

# Samobuzené kmitání v obráběcích strojích

Autor: Ing. Jiří Drobílek, školitel: Doc. Ing. Pavel Bach, CSc., školitel specialista: Ing. Miroslav Janota, Ph.D.

## 1. Úvod

Při obrábění se mohou v některých případech objevit nežádoucí kmity. Během řezu se nástroj pro určité řezné podmínky samovolně rozkmitává a to i bez zásahu vnější budící síly. Tento jev je znám jako samobuzené kmitání a velmi výrazně ovlivňuje produktivitu obrábění, jakost povrchu vyráběných dílců, trvanlivost nástrojů a životnost komponent obráběcího stroje. Výzkum samobuzeného kmitání probíhá již několik desetiletí a přesto se stále nedaří spolehlivě predikovat mezní podmínky mezi stabilním a nestabilním obráběním natolik přesně, aby bylo možné výrazně zvýšit produktivitu obrábění jak v kusové tak velkosériové výrobě. Pro výpočet mezních podmínek se od 50. let minulého století používá model dynamické řezné síly, který je tím nejjednodušším popisem toho, co se v dynamickém řezu skutečně děje. Výsledky výzkumu z posledních naznačují, že pro přesnější určení mezních podmínek obrábění je potřeba vyjádřit s větší přesností nejen kmitavý systém obráběcího ale i působící řezné síly.

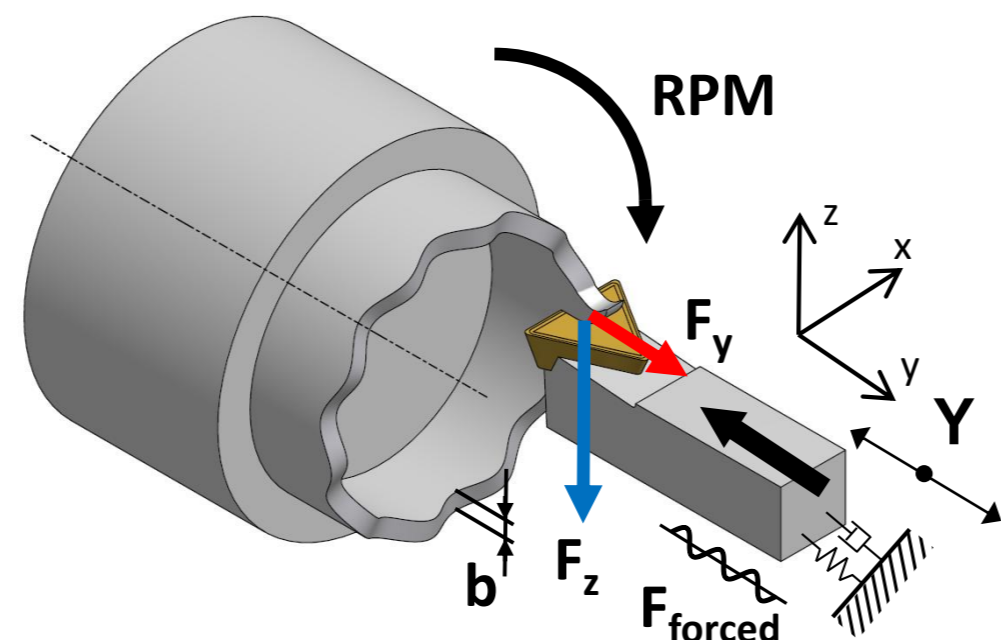
## 2. Cíle disertační práce

Hlavním cílem disertační práce je zpřesnění predikce podmínek stabilního obrábění. Dílčí cíle disertační práce lze shrnout do následujících bodů:

1. Rozšíření metody řízeného rozkmitávání nože pro úplnou identifikaci řezných sil v dynamickém řezném procesu.
2. Nalezení nových fenoménů v dynamickém řezném procesu pomocí rozšířené metody řízeného rozkmitávání nože.
3. Zpřesnění modelu pro popis dynamické řezné síly.
4. Experimentální ověření nového modelu řezné síly při určování meze stability.

