Experimentální Analýza Napětí 2003

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF FORCE ACTING TO THE MACHINE TOOL DURING MACHINING

EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA SÍLY PŮSOBÍCÍ PŘI OBRÁBĚNÍ

Petr Kočí [1]

Abstract

To measure cutting force acting to the machine tool during machining it can be performed with technical difficulties. The paper deals with an indirect method based on acceleration measurements and evaluation of the dynamic compliance using impact excitation and recording a response in acceleration. The dynamic compliance H(jω) is a transfer function referring the acceleration $A(j\omega)$ *of the not rotating tool to the force* $F(j\omega)$ *exited by impact hammer in two perpendicular directions. The compliance is defined as follows.*

$$A(j\omega) = H(j\omega)\ F(j\omega) \qquad (1)$$

Having information about the tool compliance H(jω) and the tool acceleration frequency spectrum it is possible to evaluate the cutting force using the following formula:

$$F(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{H(j\omega)} \qquad (2)$$

The autospectrum of the cutting force is a source to reconstruct its time history.

A computer program using various type filters for evaluation the dumping coefficient at the resonant frequency was created to overcome the missing information about the phase. The principle of the time history estimation is based on the mating of the measured and evaluated frequency spectrum.

Keywords:

Cutting Force, Machine Tool, Dynamic Compliance, Acceleration, Autospectrum

[1] Ing. Petr Kočí, Ph.D.: Katedra ATŘ-352, VŠB - TUO; 17.listopadu 15, Ostrava-Poruba, 708 33, tel.: +420-5-96994223, e-mail: petr.koci@vsb.cz

Úvod

Přímé měření síly při obrábění je technicky obtížně realizovatelné, proto bylo nahrazeno snímáním zrychlení. Dynamickou poddajnost mechanické struktury lze definovat ve tvaru přenosu síly na výchylku. Protože výchylka se přímo neměří, lze snadněji vyhodnotit dynamickou inertanci jako přenos síly na zrychlení. Frekvenční charakteristiku *H(jω)* lze definovat vzorcem:

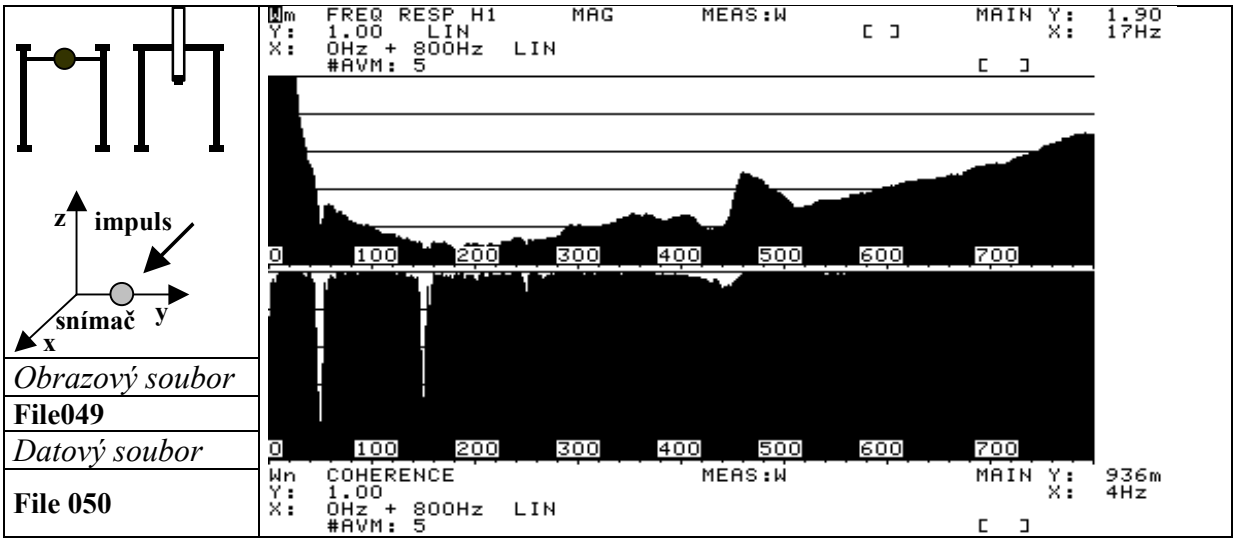
$$A(j\omega) = H(j\omega)\ F(j\omega) \tag{1}$$

