



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

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

MĚŘENÍ CHYBY PŘEVODU PŘEVODOVEK S OZUBENÝMI KOLY

Jiří TŮMA*

Abstrakt: Referát se zabývá měřením chyby převodu soukolí ozubených kol v převodovce při provozních podmínkách, což znamená provozním zatížením a otáčkách. Metoda měření je zaměřena na zpracování impulsního signálu ze snímačů úhlového natočení připevněných k hřídelím obou ozubených kol. Postup vyhodnocení je založen na demodulaci fázově modulovaného signálu. Teorie je ilustrována na praktickém měření.

KLÍČOVÁ SLOVA Ozubené kolo, chyba převodu, úhlové snímače, fázová demodulace

Úvod

Soukolí ozubených kol tvoří dynamický systém. Jedním z jeho parametrů je kontaktní tuhost spoluzabírajících ozubených kol. Přesunem bodu dotyku na boku zubů, případně střídáním různého počtu párů zubů v dotyku, dochází k periodickým změnám této kontaktní tuhosti. Kolísání tohoto parametru má za účinek samovybuzené (parametrické) kmity mechanické struktury převodovky. Složka o frekvenci těchto kmitů a její harmonické dominují výrazně ve spektru hluku převodovky. Chybu převodu určuje okamžitá tuhost zatížených zubů v záběru a dále výrobní a montážní úchyly zubů, které jsou na přenášeném momentu nezávislé. Znalost chyby převodu může být využita jako kinematické buzení v dynamických modelech převodovky. Krouticí moment přenášený převodovkou se měří v jiném místě řetězce pohyblivých (setrvačných) hmot než je pár testovaných ozubených kol. Zuby jako hmotné části ozubeného kola mají svou rezonanční frekvenci v hodnotách odpovídajících záběrové frekvenci několika tisíc otáček za minutu.

Testovaná ozubená kola nejsou vyrobena ideálně přesně. Na chybě převodu se tedy podílejí další vlivy a to odchylky geometrie profilu, odchylky montáže kol (na zatížení nezávislé) a deformace poddajných částí převodovky od přenášeného zatížení. Z toho vyplývá potřeba měřit různé pracovní režimy zatížení, neboť tyto odchylky mohou vůči deformacím působit protichůdně.

Zahraniční publikace dávají do přímé souvislosti velikost chyby převodu a hladinu vyzářovaného hluku. Velikost chyby převodu se proto jeví jako klíčová v hodnocení parametrů ozubení, zejména pro výběr součinitele záběru a návrh modifikace tvaru zubů.

*Prof. Ing. Jiří Tůma, CSc., Department of Control Systems and Instrumentation, VŠB - Technical University of Ostrava, 17.listopadu 15, Ostrava-Poruba, 708 33, Czech Republic, jiri.tuma@vsb.cz

Postup měření chyby převodu

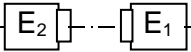
Přehled metod měření

Statická chyba převodu se měří snímači úhlového natočení, které mají základní dělení na 36000 impulsů za otáčku. Mezi dvojicí impulsů je elektronická interpolace na 5 až 100 dílů, což dovoluje rozlišení 0,36 úhlových sekund. Jiným postupem se měří chyby převodu jako rozdíl dvojitě integrovaných signálů akcelerometrů umístěných tangenciálně na ozubených kolech. Zde je problém přenosu signálu z rotujících částí převodovky. K měření byl testován neúspěšně rovněž laserový interferometr, jehož rozlišovací schopnost je srovnatelná se signálem chyby převodu [4]. Nejúspěšnější je použití snímačů generujících středně vysoký počet (stovky až tisíce) impulsů ze otáčku, které jsou založeny na různých fyzikálních principech. Nejoblíbenější jsou optické systémy. V této zprávě bude popsán postup, který je založen rovněž na elektronických impulsních snímačích s využitím techniky číslicové fázové demodulace.

Ověření přesnosti snímače úhlového natočení

K měření byly použity dva snímače, které jsou výrobkem firmy Heidehain typu ERN 460-500 a generují 500 impulsů. Pro dále podrobně popsanou metodu měření chyby převodu je důležitá přesnost rozložení impulsů vzhledem k úhlu natočení. Zdánlivě nízké rozlišení $360 / 500 = 0,72$ stupně není podstatné, protože metoda hodnocení je založena na fázové demodulaci fázově modulovaného signálu, ve které je žádoucí přesná poloha každého impulsu vzhledem k otočení hřídele. Nerovnoměrně rozložené impulsy by vytvářely falešný modulační signál.