## 3. Rozšíření metody řízeného rozkmitávání nože

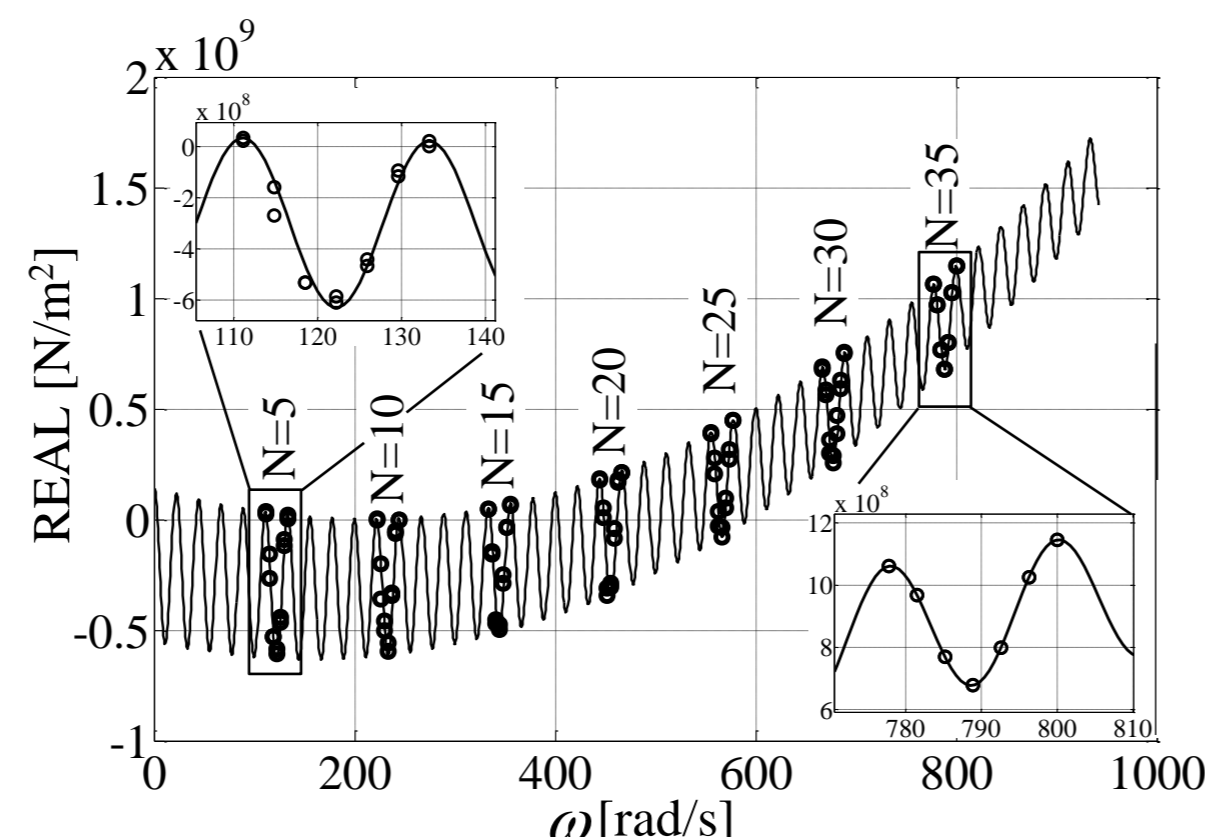
Metoda řízeného rozkmitávání nože byla vyvinuta v 50. letech minulého století v ČR. Základem metody je řízené rozkmitávání nástroje během řezu jako simulace mezních podmínek stability řezu. Přesnost získaných výsledků byla velmi ovlivněna technickými možnostmi dané doby a navíc nepříznivě společenské prostředí následujících let omezovalo další rozvoj této metody. I přes tato omezení se pomocí ní podařilo poukázat na výrazné rozdíly mezi statickým a dynamickým řezem. Při dynamickém řezném procesu totiž vznikají síly, které způsobují relativní pohyb mezi nástrojem a obrobkem. S využitím současných teoretických a technických možností bylo možné rozšířit tuto metodu pro spojitě sledování chování dynamického řezného procesu. Rozšíření metody umožní sledovat i vliv dalších zúčastněných parametrů na chování řezného procesu, které nebyly doposud zohledněny. Především se jedná o vliv frekvence. Původní metoda vyhodnocovala parametry řezu pouze pomocí několika diskretních bodů a vliv frekvence neuvvažovala. Rozšířená metoda umožní rovnoměrně rozložit měřicí body potřebné pro sledování řezného procesu. Metodika zpracování signálu dále umožní vyloučit z měření nežádoucí jevy ovlivňující interpretaci získaných závěrů.