Při znalosti frekvenční charakteristiky *H(jω)* lze sílu vypočíst ze vztahu:

$$F(j\omega) = \frac{A(j\omega)}{H(j\omega)} \tag{2}$$

Úpravou získaných výsledků výpočtu spekter síly můžeme přistoupit k rekonstrukci časového průběhu síly při obrábění.

V uvedených vztazích je *A(jω)* zrychlení [m/s^2] a *F* je síla [N]. Inertance *H(jω)* byla měřena vyvozením silového impulsu kladívkem pro modální analýzu. Impuls kladívkem byl veden ve směru osy x a snímání odezvy bylo ve směru osy y. Na následujícím obrázku je průběh magnitudy změřeného souboru.



Obr. 1 Obrazový soubor magnitudy frekvenční charakteristiky H(jω) a koherence

Protože přímé měření síly je technicky obtížně realizovatelné, proto bylo nahrazeno snímáním zrychlení na tubusu. Časový průběh zrychlení nebyl zaznamenán, nahradila jej frekvenční multispektra v efektivních hodnotách.

Poměr autospekter ve výkonových spektrálních hustotách je dán druhou mocninou absolutní hodnoty přenosu. Protože záznamy byly v efektivních hodnotách mezi spektrem síly a zrychlení platí následující vztah.

$$S_A(\omega) = \left|H(j\omega)\right|\ S_F(\omega) \tag{3}$$

Z této rovnice lze neznámé spektrum síly vypočíst podle vzorce.

$$S_F(\omega) = \frac{S_A(\omega)}{|H(j\omega)|} \qquad (4)$$

Pro analýzu spekter sil byl vytvořen program obsahující výběrové filtry pro selekci rezonančních složek. Zaznamenané spektrum zrychlení na tubusu a vypočtené spektrum síly při obrábění neobsahují údaje o počáteční fázi mezi složkami spekter. Tento nedostatek je odstraněn navržením takového časového průběhu síly, jehož spektrum se kryje se spektrem vypočteným ze spektra změřeného pro danou inertanci tubusu.

Na obráběcím centru, na kterém byl zkoumán přenos pohybu z tubusu na pracovní stůl při obrábění, byly změřeny vibrace. Zkušební ocelová deska byla obráběna různými typy fréz. Měření vibrací se uskutečnilo při konstantních otáčkách frézy. Spektra vibrací byla měřena po určitou dobu. Průběžně vyhodnocena spektra vibrací jsou vykreslena ve formě 3D grafu do multispekter ve tvaru „waterfall“. Význam měření spočíval ve stanovení významných složek spektra, které jsou obráběním vybuzeny. Ve spektru se očekávaly zubové (břitové) frekvence frézy, které jsou dány součinem frekvence otáček (v Hz) a počtu břitů frézy. Další složky frekvenčního spektra charakterizující průběh obrábění. Parametry použitých fréz a otáčky při obrábění jsou uvedeny v následující tabulce.