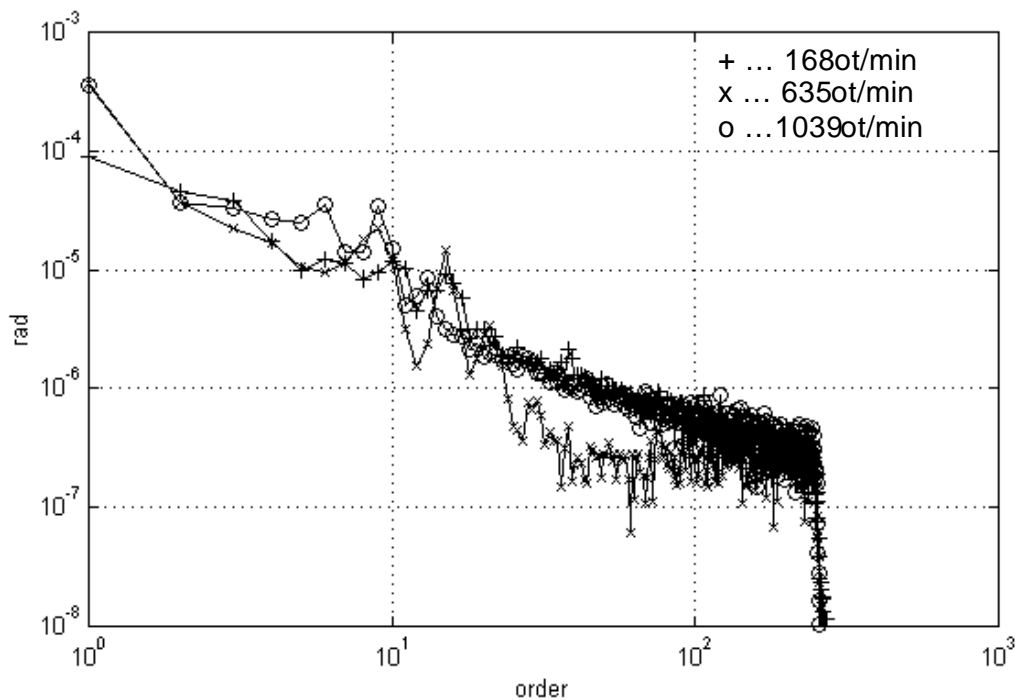
Přesnost byla vyhodnocena porovnáním údajů dvojice snímačů na společné hřídeli, tj. při jejich souběžném otáčení – viz obr. 1. Další podrobnosti měření jsou publikovány v referátu [6].

---------- Obr. 1 Uspořádání snímačů úhlového natočení při vyhodnocení jejich chyby

Efektivní hodnota chyby úhlových snímačů v závislosti na velikosti frekvence v ord je uvedena v grafu na obr. 2. Převrácená hodnota frekvence v ord udává poměrnou velikost části jedné otáčky, pro kterou je hodnocena chyba vzdálenosti příslušných impulsů. Například pro 20 ord se jedná o přesnost polohy impulsů vzdálených o 1/20 otáčky. Jak je zřejmé ze spektra chyby rozložení impulsů, s rostoucí frekvencí v ord chyba rozložení impulsů se samozřejmě snižuje. Chyba vzdálenosti blízkých impulsů je tedy logicky nižší než impulsů vzdálených. Pro danou aplikační úlohu je důležitá efektivní hodnota chyby pro frekvenci 21 a 44 ord, tj. pro otočení odpovídajícímu otočení o jeden zub na každém testovaném ozubeném kole. Chyba pro tuto frekvenci je menší než 2 úhlové sekundy.

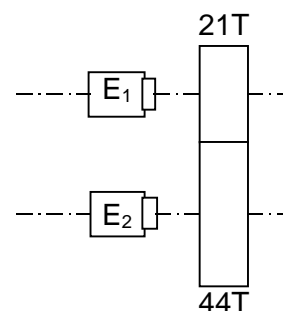
Základní princip měření s využitím impulsních snímačů a fázové demodulace

Chyba převodu soukolí ozubených kol se vyhodnocuje na základě fázové demodulace impulsního signálu ze snímače úhlového natočení (označeného rovněž encoder). Před měřením byla převodovka upravena tak, aby bylo možné k oběma hřídelím s ozubenými koly v záběru souběžně napojit snímače úhlového natočení – viz obr. 3. Kromě impulsů ze snímačů úhlového natočení bylo akcelerometrem snímáno rovněž zrychlení na skříní převodovky. Chyba převodu byla měřena u soukolí 21/44 s hřídelemi, které se otáčejí úhlovou rychlostí shodnou s úhlovou rychlostí obou snímačů úhlového natočení E_1 a E_2 .



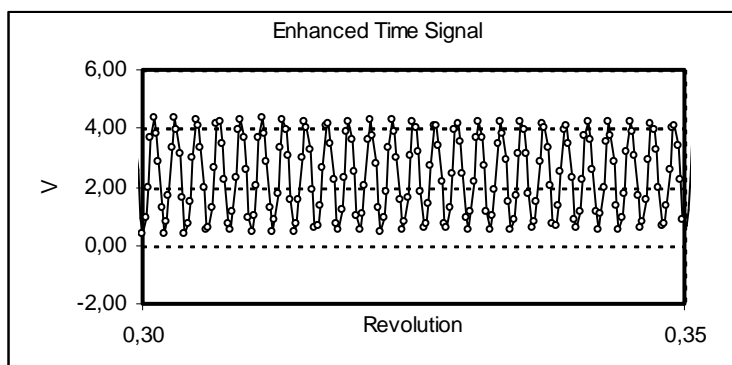
Obr. 2 Spektrum chyby úhlového snímače

Každý snímač vysílal 500 impulsů za otáčku. Impulsní signál a signál zrychlení byly zaznamenány Order Analyzerem PULSE tak, aby oba tvořily jednu úplnou otáčku. Odděleně pro každé ozubené kolo zvlášť se záznam impulsů z příslušného snímače úhlového natočení (k vybranému ozubenému kolu) a zrychlení ze zmíněného akcelerometru opakoval stokrát a výsledek měření představuje průměr vzorků se stejným pořadím. Tato funkce odpovídá synchronní filtraci, která zmenší šum měření v efektivní hodnotě na $\sqrt{100}$, tj. 10krát.



