dále získají zprůměrované záznamy pro každou hřídel, které se následně pásmovou filtrací převádějí na fázově modulované harmonické signály. Fázově modulované harmonické signály se dále fázově demodulují s rozbalením výsledné fáze a přepočtem na odchylky úhlu otočení ozubeného kola od nominálního úhlu otočení, ze které se poté hřebenovou filtrací odstraňují vyšší než třetí harmonické záběrové frekvence ozubení. Dále se oba signály znovu převzorkovávají na stejný počet vzorků, připadajících na jeden zub. Dále se oba záznamy vůči sobě fázově posouvají na základě srovnávání odpovídajících průběhů záznamu vibrací a odchylky úhlu otočení se následně přepočítávají na délky kruhových oblouků dotykových kružnic, jejichž rozdíl představuje chybu převodu.

## Způsob měření chyby převodu ozubeného soukolí

### Oblast techniky

Vynález se týká převodových skříní obsahujících soukolí ozubených kol a řeší měření chyby převodu ozubeného soukolí při ustálených otáčkách, případně zjišťování závislosti této chyby na zatížení, a to zejména za účelem dosažení co nejnižších vibrací převodové skříně a tím i co nejnižší hlučnosti při jejím provozu. Způsob měření podle vynálezu je použitelný jak pro měření prototypů při navrhování nové převodovky, tak při zjišťování míry opotřebení nebo kvality soukolí ozubených kol.

### Dosavadní stav techniky

Je známo, že tuhost ozubených kol v záběru není konstantní. Mění se počet párů zubů v záběru a bod dotyku na boku zubu. Proměnlivá tuhost vyvolává samobuzené vibrace, které jsou hlavním zdrojem hluku převodovek. Při převodu rotačního pohybu z hnací hřídele na hnanou hřídel dochází u reálných převodů vlivem proměnlivé tuhosti ke vzniku chyby převodu. Chyba převodu se projevuje tím, že v průběhu pootočení o jeden zub se reálný úhel natočení výstupní hřídele liší od nominální hodnoty úhlu natočení odpovídajícímu absolutní tuhosti spoluzabírajících párů zubů. Průběh této odchylky závisí nejen na počtu zubů v záběru a na tvaru zubů, ale též na přesnosti, s jakou bylo ozubené soukolí vyrobeno. Úhlové kmity spoluzabírajících ozubených kol se přenášejí prostřednictvím ložisek na převodovou skříň a jsou příčinou zvýšené hlučnosti celého stroje.

Jsou známy optické metody zjišťování chyby převodu, při kterých se pořizuje a následně vyhodnocuje filmový záznam pohybu společně se otáčejících hřídelí nebo součástí s nimi spojených. Nevýhodou této metody je, že získané záznamy nelze přímo zpracovávat za pomoci výpočetní techniky. Další optickou metodou je metoda, při které světelný paprsek, prochází nejprve jedním z obdélníkových světlo propustných otvorů v prvním vzorkovacím kotouči, který se otáčí synchronně se vstupní hřídelí a následně prochází jedním z obdélníkových otvorů ve druhém vzorkovacím kotouči, který se synchronně otáčí společně s výstupní hřídelí, aby následně dopadl na čidlo světelné intenzity. Poměr počtu obdélníkových otvorů v obou vzorkovacích kotoučích odpovídá poměru počtu zubů použitého ozubeného kola. Na délku obvodu ozubeného kola odpovídající pootočení o jeden zub však

připadá několik obdélníkových otvorů. Pokud by měl ozubený přechod konstantní tuhost, oba vzorkovací kotouče by se otáčely synchronně a intenzita světelného pulsu odpovídající průchodu otvorem by se neměnila. Díky chybě převodu ale dochází ke změnám v překrytí obrazů obou obdélníkových tvarů a tím ke kolísání intenzity po sobě následujících světelných impulsů zachycených čidlem světelné intenzity v průběhu otáčení hřídelem. Nevýhodou tohoto řešení je složitá mechanická konstrukce, závislost počtu otvorů na počtu zubů příslušného ozubeného kola a nemožnost měření v provozních podmínkách. Dále je známa metoda založená na měření délky časového intervalu mezi jednotlivými pulsy, vysílanými inkrementálními úhlovými snímači, které se otáčejí stejnou rychlostí, jako jednotlivá ozubená kola v záběru. Nevýhodou této metody jsou vysoké nároky na zařízení pro měření času.