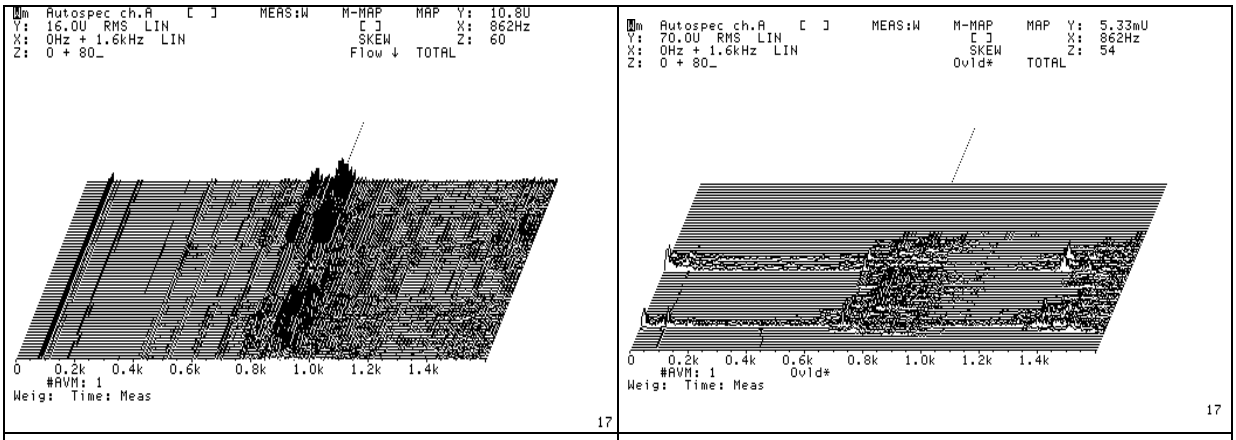
Tab. 1 Přehled fréz a pracovních otáček vřetene frézy

Průměr frézy [mm]	Počet zubů frézy	Otáčky za minutu	Základní frekvence [Hz]	Název souboru
66	6	1400	140	FILE 067, FILE 071
80	7	900	105	FILE 038
80	7	600	58,3	FILE 047
80	7	750	87,5	FILE 049, FILE 052
80	7	560	65,3	FILE 032, FILE 034
80	7	500	58,3	FILE 046
100	6	500	50	FILE 040
100	6	600	60	FILE 044

Cílem měření bylo analyzovat frekvenční spektra sil při obrábění. Na záznamech spekter jsou vidět vybuzené složky spektra o zubové (břitové) frekvenci. Zajímavé je multispektrum souboru *FILE 052*, protože u tohoto záznamu obrábění došlo k výrazné rezonanci doprovázené silným hlukem. Při rezonanci se změnilo spektrální rozložení frekvenčních složek. Zmizely složky spektra s nízkými a vysokými frekvencemi a dominantní složky spektra se zúžily do frekvenčního rozsahu 700 až 1100 Hz.

Buzení vibrací je zřejmě složitý jev, který je třeba experimentálně analyzovat. Uvedené měření bylo prvním pokusem o tuto analýzu.

Na následujících obrázcích jsou záznamy jednotlivých multispekter vibrací na tubusu ve zrychlení. S těmito multispektry se dále v analýzách pracovalo. Z nich byla upřesněna okamžitá rychlost otáčení a frekvenční spektrum síly při obrábění.



FILE049 750 ot/min, fréza 7 zubů, průměr 80 (úběr 5 mm, ocel 12060)	FILE052 750 ot/min, fréza 7 zubů, průměr 80 (úběr 6 mm, ocel 12060)

Obr. 2 Multispektra zrychlení na tubusu při obrábění – u souboru File 052 došlo k rezonanci

Na následujícím obrázku je vidět způsob obrábění zkušební ocelové desky a umístění snímačů zrychlení. Při frézování byla nastavena konstantní rychlost posuvu o velikosti 16 mm/s.



Obr. 3 Umístění snímačů při frézování

Program pro analýzu a zpracování naměřených dat

S využitím předcházejících vztahů byl vytvořen program, který umožňuje aplikovat tyto relace jako výběrový filtr na vypočtená autospektra síly S_F.

Tento program dále umožňuje načíst jednotlivé soubory naměřených dat, provést potřebné výpočtové operace, upravit data výběrovým filtrem a doplnit pomocné značky.

Tím se usnadnilo rozhodování při zjišťování:

- Okamžité rychlosti otáčení frézy (přidáním výběrového filtru).
- Spektra síly při obrábění.