Obr. 3 Instalace snímačů úhlového natočení u soukolí 21/44 zubů

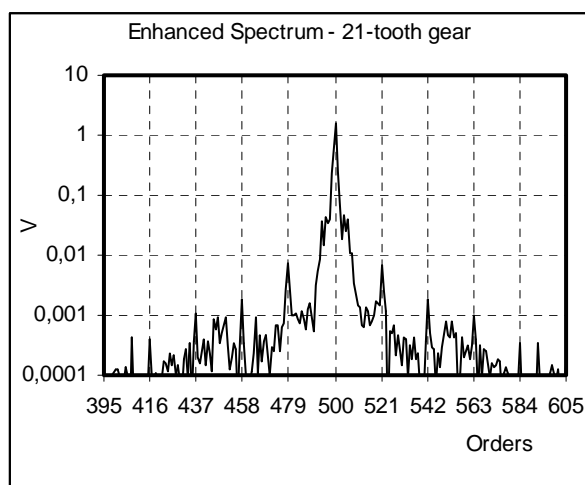
Záznam impulsů a signálu zrychlení obsahoval 4096 vzorků, tj. $4096/500 \approx 8$ vzorků na jednu periodu impulsu. Chyba převodu byla měřena u soukolí s ozubenými koly 21 a 44 zubů. Na otočení o jeden zub kola s 21 zuby připadalo tedy $4096/21 \approx 195$ impulsů a kola se 44 zuby $4096/44 \approx 93$ impulsů. Ukázka záznamu impulsů za část otočení snímače je na obr. 4.



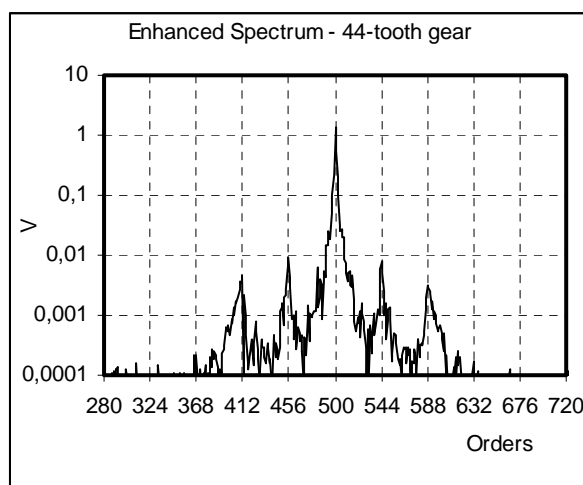
Obr. 4 Záznam impulsního signálu za část otočení snímače

Frekvenční stupnice spekter bude v ord (order), což představuje násobek dané frekvence vzhledem k frekvenci otáček. Ve spektru záznamu impulsů úhlového snímače dominuje harmonická složka s pořadím 500 ord, která je označována jako nosná složka. Protože frekvence impulsů během jedné otáčky kolísá, ve spektru impulsů se objeví postranní složky. Zubové frekvenci odpovídají postranní složky vzdálené od složky 500 ord o počet ord rovný počtu zubů, tj. o 21 a 44 ord. Pro impulsní signál z hřídele s kolem 21 zubů se jedná o složky $500 - 21 = 479$ ord a $500 + 21 = 521$ ord. Modulační fázový signál obsahuje také harmonické postranní složky. Pro druhou harmonickou dolní postranní složky platí $500 - 2 \times 21 = 458$ ord a pro druhou harmonickou horní postranní složky platí $500 + 2 \times 21 = 542$ ord. Žádoucí bylo sledovat postranní složky až do jejich páté harmonické, tj. pro ozubené kolo s 21 zuby $500 + 5 \times 21 = 605$ ord a $500 - 5 \times 21 = 395$ ord a ozubené kolo s 44 zuby $500 + 5 \times 44 = 720$ ord a $500 - 5 \times 44 = 280$ ord. Souhrnně lze uvést, že bylo třeba sledovat složky od 280 ord do 720 ord. S výhodou lze proto použít měřící rozsah analyzátoru od nuly do 800 ord, pro které je třeba zaznamenávat blok 2048 vzorků (mocnina 2 pro výpočet FFT). Tento počet vzorků nezvyšuje podstatně nároky na vzorkovací frekvenci analyzátoru. K volbě počtu impulsů lze ještě poznamenat, že za postranní pásma lze považovat rozsah od 250 do 750 ord, což dále ozřejmuje volbu provedení úhlového snímače natočení generujícího 500 impulsů na otáčku.

Ukázka frekvenčních spekter impulsního signálu v rozsahu 400 až 600 ord zaznamenaného u zatíženého soukolí je na obr. 5 a 6. Zmíněné postranní složky skutečně dominují nad pozadím spektra, a proto o přesnosti měření nemůže být pochyb. Lze rovněž odhadnout, že postranní složky přesahují úroveň pozadí spekter aspoň o jeden řád, tj. není technický problém měřit hodnoty chyby převodu 10krát menší.