### Podstata vynálezu

Uvedené nevýhody řeší způsob měření chyby převodu ozubeného soukolí podle vynálezu, jehož podstatou je, že se v průběhu otáčení ozubeným soukolím snímají a zaznamenávají vibrace převodové skříně společně se signálem prvního inkrementálního úhlového snímače, spojeného s hnací hřídelí a současně nebo následně se snímají vibrace převodové skříně společně se signálem druhého inkrementálního úhlového snímače, spojeného s hnanou hřídelí. Signály obou inkrementálních snímačů se odděleně digitalizují, čímž se převádějí na posloupnosti vzorků signálů, které se přepočítávají na konstantní počet vzorků připadajících na jednu otáčku, což se provádí opakovaně. Synchronní filtrací se dále získají zprůměrované záznamy pro každou hřídel, které se následně pásmovou filtrací převádějí na fázově modulované harmonické signály. Fázově modulované harmonické signály se dále fázově demodulují s rozbalením výsledné fáze a přepočtem na odchylky úhlu otočení ozubeného kola od nominálního úhlu otočení, ze které se poté hřebenovou filtrací odstraňují vyšší než třetí harmonické záběrové frekvence ozubení. Dále se oba signály znovu převzorkovávají na stejný počet vzorků, připadajících na jeden zub. Dále se oba záznamy vůči sobě fázově posouvají na základě srovnávání odpovídajících průběhů záznamu vibrací a odchylky úhlů otočení se následně přepočítávají na délky kruhových oblouků dotykových kružnic, jejichž rozdíl představuje chybu převodu.

Výhodou způsobu podle vynálezu je, že měření lze provést pomocí snadno dostupného zařízení na všech soukolích na jejichž hřídele lze instalovat inkrementální snímače, tedy ve většině případů in situ, protože není potřebné speciální uložení hřídelí ozubených kol. Výhodou je také, že si potřebné zařízení neklade nároky na manipulační prostor v blízkosti

hřídelí a že je univerzální, neboť jej není nutno individuálně přizpůsobovat počtům zubů ozubených kol v soukolí.

### Přehled obrázků na výkresech

Obrázky 1 až 6 se týkají zpracování signálů prvního z inkrementálních snímačů, přičemž obr. 1 znázorňuje průběh impulsů inkrementálního snímače odpovídající otočení hřídele o 0,06 otáčky, obr. 2 představuje ukázkou spektra impulsního signálu, obr. 3 představuje fáze fázově modulovaného signálu, přičemž odchylky od lineárního průběhu jsou pod mezí rozlišení, obr. 4 znázorňuje odchylky okamžitého úhlu otočení od nominálního úhlu otočení, obr. 5 představuje odchylky okamžitého úhlu otočení způsobené chybou převodu a obr. 6 představuje průběh okamžité úhlové odchylky při otočení o jeden zub. Průběhy signálů druhého z inkrementálních snímačů jsou ekvivalentní. Obrázek 7 představuje průběh obou záznamů po druhém převzorkování na stejný počet vzorků, přičemž tenčí čára představuje průběh záznamu pro první ozubené kolo a silnější čára představuje průběh záznamu pro druhé ozubené kolo a to před posunutím obou záznamů vůči sobě, tedy před sjednocením na stejnou vzájemnou polohu zubů. Obr. 8 představuje totéž po provedení sjednocení, to je po kompenzaci fázového posunu. Obr. 9 představuje průběh chyby převodu při otočení o jeden zub.

### Příklad provedení vynálezu

Způsob měření chyby převodu ozubeného soukolí se příkladně provádí u převodové skříně obsahující ozubené soukolí. Ozubené soukolí tvoří hnací hřídel spojenou s pohonem, která je opatřena prvním ozubeným kolem s 21 zuby, které jsou v záběru s 39 zuby druhého ozubeného kola, které je spojeno s hnanou hřídelí. Hnací hřídel je spojena s prvním inkrementálním úhlovým snímačem, zatímco hnaná hřídel je spojena se druhým inkrementálním úhlovým snímačem. Na plášti převodové skříně je umístěn snímač vibrací. Při otáčení hřídelí vysílá příslušný inkrementální úhlový snímač impulsy, přičemž každý konkrétní impuls je vyslán v okamžiku, ve kterém je otáčející se hřídel otočen o určitý úhel. Počet pulsů vyslaných každým z inkrementálních úhlových snímačů při otočení o  $360^\circ$  by měl být nejméně 10x větší než počet zubů každého ozubeného kola, takže na pootočení hřídele o úhel odpovídající jednomu zubu by mělo připadat více než 10 impulsů. Dle tohoto příkladu jsou použity shodné inkrementální snímače, vysílající 500 impulsů na 1 otáčku.