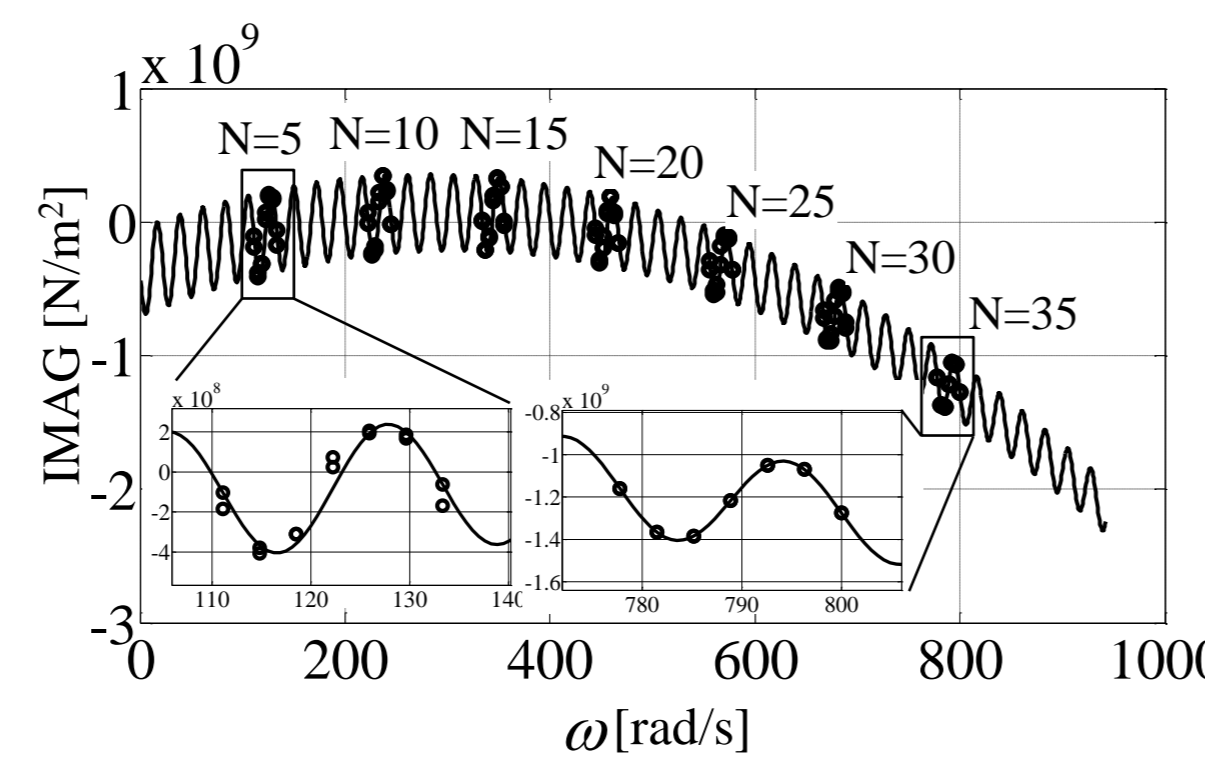
Obr. 1: Princip metody řízeného rozkmitávání nože, vč. sledovaných signálů dynamického řezného procesu