Obr. 5 Spektrum impulsní signálu kola s 21 zuby



Obr. 6 Spektrum impulsní signál kola s 44 zuby

Kdyby se obě ozubená kola otáčela ideálně rovnoměrně, pak závislost úhlu otočení na čase by byla lineární. Pro úhel v radiánech platí

$$\varphi_0(t) = 2\pi t/T,$$

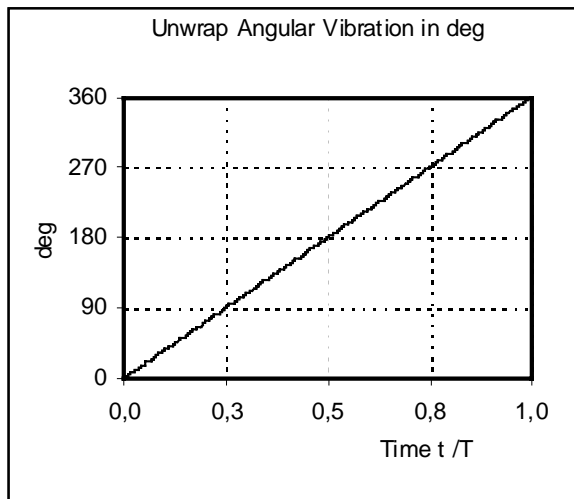
kde T je doba otáčky. V důsledku proměnlivé rychlosti otáčení a také vzájemných mikropohybů obou ozubených kol úhel otočení neroste lineárně, ale podle rovnice

$$\varphi(t) = 2\pi t/T + \Delta\varphi(t)$$

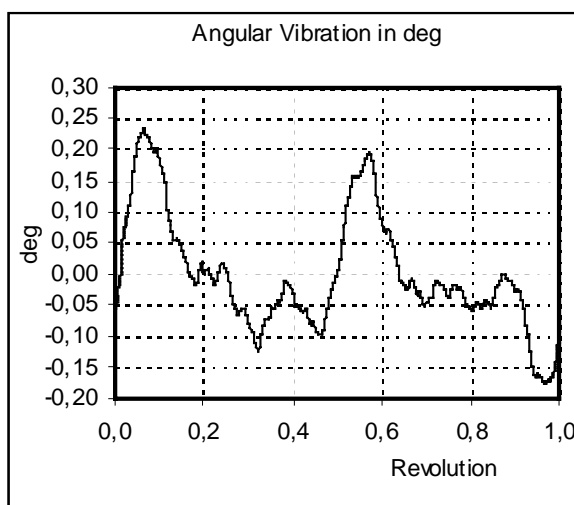
Kolísání je tak malé, že je na grafické závislosti úhlu otočení na čase nepozorovatelné. Příklad závislosti úhlu otočení kola s 21 zuby na čase je znázorněn na obr. 7. Shodný blíže

nerozlišitelný průběh má úhel otočení kola se 44 zuby. Svislá osa grafu představuje úhel otočení ve stupních a vodorovná osa relativní čas vzhledem k době otáčky T tohoto ozubeného kola. Na dalších grafech bude tato časová osa označována „Revolution“ stejně jako ve výstupních grafech analyzátoru PULSE. K dalšímu vysvětlení lze uvést, že dělení časové osy vznikne lineární interpolací na konstantní počet vzorků (mocnina dvou) mezi po sobě jdoucími impulsy (přesněji - jejich náběžnými hranami) tachosignálu, které jsou generovány jednou za otáčku každého ozubeného kola. Důvodem k použití relativního času je malé, ovšem přesným analyzátozem rozlišitelné kolísání doby otáčky, což při synchronní filtraci může výsledky měření zkreslit.

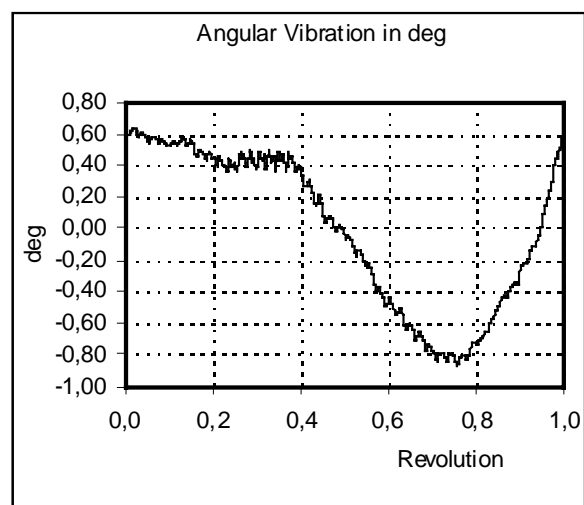
Odchyly úhlu otočení se podstatně zvýrazní, jestliže se samostatně vykreslí odchyly $\Delta\varphi(t)$, tj. od vypočtené fáze se odečte lineární část závislosti úhlu na čase o velikosti $2\pi t/T$. Nechť ozubené kolo s 21 zuby má průběh odchyly úhlu otočení, která je označena $\Delta\varphi_{21}(t)$ a znázorněna na obr. 8. Čas t se mění od nuly do T , kde T je doba otáčky tohoto kola. Jak již bylo uvedeno výše, relativní čas t/T je v grafu označen „Revolution“ a je bez rozměru. Časový průběh odchyly kola s 44 zuby nechť je označen $\Delta\varphi_{44}(t)$ a znázorněn na obr. 9, přičemž doba otáčky tohoto kola je $44T/21$.