Intervaly mezi impulsy jsou při rovnoměrné úhlové rychlosti otáčení stejně dlouhé, takže úhly pootočení hřídele mezi polohami odpovídajícími jednotlivým pulsům jsou rovněž stejné. Při vlastním měření se otáčí hnací hřídelí, což následně způsobí otáčení hnané hřídele. Signály každého z inkrementálních úhlových snímačů se společně se signálem snímače vibrací nezávisle na sobě zaznamenávají a digitalizují na posloupnost vzorků. V důsledku nerovnoměrného otáčení obou hřídelí odpovídá jejich úplnému otočení měnící se počet vzorků. Pro potřebu vzájemného srovnání jsou záznamy přepočteny na konstantní počet vzorků připadajících na jednu otáčku, v tomto případě pro každou hřídel na 2048 vzorků. Tím je dosaženo synchronního vzorkování s frekvencemi otáčení obou hřídelí. Měření se opakovaně provádí např. pro 100 záznamů otočení a synchronní filtrací se získají zprůměrované záznamy pro každou hřídel s redukovanou mírou šumu v záznamech z měření. Zprůměrované záznamy impulsních signálů se následně převádějí na fázově modulované harmonické signály. Harmonický signál se získá pásmovou filtrací se střední frekvencí odpovídající základní frekvenci impulsu a šířkou pásma zvolenou tak, aby pásmo obsahovalo alespoň 5 harmonických postranních složek k nosné frekvenci. Základní vzdálenost postranních složek od nosné složky je rovna záběrové frekvenci ozubených kol. Záběrové frekvence ozubených kol jsou dvacátým prvním a třicátým devátým násobkem frekvence otáčení ozubených kol při počtech zubů 21 a 39. Frekvence nosné fázově modulovaného signálu je pětistým násobkem frekvence otáčení obou hřídelí. Pro první ozubené kolo se propustí filtrem složky o frekvenci od  $500 - 5 \times 21$ , tj. od 395 do  $500 + 5 \times 21$ , tj. do 605, přičemž obě čísla udávají násobek frekvence otáčení ozubených kol. U druhého ozubeného kola se jedná o frekvenční pásmo od  $500 - 5 \times 39$ , tj. od 305 do  $500 + 5 \times 39$ , tj. do 695. Fázově modulované harmonické signály se dále fázově demodulují za použití výpočtu komplexního analytického signálu, jehož reálnou částí je tento fázově modulovaný harmonický signál, přičemž imaginární část se vypočte Hilbertovou transformací jeho reálné části s využitím rychlé Fourierovy transformace. Protože fáze je omezena na interval od  $-\pi$  radiánů do  $+\pi$  radiánů, je další operací rozbalení této fáze, čímž se získá časový průběh fáze, který je pětistým násobkem okamžitého úhlu otočení. Okamžitý úhel otočení každého kola odpovídá jedné pětisetině této hodnoty. Úhlové kmity každého ozubeného kola představují odchylky okamžitého úhlu otočení od nominálního průběhu úhlu otočení, který se odvodí za předpokladu konstantní úhlové rychlosti otáčení. Úhlové kmity nejsou pouze důsledkem deformací zubů, ale i důsledkem dalších vlivů, např. nerovnoměrností pohonu nebo proměnlivosti zátěže. Důsledky těchto dalších vlivů se následně odstraní použitím