## 4. Nalezení nových fenoménů v dynamickém řezném procesu

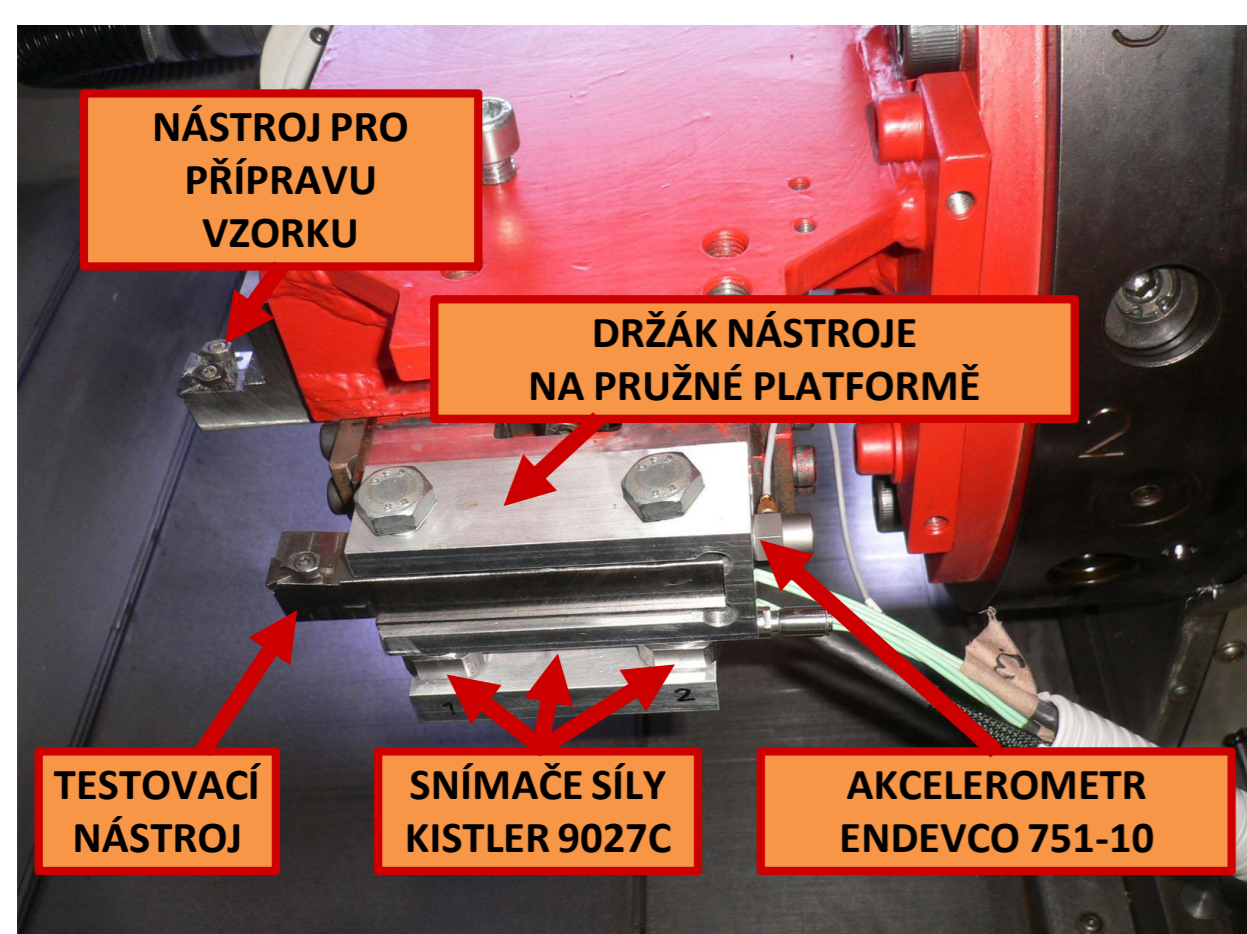
Současný model dynamické řezné síly zahrnuje sílu od kmitání nástroje, sílu od seřezávání vln a sílu od procesního tlumení. Bylo prokázáno, že tyto síly v dynamickém řezu existují současně a vznikají kvůli relativnímu kmitání mezi nástrojem a obrobkem. Jejich existenci a vzájemnou interakci je však velmi obtížné sledovat, protože měřením lze získat pouze výslednice těchto sil ve dvou na sebe kolmých směrech. Rozšířená metoda řízeného rozkmitávání nože umožnila sledovat závislost řezného procesu i na frekvenci kmitání, čímž se zlepšila schopnost rozlišení jednotlivých sil a navíc se podařilo také dokázat, že vznikající řezné síly vykazují nově oproti současně představené vůči kmitání i fázové posunutí. Ze získaných výsledků jednoznačně vyplývá, že frekvence kmitání výrazně ovlivňuje síly vznikající ve směru normály k obráběnému povrchu. Toto chování lze přisoudit existenci alespoň jedné další síly, která má směr normály a její vznik souvisí s odřezáváním vln. Tato síla působí proti dosud uvažované síle od seřezávání vln a pro určité frekvence kmitání je dokonce schopna tato síla zcela potlačit její účinek. Tato skutečnost významně ovlivňuje použití součinitelů reprezentující řezný proces, které se dnes pro určování mezních podmínek obrábění používají. Současný model síly sdílí stejný součinitel jak pro sílu od kmitání nástroje tak pro sílu od seřezávání vln. S ohledem na nově nalezené jevy je nutné použít komplexní součinitele navzájem různé a navíc i frekvenčně závislé.