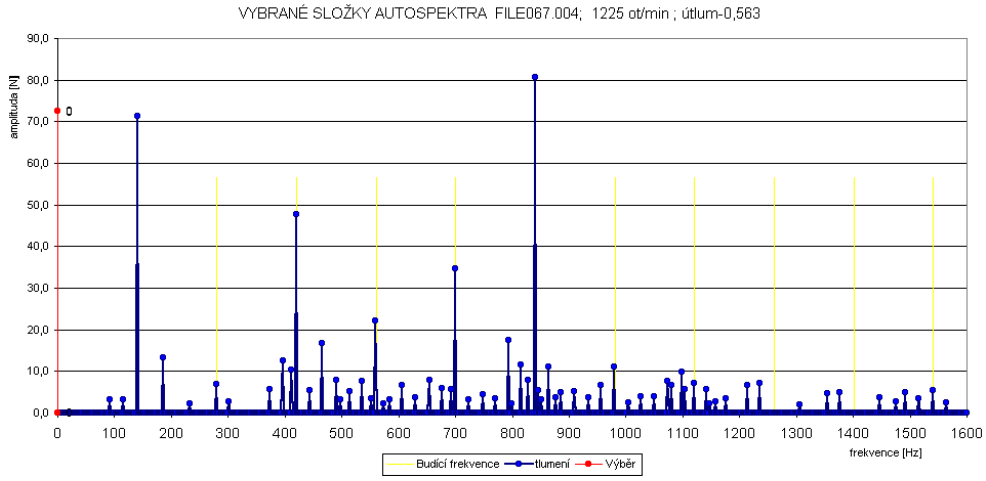
Další úpravou a zpracováním naměřených dat můžeme dostat podklady pro hodnocení:

- Vlivu poddajnosti stroje na vliv obrábění (zařazením do výběru dalšího filtru).
- Nastavení a seřízení servopohonu.

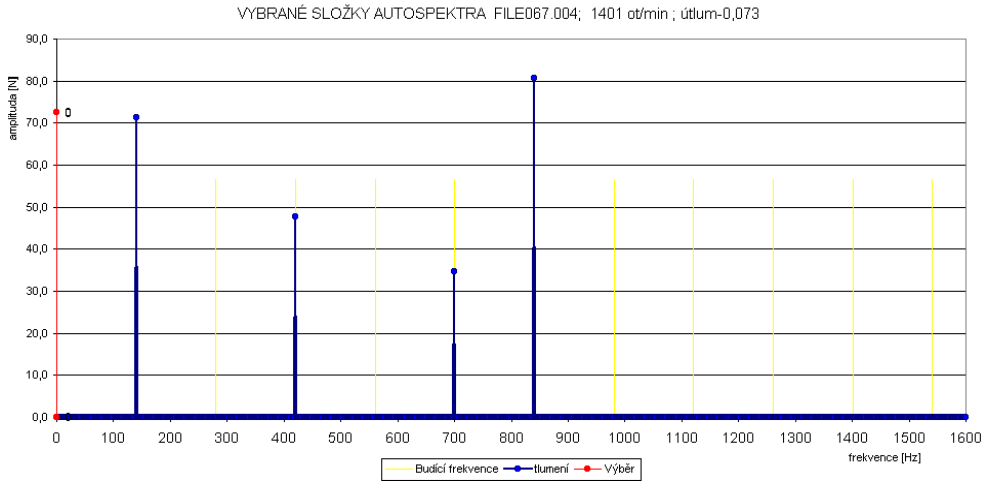
Funkce výběrového filtru složek spektra spočívá v určení lokálních maxim, kterým přísluší součinitel tlumení ξ menší než je zadaná hodnota v mezích od 0 až do 1. Lokální maximum spolu se sousedními složkami je aproximováno dílčí rezonanční křivkou. Lokální maxima se součinitelem tlumení vyšším než zadaná mez a ostatní složky spektra jsou nulovány.