hřebenového filtru, který propouští složku o záběrové frekvenci a dále složky o frekvencích nejvýše páté harmonické k základní frekvenci. Ostatní složky spektra signálů jsou potlačeny. Výsledkem filtrace je časový průběh úhlových odchylek o počtu period, které odpovídají počtu zubů. Protože na jednu otáčku každého ozubeného kola připadá 2048 vzorků záznamu úhlových odchylek, připadá při otočení prvního ozubeného kola o jeden zub  $2048 : 21$  vzorků a při otočení druhého kola  $2048 : 39$  vzorků. Pro potřebu srovnání záznamů obou ozubených kol se záznamy znovu převzorkují na stejný počet vzorků, příkladně na 100. Vzhledem k tomu, že obě měření nemusí probíhat současně, musí být záznamy odchylek vzájemně vůči sobě posunuty tak, aby začátky záznamů odpovídaly stejné vzájemné poloze zubů v záběrovém cyklu. Za tímto účelem se souběžně se snímáním impulsních signálů inkrementálních snímačů snímá dále pro každé měření signál zrychlení skříně převodovky. Správného vzájemného posunutí obou záznamů je dosaženo tehdy, když signály zrychlení z obou měření vykazují největší vzájemnou korelaci. Vzájemně posunuté odchylky úhlů otočení se následně přepočítávají na délky kruhových oblouků na dotykových kružnicích obou ozubených kol. Po dobu otočení o jeden zub představuje časový průběh rozdílů délek kruhových oblouků chybu převodu v délkových jednotkách, např. v mikrometrech.

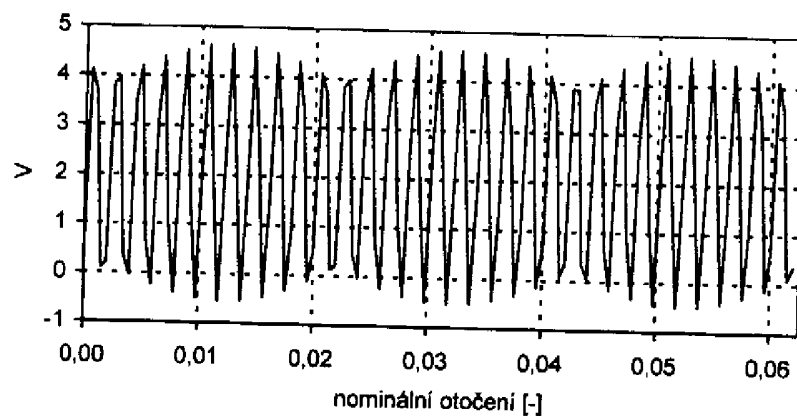
## PATENTOVÉ NÁROKY

1. Způsob měření chyby převodu ozubeného soukolí, vyznačující se tím, že se v průběhu otáčení ozubeným soukolím snímají a zaznamenávají vibrace převodové skříně společně se signálem prvního inkrementálního úhlového snímače, spojeného s hnací hřídelí a současně nebo následně se snímají vibrace převodové skříně společně se signálem druhého inkrementálního úhlového snímače, spojeného s hnanou hřídelí, přičemž signály obou inkrementálních snímačů se odděleně digitalizují, čímž se převádějí na posloupnosti vzorků signálů, které se přepočítávají na konstantní počet vzorků připadajících na jednu otáčku, což se provádí opakovaně, načež se synchronní filtrací získají zprůměrované záznamy pro každou hřídel, které se následně pásmovou filtrací převádějí na fázově modulované harmonické signály, které se dále fázově demodulují s rozbalením výsledné fáze a přepočtem na odchylky úhlu otočení ozubeného kola od nominálního úhlu otočení, ze které se poté hřebenovou filtrací odstraňují vyšší než třetí harmonické záběrové frekvence ozubení a dále se oba signály znovu převzorkovávají na stejný počet vzorků, připadajících na jeden zub, oba záznamy se vůči sobě fázově posouvají na základě srovnávání odpovídajících průběhů záznamu vibrací a odchylky úhlů otočení se následně přepočítávají na délky kruhových oblouků dotykových kružnic, jejichž rozdíl představuje chybu převodu.