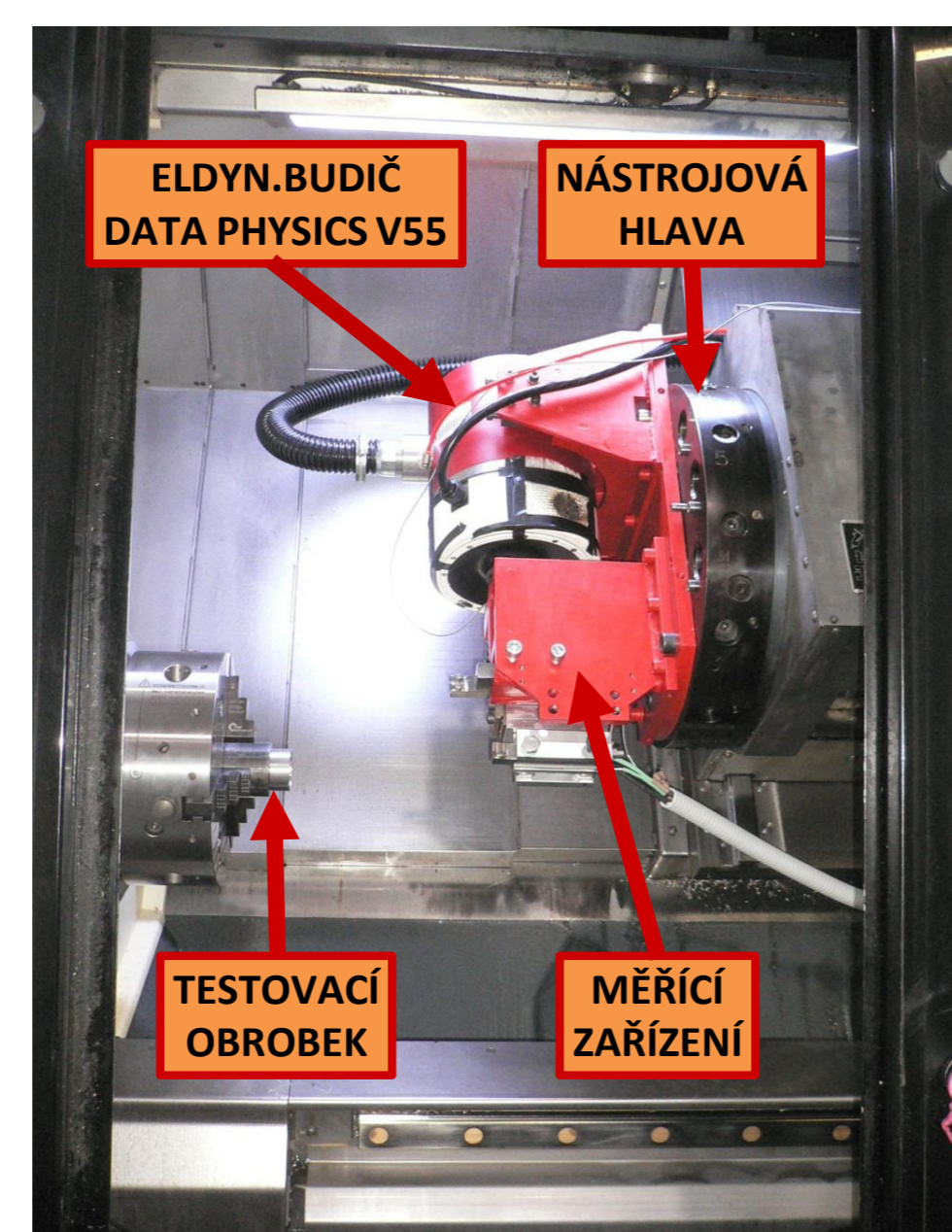
Obr. 2: Průběh reálné části řezného odporu



Obr. 3: Průběh imaginární části řezného odporu



Obr. 4: Rozmístění měřicí senzory testovacího nástroje.



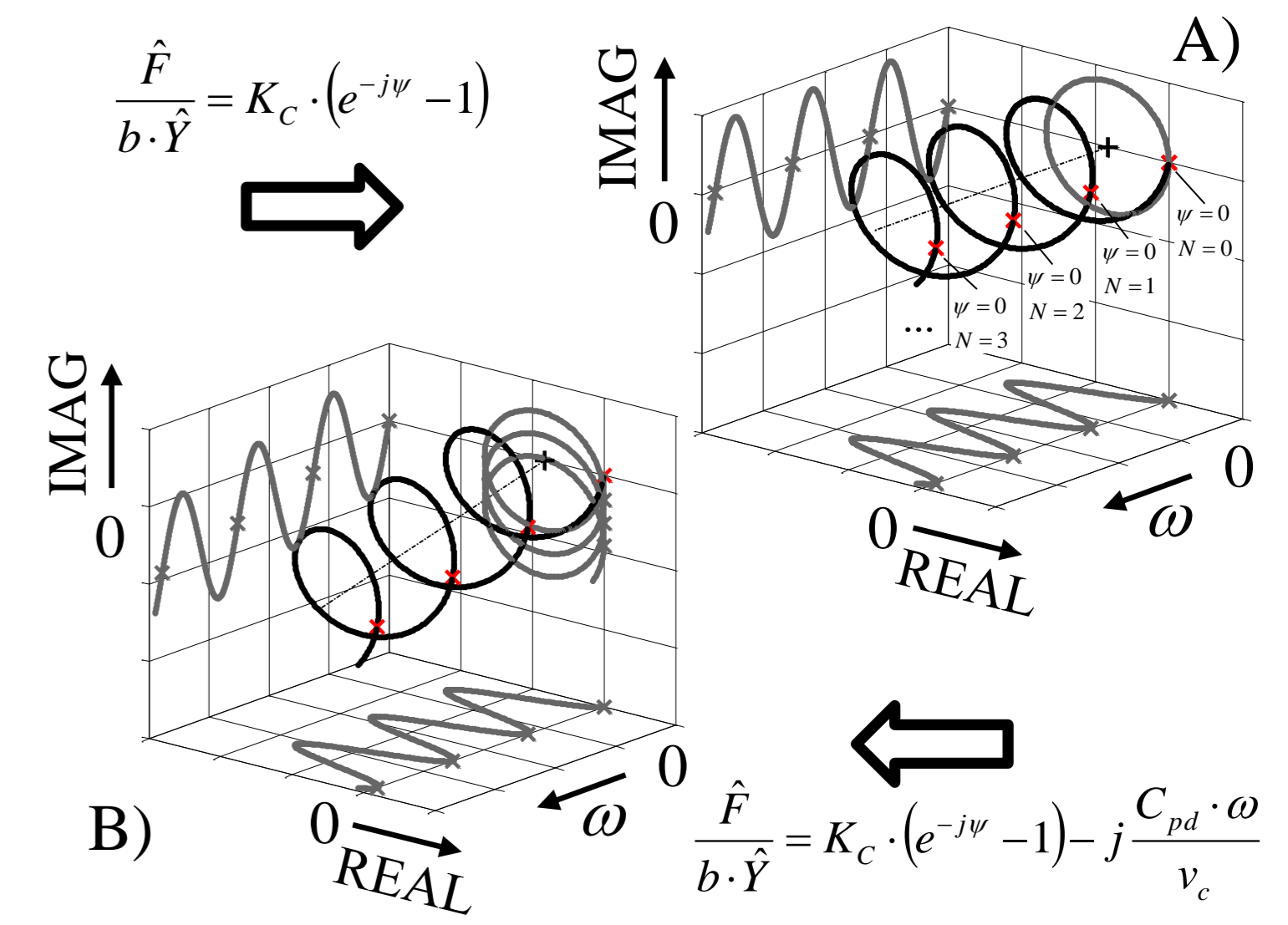
Obr. 5: Základní části experimentálního zařízení pro sledování řezného procesu