Úpravou autospektra výběrovým filtrem se dosáhlo toho, že v grafu se zobrazily jen vybraná maxima autospektra s tlumením podle zadání.

Budeme-li postupně snižovat hodnotu tlumení ξ, budou ve spektru zůstávat jen významné frekvence. To je zobrazeno na měnících se spektrech v následujících obrázcích, kde jsou zobrazena spektra sil pro různá ξ.



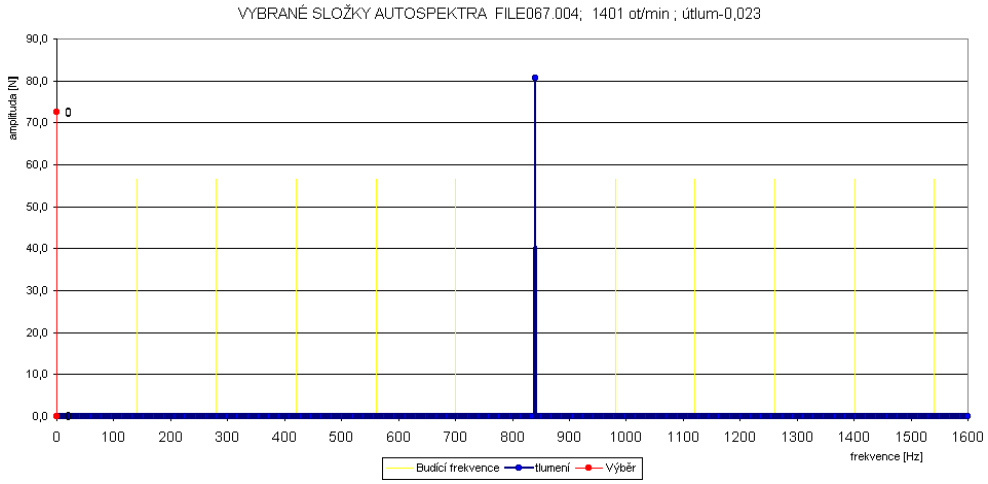
Obr. 4 Měnící se složky spektra sil při tlumení ξ = 0,64



Obr. 5 Složky spektra sil při tlumení ξ = 0,073

Na obr. zůstaly pro danou hodnotu tlumení jen čtyři frekvenční složky. Tyto složky se kryjí s nastavenými otáčkami 1401 ot/min. Z tohoto upraveného spektra dále vyplývá, že při záznamu multispektra obrábění (FILE067), konkrétně při jeho čtvrtém záznamu (FILE067.004), byly otáčky vřetene 1401 ot/min. V tomto autospektru síly je dominantní zubová frekvence a její násobky.

Snížíme-li hodnotu tlumení na $\xi = 0{,}023$, zůstane většinou jediná dominantní frekvenční složka.