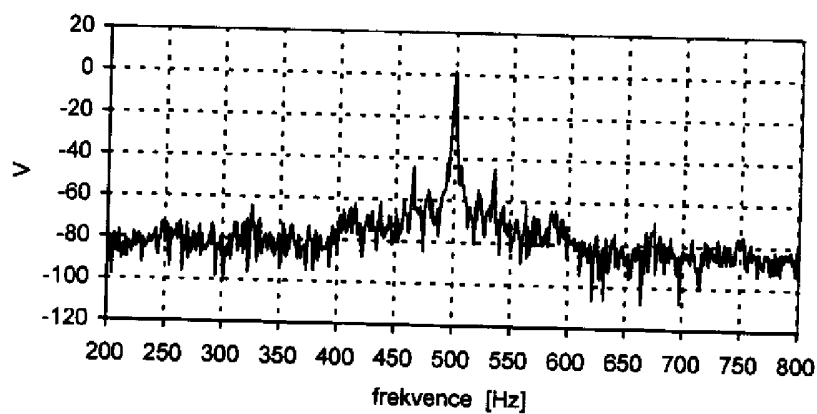
1/3

PV2009-695

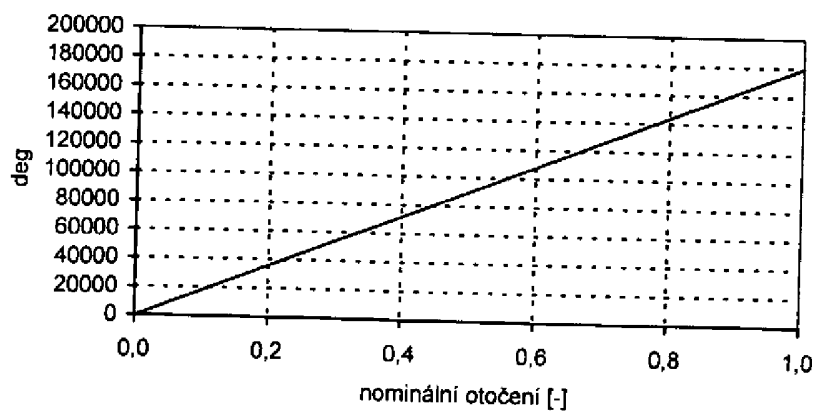
HA



Obr. 1

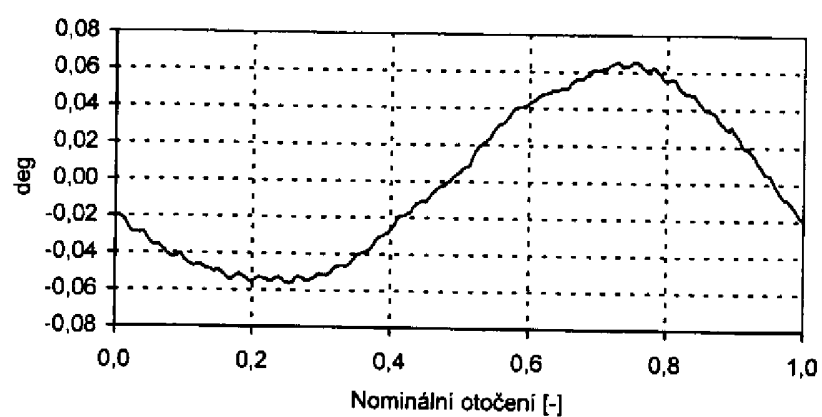


Obr. 2

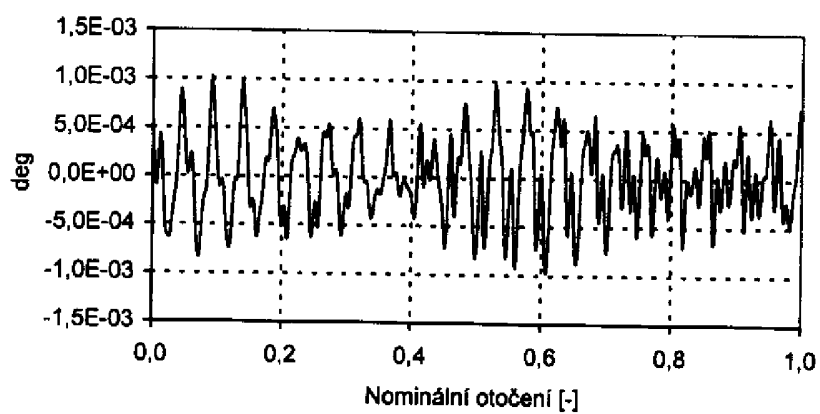


Obr. 3