## 5. Zpřesnění modelu pro popis dynamické řezné síly

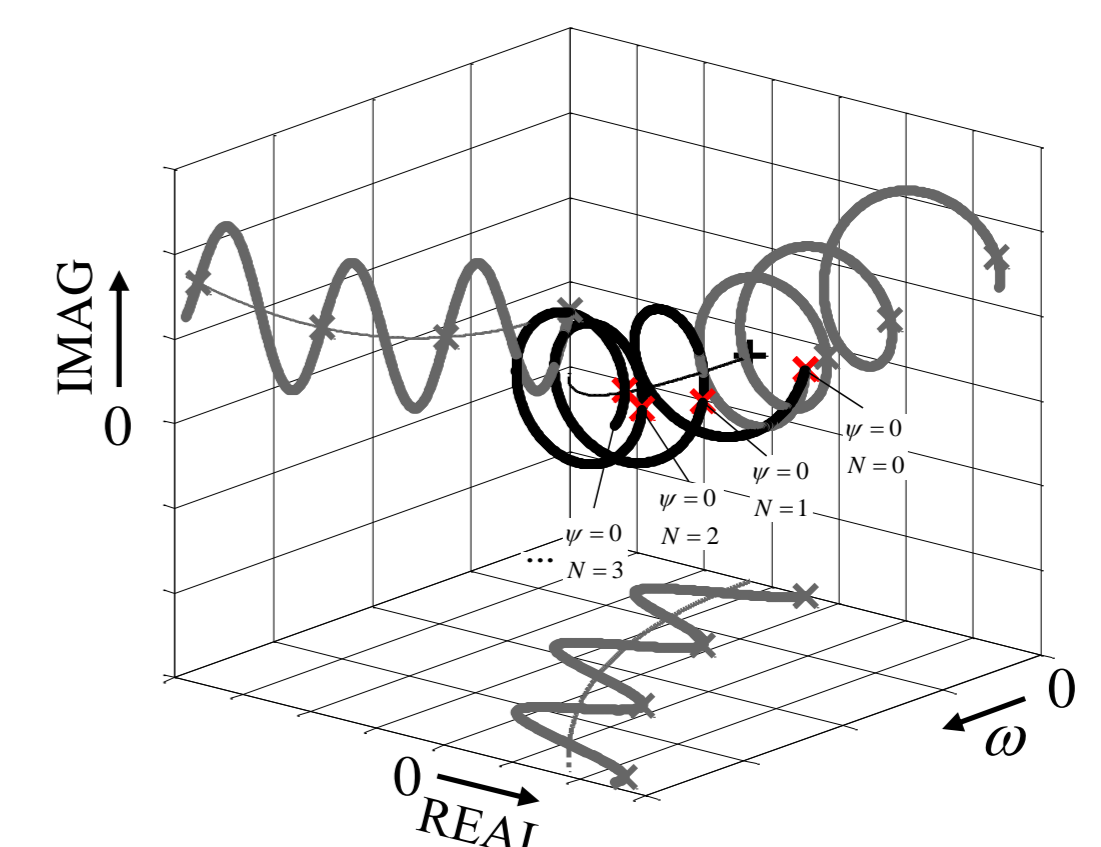
Původní metoda řízeného rozkmitávání nože využívala pro identifikaci potřebných parametrů aproximaci kružnic. Z nově naměřených frekvenčních závislostí se však ukázalo, že pro určení těchto parametrů je vhodnější použití šroubovice. S ohledem na nalezené fázové posuvy, je nutno uvažovat i komplexnost součinitele řezné síly.