Obr. 7 Rozbalená fáze otočení v závislosti na relativním čase otáčky



Obr. 8 Odchyly $\Delta\varphi_{21}(t)$ úhlu otočení kola s 21 zuby

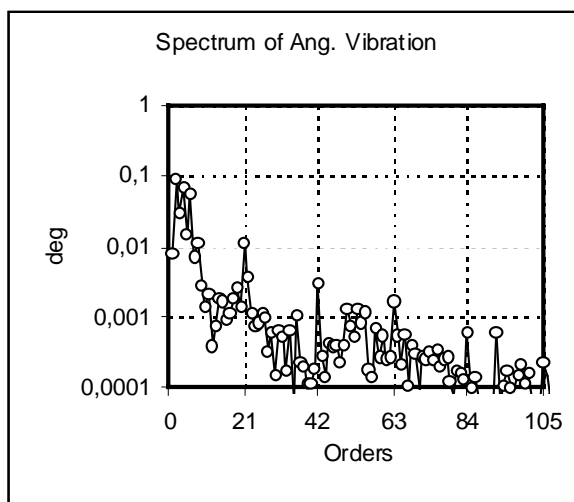


Obr. 9 Odchyly $\Delta\varphi_{44}(t)$ úhlu otočení kola s 44 zuby

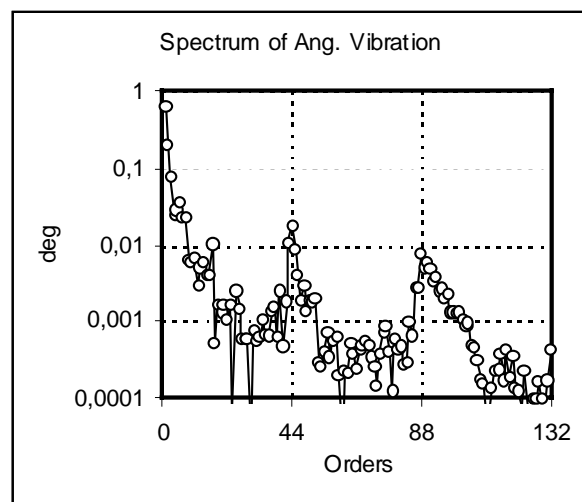
Fázová demodulace

Časové průběhy na obr. 7 až 9 byly vypočteny fázovou demodulací signálu s frekvencí nosné složky 500 ord, ke které byly uvažovány postranní pásma o šířce 250 ord. Ostatní složky spektra byly nulovány. K signálu s takto upraveným spektrem byla vypočtena Hilbertova transformace [5], která tvořila imaginární část analytického signálu, přičemž reálnou částí zůstal naměřený impulsní signál upravený pásmovou propustí 250 až 750 ord. K analytickému signálu obsahující vzorky ve tvaru komplexních čísel byla vypočtena fáze, tj. úhel měřený od kladné větve reálné osy v rozsahu $\pm\pi$. Po rozbalení fáze (posunem mimo původní rozsah $\pm\pi$) na obr. 4 byla získána závislost úhlu otočení na čase, ze které byla odečtena lineární část $2\pi t/T$, tj. získaly se odchylky úhlu otočení znázorněné na obr. 8 a 9.

Časová závislost obou odchylek $\Delta\phi(t)$ od lineární části obsahuje ve svém spektru složky s velmi malou frekvencí, nejčastěji jedna nebo jen několik vln za otáčku. Tyto složky však odpovídají hluku s velmi nízkou frekvencí a jsou tedy téměř neslyšitelné. Jejich přítomnost lze vysvětlit nepravidelnostmi otáčení nebo chybami v rozložení impulsů úhlového snímače. V obou spektrech, znázorněných na obr. 10 a 11, však lokálně dominují složky se zubovými frekvencemi a jejich harmonickými, tj. pro kolo 21 zubů jsou to složky 21 ord a jejich násobky a pro kolo 44 zubů jsou to složky 44 ord a jejich násobky. Frekvence 21 ord a 44 ord jsou po přepočtu na Hz totožné. Zmíněné nízkofrekvenční složky mají pokračování také do části spektra s harmonickými záběrové frekvence. Jejich amplitudu ovlivní však méně než asi o 1%