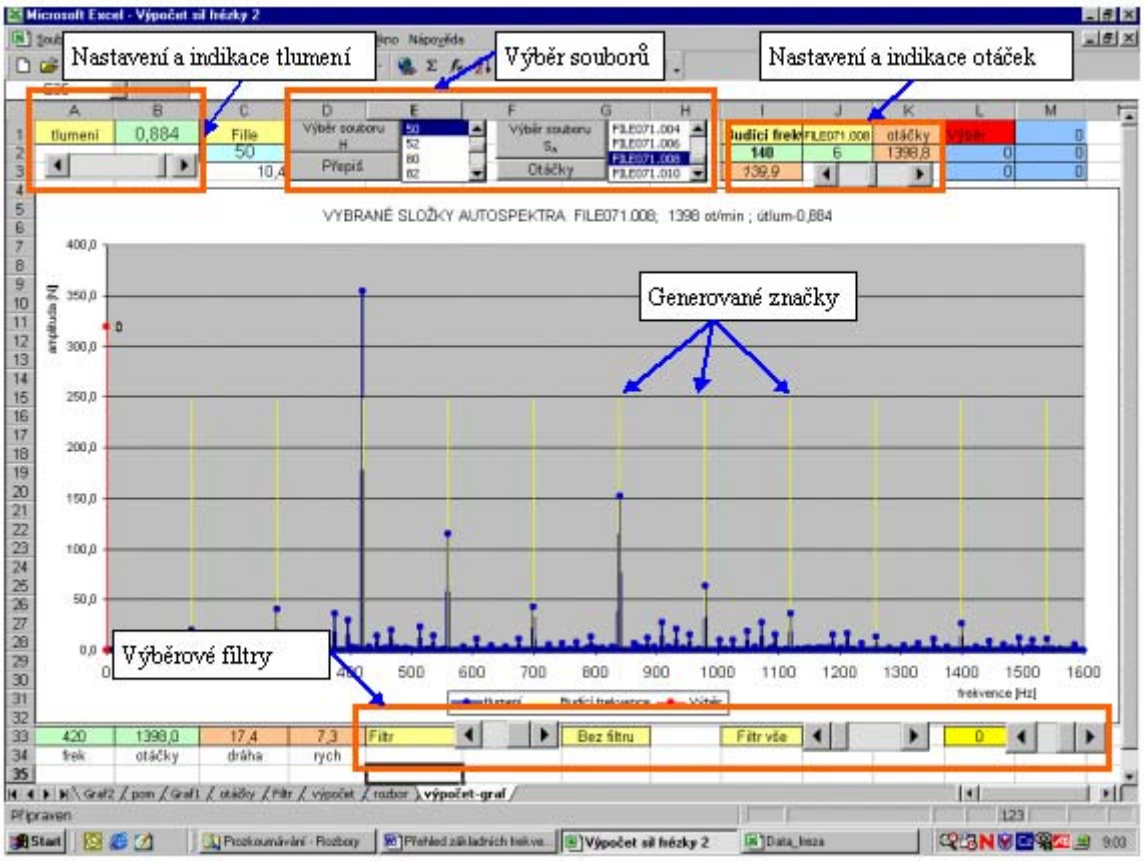


Obr. 6 Složky spektra sil při tlumení ξ = 0,023

Význam této složky by mohl být předmětem dalšího výzkumu. Podle mých předběžných výpočtů by tato složka mohla souviset s mezi kluzu δ_k materiálu.

Program pro analýzu spekter při obrábění byl vytvořen tak, aby umožnil různé způsoby porovnání a výběr naměřených souborů.

Dále je možný výběr frekvencí na základě zvoleného tlumení a zjištění okamžité rychlosti otáčení. Okamžité otáčky určené z frekvence známých složek spektra (zubové frekvence) je třeba chápat jako průměrné otáčky za dobu měření záznamu pro výpočet spektra, která pro zvolený frekvenční rozsah a počet čar spektra je 0,5 s.