Získaná data lze pro účely výpočtu aproximovat vhodným empirickým modelem. Vizualně byly v naměřených průmětech identifikovány dvě funkce. Funkce periodická a funkce, která má rostoucí nebo klesající trend. Pro určení technologických podmínek meze stabilního řezu potřebujeme nahradit lokální identifikované body spojitým průběhem. Z využitím současných teoretických znalostí byl nalezen výraz, který popisuje nově změřené frekvenční chování s dostatečnou přesností.

Základem zpřesněného modelu je dosavadní model dynamické řezné síly avšak rozšířený tak, aby respektoval útlum amplitudy periodického chování a nelineární růst nebo pokles výsledné dynamické řezné síly. Pro popis střední čáry šroubovice vyjadřující sílu procesního tlumení dostatečně vyhovuje aproximace druhého řádu. Prezentovaný zpřesněný model nahrazuje řezný proces dvěma dynamickými silami působícími ve směru tečny a normály k obráběnému povrchu.



Obr. 6: Průběh frekvenční závislosti současného modelu A) bez procesního tlumení, B) s procesním tlumením



Obr. 7: Průběh frekvenční závislosti zpřesněného modelu

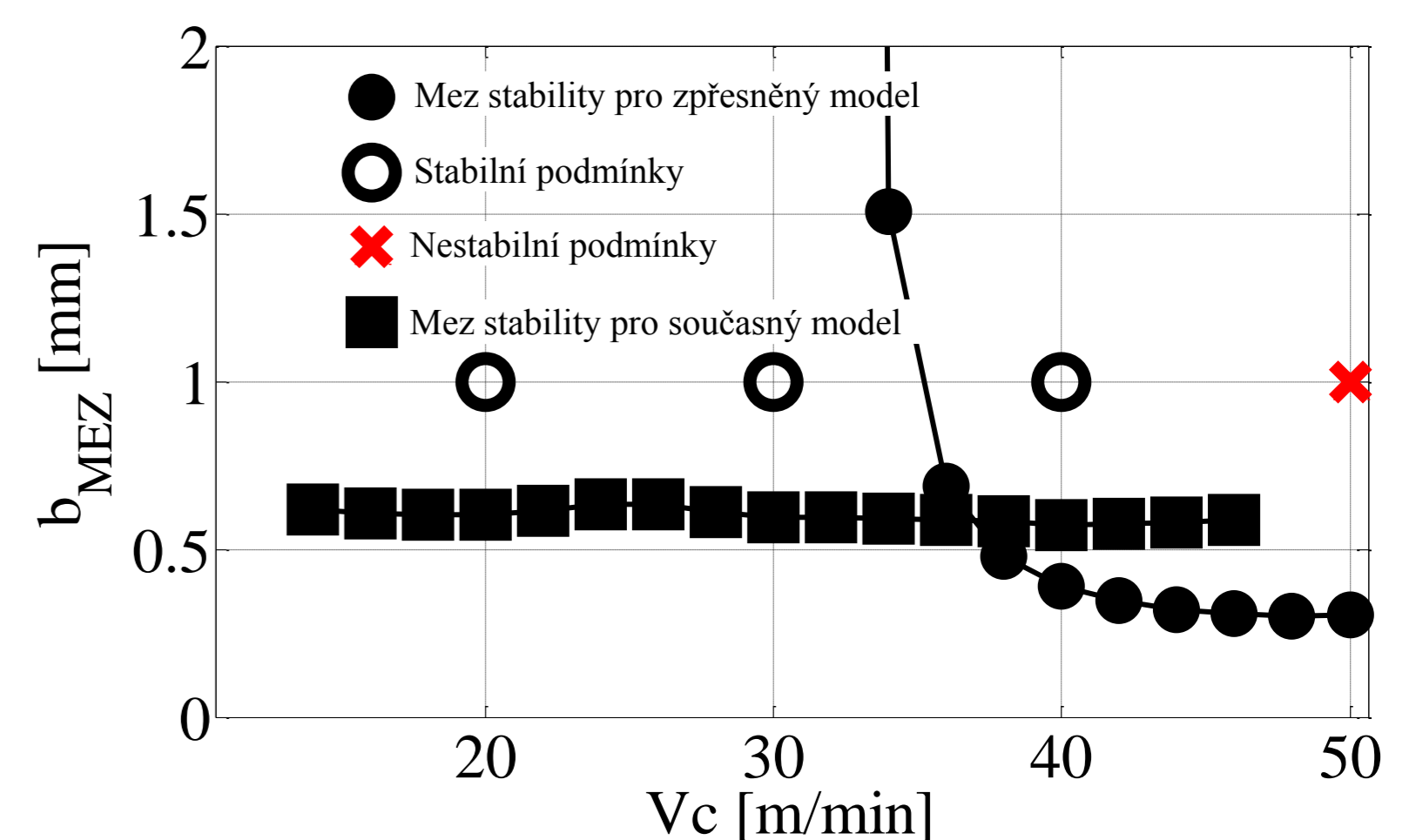
$$re(\hat{K}_{y,z}) = D_0 + \left[ D_1 - \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \cdot D_2 \cdot \omega \right] \cdot [\cos(-\psi) - 1] + \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \cdot D_3 \cdot \omega + \left( \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \right)^2 \cdot D_4 \cdot \omega^2$$