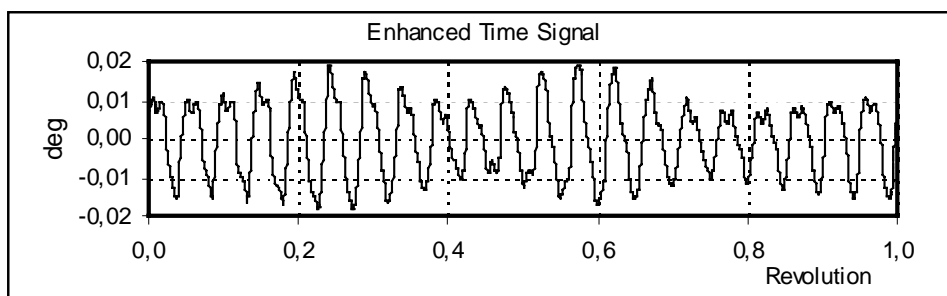


Obr. 10 Spektrum odchylky $\Delta\phi_{21}(t)$ úhlu otočení kola s 21 zuby



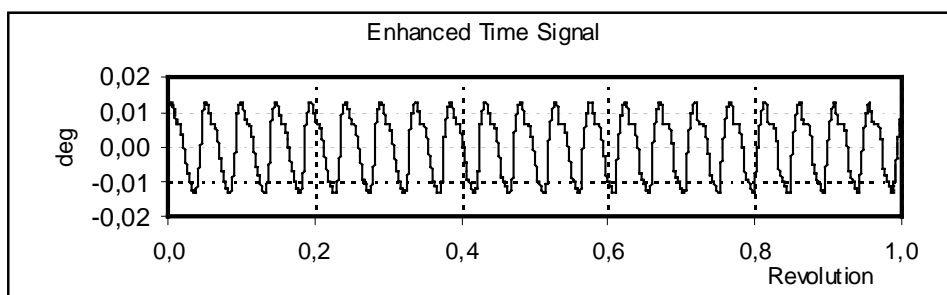
Obr. 11 Spektrum odchylky $\Delta\phi_{44}(t)$ úhlu otočení kola s 44 zuby

Postranní složky ke složkám o zubové frekvenci a jejich harmonickým mají modulační (amplitudový nebo fázový) efekt. Například 5 harmonických složek spektra odchylky úhlu otočení ozubeného kola 21 zubů spolu se třemi postranními složkami na každé straně každé harmonické složky má za jednu otáčku časový průběh znázorněný na obr. 12, který byl vypočten inverzní Fourierovou transformací. V tomto signálu lze již bezpečně spočítat počet period odpovídajících počtu zubů tohoto ozubeného kola.



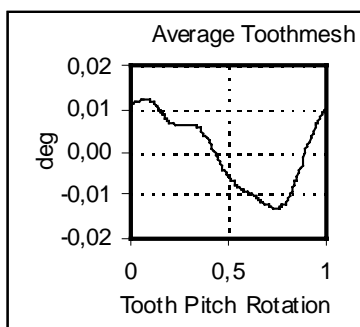
Obr. 12 Časový průběh odchyly úhlu otočení s 5 harmonickými 21 ord včetně tří postranních složek pro každou z nich

Odstraněním modulačních efektů, tj. nulováním všech postranních složek, lze získat časový průběh znázorněný na obr. 13.



Obr. 13 Časový průběh odchyly úhlu otočení s 5 harmonickými 21 ord bez postranních složek pro každou z nich

Výsledek výpočtu je periodický časový průběh odchyly za otáčku, jelikož modulační efekty byly vyloučeny. Počet period je roven počtu zubů, tj. 21. Znáznornit lze tedy pouze jeden úsek $\Delta\Phi(t)$, viz obr. 14, odpovídající otočení o jeden zub, tj. za čas T/n , kde n je počet zubů. Časová osa neobsahuje již měřítko otočení celého kola, ale otočení o jeden zub (Tooth Pitch Rotation). Název grafu zdůrazňuje, že jde o zprůměrovaný signál za časový úsek otočení o jeden zub (Average Toothmesh), který je v tomto případě vztažen na úhlové kmity.

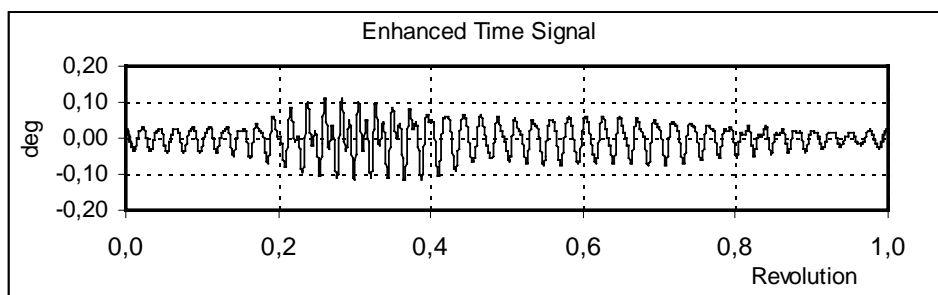


Obr. 14 Jedna perioda časového průběhu odchyly úhlu otočení s 5 harmonickými 21 ord bez postranních složek pro každou z nich