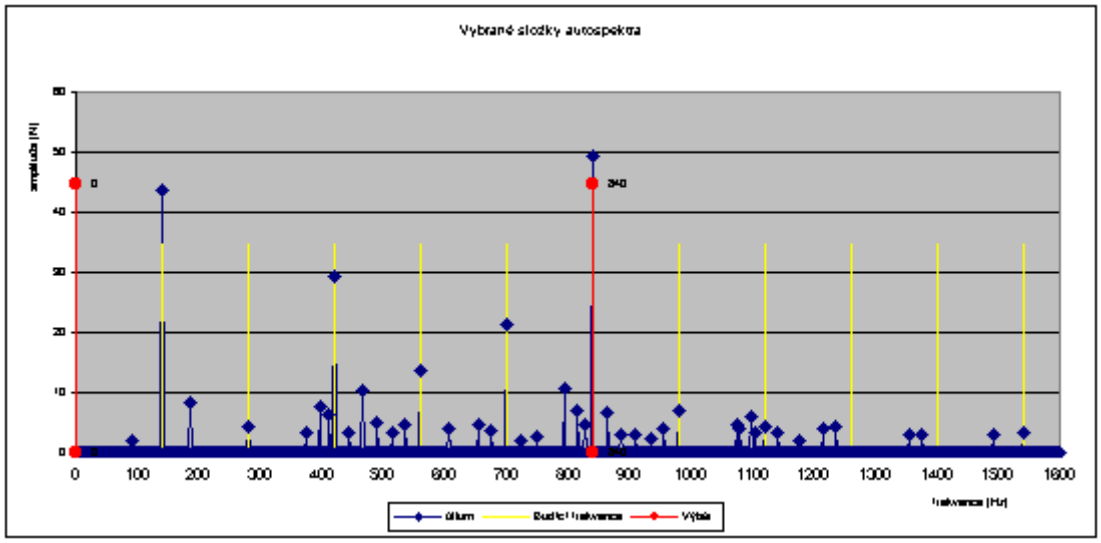
Obr. 7 Okno programu analýzy spekter

Program pro zpracování měření dále umožňuje zařadit i vypnout výběrový filtr, vybrat soubor S_F nebo $H(j\omega)$, výběr frekvencí na základě zvoleného tlumení a zjištění okamžité otáčkové frekvence. Kromě uvedených funkcí obsahuje další možnosti zpracování, které vznikly z potřeby nového přístupu k vyhodnocení naměřených dat.

Změny otáček při obrábění

Rozborem multispektra sil při obrábění můžeme zjistit, jak se otáčky mění během frézování. Abychom zjistili velikost otáček, je potřeba vložit do grafu pomocné značky, znázorňující polohu harmonických složek základní otáčkové frekvence.

Pro zjištění okamžitých otáček při obrábění postupujeme takto. Změníme koeficient tlumení tak, abychom odstranili nevýznamné složky a přestavujeme pomocné značky v grafu tak, aby se kryly s dominantními frekvenčními složkami (v programu se tato činnost děje přestavením posuvníku). Zbylé nenulové složky jsou pak přepsány do tabulky.



Obr. 8 Určení otáček při obrábění

Závěr

Rozborem multispekter při obrábění a při znalosti frekvenčního přenosu obráběcího centra, můžeme zjistit, jaký vliv by mohly mít vlastní frekvence stroje na obrábění. V praxi by to mohlo znamenat, že pracovní režim stroje bude nastaven tak, aby se příliš nebudily vlastní frekvence stroje. Z dlouhodobého hlediska je možné při periodickém měření (např. každý rok) zjistit, jak se mění tuhost stroje. Bude-li záznamů více od různých strojů, je možné stroje navzájem porovnat a ohodnotit.

Dalším zajímavým údajem jsou otáčky při obrábění a jejich změna. Změna otáček při obrábění může souviset s nastavením regulační smyčky servopohonu, kvalitou nástroje případně zvoleným pracovním režimem.

Literatura

KOČÍ, P. *Machining* accurrary changes influenced by machine vibration. In *Proceedings of International Scientific Conference of FME, Session 4: Automation Control and Applied Informatics. [online]*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2000, vol. 10, 6 p. [cited 2000-09-05]. ISBN 80-7078-798-8.

KOČÍ, P. *Diagnostics* of Machine Tools Dynamic Properties. In *Proceedings of 3rd International Carpathian Control Conference. Ostrava* : VŠB-TU Ostrava, 27. - 30. 5. 2002, ISBN 80-248-0089-6.

TŮMA, J. & KOČÍ, P. Modal Analysis and Vibrations of the Horizontal Machining Centre. In *Science Report Project PL-A Geometrical Surface Structure of Machine Parts. 1st ed. Kielce (Poland) : Wydavnictvo Politechniki Swietokrzyskiej*, 2001. pp. 223-230. ISBN 83-911200-8-2.

KOČÍ, P. Tvary kmitů vřetene obráběcího stroje. In *Proceedings of XXVI. Seminar ASR '2001 "Instruments and Control". Ostrava* : VŠB-TU Ostrava, 2001, Paper 31, pp. 1 - 10. ISBN 80-7078-890-9.