$$im(\hat{K}_{y,z}) = D_5 + \left[ D_6 - \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \cdot D_7 \cdot \omega \right] \cdot \sin(-\psi) + \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \cdot D_8 \cdot \omega + \left( \frac{60}{2\pi \cdot v_c} \right)^2 \cdot D_9 \cdot \omega^2$$

Obr. 8: Zpřesněný součinitel dynamické řezné síly

## 6. Experimentální ověření nového modelu řezné síly při určování meze stability obrábění

Určení mezních podmínek obrábění bylo provedeno pro kmitavý systém měřicího zařízení, který obsahoval dva tvary kmitu. Vlastní frekvence náležely pružnému členu měřicího zařízení. Směr kmitání pružného systému byl orientován ve směru normály k obráběnému povrchu. Parametry pro současný model dynamické řezné síly byly stanoveny konvenčním postupem ze statických zkoušek obrábění pro testovanou geometrii nástroje, tvar obrobku a druh obráběného materiálu. Přesnost predikce obou modelů byla porovnána s experimentálně zjištěnými podmínkami obrábění pro šířku řezu 1 mm a rozsah řezných rychlostí 20 – 50 m/min. Zpřesněný model řezné síly indikuje s klesající řeznou rychlostí výrazný nelineární nárůst meze stability oproti standardnímu modelu s procesním tlumením. Toto chování je v souladu s všeobecně pozorovanými vlastnostmi řezného procesu. Standardní model pro testovaný rozsah řezných rychlostí naopak vykazuje pouze rovnoměrný průběh. Jak ukazuje experimentální ověření, zpřesněný model respektuje chování dynamického řezného procesu, avšak oproti skutečným hodnotám stabilních podmínek se stále ještě liší. Určení reálné hranice mezi stabilními a nestabilními podmínkami je však samo o sobě velmi problematické. Přesnost určení je ovlivněna celou řadou faktorů, jejichž nahodilá změna ovlivní aktuální podmínky řezného procesu. Zjištěné odchylky budou cílem dalšího výzkumu.



Obr. 9: Porovnání experimentální meze stability s predikcí modelu

## 7. Závěr a diskuse

Výsledkem této práce je rozšířená metoda řízeného rozkmitávání nože, která umožní spojitě sledovat děje v dynamickém řezném procesu. S pomocí této metody byly v dynamickém řezném procesu objeveny nové fenomény, které byly doposud neznámé. Byl nalezen zpřesněný model dynamické síly, který velmi přesně popisuje chování reálného dynamického řezného procesu při nízkých řezných rychlostech a s jehož pomocí lze určit i chování síly procesního tlumení. Experimentem bylo potvrzeno, že dynamický řezný proces závisí nejen na řezné rychlosti, ale také na frekvenci kmitání. Cílem dalšího výzkumu by měla být přesnější identifikace nově objevené síly, rozšíření oblasti testovaných frekvencí a technologických podmínek o jiné geometrie nástroje a druhy obráběného materiálu. Výsledky provedených experimentů jasně dokazují, že není vhodné používat pro určování mezních podmínek obrábění parametry získané ze statického řezného procesu. Prezentovaná rozšířená metoda řízeného rozkmitávání nože je vhodný způsob, jak získat potřebné informace právě z dynamického řezného procesu. S ohledem na současné znalosti o dynamickém řezu není možné vyjádřit matematicky natolik přesně model dynamické síly, aby bylo možné dobře určit podmínky stabilního obrábění.

## 8. Vybrané publikace autora

- [1] DROBÍLEK, J., et. al. Dynamic Cutting Forces. Elsevier, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018. Přijato k uveřejnění.
- [2] DROBÍLEK, J., et. al. A method of identification of complex cutting forces acting in unstable cutting process. J.E. Purkyně University, Faculty of Production Technology and Management, Journal of Manufacturing Technology, March 2014, vol. 14, no. 1, s. 3-8. ISSN 1213-2489.
- [3] DROBÍLEK, J. Dynamic forces in unstable cut in turning. In Proceedings of the Student's Conference STC 2014, Praha: ČVUT Praha, 2014. ISBN 978-80-01-05484-0.

Výsledky výzkumu byly získány za finančního příspěví Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci grantu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS13/190/OHK2/3T/12 v letech 2013 – 2015 a za finanční podpory Technologické agentury České republiky v rámci projektu Center kompetence TE01020075 od roku 2015.