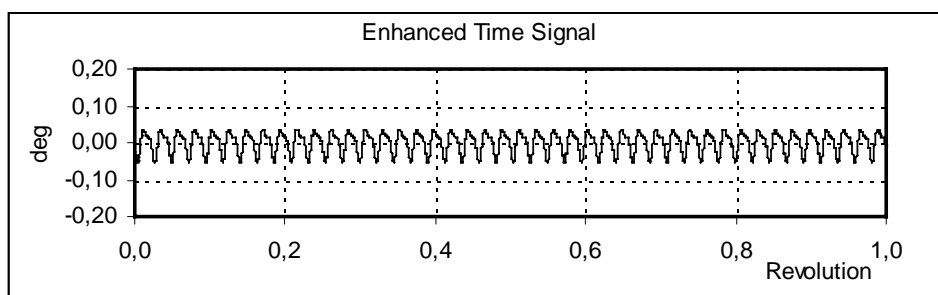
Jinou interpretací této úpravy průběhu odchyly za celou otáčku je výpočet průměrného časového průběhu z dílčích úseků odchyly o shodné době trvání v počtu daném počtem zubů. Tento postup by bylo možné prakticky použít jen v případě, že všechny dílčí úseky každého záznamu by obsahovaly stejný počet vzorků, což by vyžadovalo jejich převzorkování. Úprava spektra představuje efektivnější a jednodušší postu. Na stejném principu je založen postup výpočtu odezvy průměrného zubu.

Shodná prezentace průběhu odchyly úhlu otočení pro ozubené kolo se 44 zuby je na dalších třech obr. 15, 16 a 17. Signály jsou vytvořeny s použitím šesti postranních složek

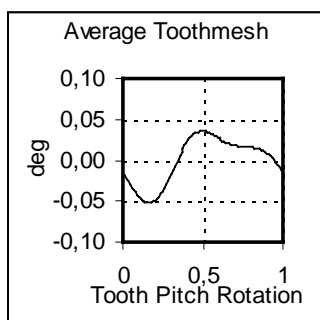
každé harmonické od základní do páté. Relativní počet postranních složek vzhledem k nosné složce je v obou případech shodný.



Obr. 15 Časový průběh odchylky úhlu otočení s 5 harmonickými 44 ord včetně šesti postranních složek pro každou z nich



Obr. 16 Časový průběh odchylky úhlu otočení s 5 harmonickými 44 ord bez postranních složek pro každou z nich



Obr. 17 Jedna perioda časového průběhu odchylky úhlu otočení s 5 harmonickými 44 ord bez postranních složek pro každou z nich

V předcházejících obrázcích jsou znázorněny odchylky úhlu otočení obou ozubených kol za jednu otáčku. Grafy vytvořené z harmonických složek včetně jejich postranních složek ukazují na nepravidelnosti spojené s periodou otáčky těchto ozubených kol. Navíc lze zdůraznit, že se jedná o průměr 100 otáček každého kola. Vzhledem k rozdílnému počtu zubů existuje velké množství možností vzájemného párování obou záznamů. Shodné zuby z obou kol se opakovaně dostanou do kontaktu až po 44 otočeních kola s 21 zuby nebo 21 otočeních kola se 44 zuby. Při meziotočeních obou kol se dostávají do kontaktu jiné dvojice zubů. Toto množství kombinací lze zredukovat, jestliže bude vybrán reprezentativní průběh odchylky otočení pro jeden pár zubů, tj. otočení každého kola o jeden zub. Jde tedy o průběhy označení Average toothmesh na předcházejících obrázcích.

Na závěr této dílčí kapitoly ještě poznámku k efektivní hodnotě odchylek úhlu otočení. Pro kolo s 21 zuby je kolísání úhlu s 5 harmonickými složkami zubové frekvence v efektivní hodnotě (RMS) rovno 0,00868 rad a se 44 zuby rovno 0,0285 rad. Složky spektra chyby snímačů jsou pro frekvence 21 ord a 44 ord nebo jejich harmonické o více než dva řády nižší než jsou změřené hodnoty. Přesnost měření je tedy vyhovující.

Výpočet chyby převodu

Jestliže se obě ozubená kola v záběru otáčejí rovnoměrně, pak kolo s 21 zuby při otočení o jeden zub se otočí o úhel $2\pi/21$ za dobu $T/21$. Druhé kolo se za tutéž dobu otočí o úhel $2\pi/44$. Vzhledem k tomu, poloměry valivých kružnic jsou v poměru r_{21}/r_{44} shodném s poměrem počtu zubů $21/44$, bude délka oblouku na valivých kružnicích shodná

$$O_{21}(t) = r_{21} 2\pi t / 21 = r_{44} 2\pi t / 44 = O_{44}(t)$$

a rozdíl jejich délek tedy nulový. Lineární složku úhlu otočení lze proto ignorovat.

Úhel otočení při nerovnoměrné rychlosti otáčení byl měřen odděleně pro každé ozubené kolo soukolí. Výsledkem fázové demodulace je časový průběh úhlu otočení za dobu otočení každého ozubeného kola o jeden zub. Necht' ozubené kolo s 21 zuby má průběh odchyly označen $\Delta\Phi_{21}(t)$, kde čas t se mění od nuly do $T/21$, kde T je doba otáčky kola s 21 zuby. Časový průběh odchyly kola s 44 zuby necht' je označen $\Delta\Phi_{44}(t)$. Úhel otočení lze přepočítat na délku oblouku na obou valivých kružnicích.

$$O_{21}(t) = r_{21}(2\pi t / 21 + \Delta\Phi_{21}(t)), \quad O_{44}(t) = r_{44}(2\pi t / 44 + \Delta\Phi_{44}(t))$$