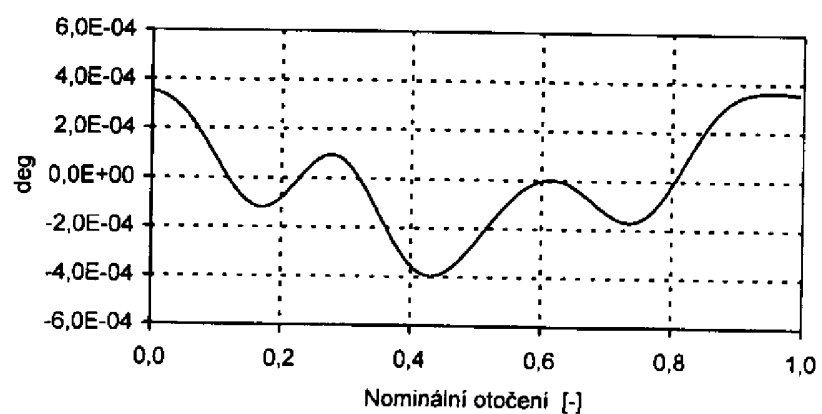




Obr. 4



Obr. 5

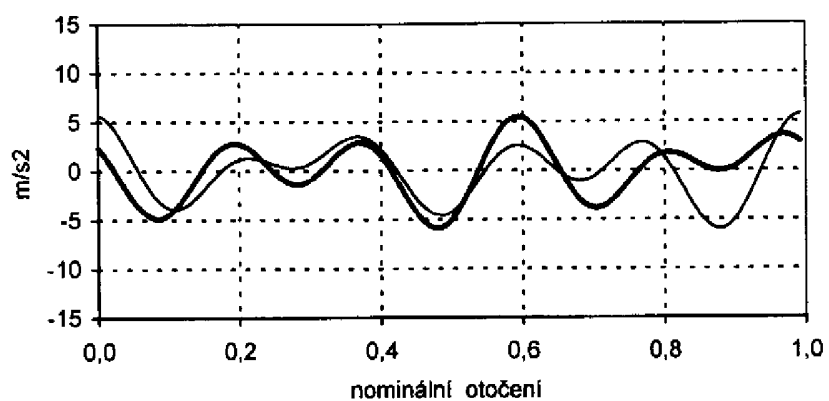


Obr. 6

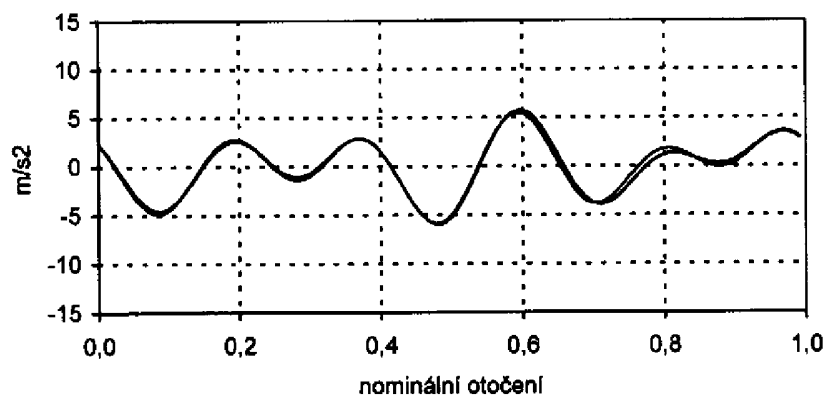
3/3

23.10.09

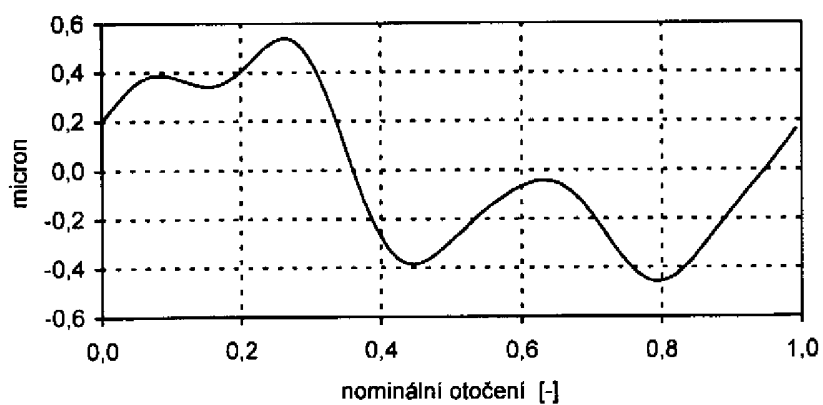
M



Obr. 7



Obr. 8



Obr. 9