Změny délky oblouku lze vyjádřit pomocí následujících vzorců

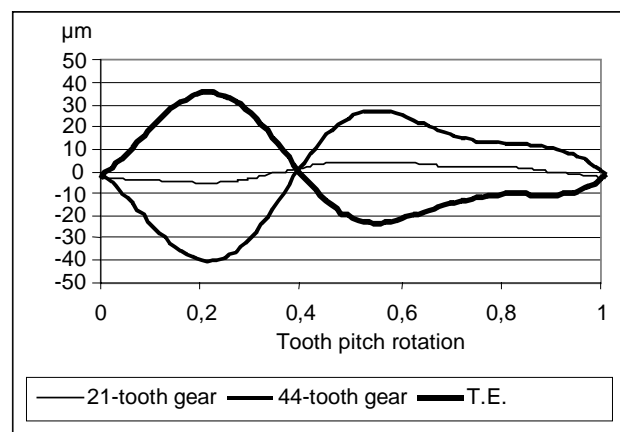
$$\Delta O_{21}(t) = r_{21} \Delta\Phi_{21}(t), \quad \Delta O_{44}(t) = r_{44} \Delta\Phi_{44}(t)$$

Rozdíl délek obou oblouků na valivých kružnicích má význam chyby převodu *TE* (Transmission Error)

$$TE = O_{21}(t) - O_{44}(t) = r_{21} \Delta\Phi_{21}(t) - r_{44} \Delta\Phi_{44}(t).$$

Chyba převodu představuje vzájemné mikropohyby ozubených kol v záběru. Chybu převodu standardně charakterizuje maximum, minimum a efektivní hodnota (RMS) v mikronech. Hladký časový průběh zdůvodňuje použití pouze 5 harmonických s dominující základní harmonickou složkou. U záznamů z obou kol je rozdílný počet vzorků na otočení o jeden zub. Kolu s 21 zuby odpovídá 195 vzorků a kolu s 44 zuby jen 93 vzorků. Pro výpočet rozdílu délek oblouků na valivých kružnicích bylo třeba jeden ze signálů odchyly kolísání úhlu otočení (195 vzorků) převzorkovat na počet vzorků připadajících na otočení o jeden zub druhého kola (93 vzorků). U kola s menším počtem vzorků připadá na složku s největší frekvencí (5. harmonická) $93/5 = 18,6$ vzorků na periodu, a proto k převzorkování postačuje lineární interpolace

Jak již bylo uvedeno, záznam impulsů byl pro každé kolo zvlášť, a proto není jisté, zda začínal ve shodné fázi záběrového cyklu jednoho páru zubů u obou ozubených kol. Ke vzájemné synchronizaci obou záznamů byly použity mnohokrát publikované poznatky o odezvě záběru ozubených kol v časové oblasti [5]. Výsledná chyba převodu v mikronech ze časový úsek pootočení obou kol o jeden zub je na obr. 18.



Obr. 18 Chyba převodu za dobu otočení o jeden zub

Závěr

Referát popisuje postup měření chyby převodu soukolí ozubených kol s využitím fázové demodulace fázově modulovaného signálu. Klíčovým je použití řádového analyzátoru pro záznam signálů za jedno otočení každého ozubeného kola zvlášť. Snímače úhlového natočení byly s počtem impulsů řádově ve stovkách, přičemž bylo prokázáno, že chyby rozložení impulsů byly v jednotkách úhlových sekund. Naměřené hodnoty pro úhlové kmity jsou o dva řády větší než odpovídá pozadí frekvenčního spektra impulsního signálu.

Podle informací z knihy [1] je měření chyby převodu při reálných provozních podmínkách zvládnuto na dvou univerzitách ve Velké Británii a jedné univerzitě v USA. Hodnocení popsaného postupu měření chyby převodu nechává autor k vlastní úvaze čtenáře.

Litertura

- [1] J. Derek Smith: Gear Noise and Vibration, Marcel Dekker, Inc. New York - Basel
- [2] Gregory, R.V. – Harris, S.L. – Munro, R.G.: A method of measuring trnsmission error in spur gears of ratio 1:1. Journal of Scientific Instruments, Vol. 40, pp. 5-9, January 1963.
- [3] Thompson, S.J. – Haigh, J. – Hofmann, D.A. – Rosinski, J. – Pennell, J.A.: A four megawatt test rig for gear noise and vibration research. In: Sborník 1994 International Gearing Conference, 1994 Newcastle, pp.445-452.
- [4] Rosinski, J. – Hofmann, D.A. – Pennell, J.A.: Dynamic transmission error measurements in the time domain in high speed gears. In: Sborník 1994 International Gearing Conference, 1994 Newcastle, pp.363-370.
- [5] Tůma, J.: Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Sdělovací technika, Praha 1997.
- [6] Tůma, J. – Škuta, J.: Posouzení metodiky měření chyby převodu soukolí ozubených kol. In: Sborník z mezinárodní konference technická diagnostika strojů a výrobních zařízení DIAGO 2000, VŠB – TU Ostrava, 2000.

PODĚKOVÁNÍ Výzkum byl proveden na katedře Automatizační techniky a řízení Fakulty strojní, VŠB – Technické univerzity Ostrava jako součást výzkumného záměru No. CEZ J17/98:272300012, který je podporován Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky. Některé poznatky vyplynuly rovněž z práce pro průmyslové podniky, jmenovitě ŠKODA-Auto a.s...