FAKULTA STROJNÍ ČVUT V PRAZE

ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE

Predikce silových parametrů řezného procesu při frézování

autor: Ing. Jaroslav Kovalčík, školitel: prof. Dr. Ing. František Holešovský, školitel specialista: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

Úvod a cíle disertační práce

Práce je zaměřena na vytvoření a ověření matematického modelu pro predikci silových parametrů a zatížení vřetene obráběcího stroje při frézování frézovacími hlavami a na vytvoření softwarové aplikace na základě navrženého modelu, která pomůže technologům v praxi správně volit vhodné typy nástrojů, operací, strojů a rychle stanovovat hlavní parametry řezného procesu, a která bude oproti již existujícím softwarovým produktům přesnější a univerzálnější. Jednotlivé kroky ke splnění tohoto hlavního cíle jsou:

1. Vlastní návrh matematického modelu pro predikci silových parametrů při frézování frézovacími hlavami
Vytvoření matematického modelu pro predikci silových parametrů pro různé strategie frézování frézovacími hlavami (do plného materiálu, čelní symetrické a nesymetrické, boční) aplikovatelný pro různé řezné podmínky a nástroje s různou geometrií, tj. VBD kruhového a nekruhového tvaru (čtvercové, trojúhelníkové), uvažování poloměru špičky u VBD nekruhového tvaru, uvažování úhlu nastavení.

2. Získání materiálových konstant pro navržený matematický model
Návrh metodiky pro získání materiálových konstant nezbytných pro navržený model. Na základě navržené metodiky získat pomocí experimentálních měření materiálové konstanty pro tři vybrané materiály.

3. Ověření navrženého matematického modelu
Ověřit navržený matematický model řezné síly na 1 zub frézovacího nástroje, a to porovnáním vypočtených a experimentálních hodnot řezných sil.

4. Zobecnění navrženého matematického modelu a jeho ověření
Zobecnit navržený matematický model řezné síly tak, aby byl aplikovatelný pro nástroje s různou geometrií (nástroje s různou hodnotou nástrojového ortogonálního úhlu čela). Následně ověřit zobecněný model řezné síly za otáčku pro 1 zub a plně osazený nástroj, a to pomocí experimentálních měření.

5. Zpřesnění navrženého matematického modelu o vliv opotřebení
Pro vybraný materiál zpřesnit navržený matematický model řezné síly o vliv opotřebení břitu řezné hrany.

6. Vytvoření softwarové aplikace pro predikci silových parametrů při frézování
Vytvořit softwarovou aplikaci, která bude pomocí implementovaného matematického modelu predikovat silové parametry a zatížení vřetene při frézování.

1. Vlastní návrh matematického modelu

Odvození matematického modelu vychází z obrázku vpravo, kde je plocha odřezávané vrstvy pro aktuální úhel záběru (červeně vyšrafovaná).

Pro VBD nekruhového tvaru, kdy se obrábí pouze zaoblenou řeznou hranou a pro VBD kruhového tvaru platí vztahy:

$$A_D(\varphi) = f_z \cdot \sin\varphi \cdot R \cdot (\cos\theta_{st} - \cos\theta_{ex})$$

$$b_D = R \cdot (\theta_{ex} - \theta_{st})$$

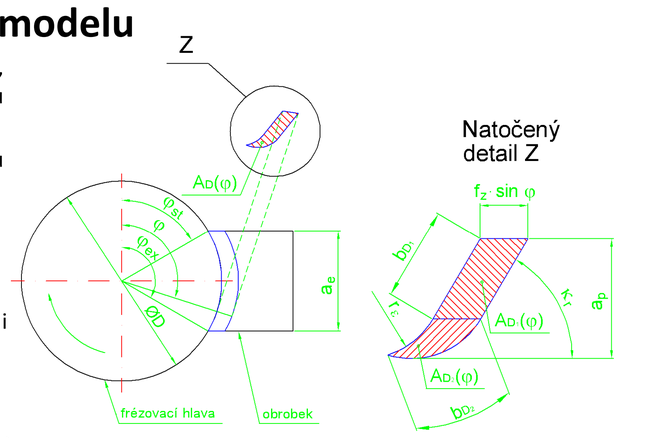
kde:
R = r_ε (VBD nekruhového tvaru)
R = $D_d/2$ (VBD kruhového tvaru)

Pro VBD nekruhového tvaru, kdy se obrábí rovnou i zaoblenou řeznou hranou platí vztahy:

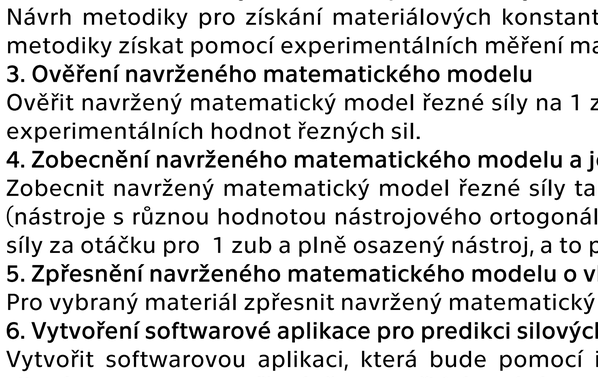
$$A_D(\varphi) = f_z \cdot \sin\varphi \cdot \left[a_p - R \cdot (1 - \cos\kappa_r) + R \cdot (\cos\theta_{st} - \cos\theta_{ex})\right]$$ kde: R = r_ε

$$b_D = \frac{a_p - R \cdot (1 - \cos\kappa_r)}{\sin\kappa_r} + R \cdot (\theta_{ex} - \theta_{st})$$

Platí pro: $a_p > R \cdot (1 - \cos\kappa_r)$



Plocha odřezávané vrstvy pro aktuální úhel záběru.



Průběh aktuální hodnoty řezné síly (modrá křivka) a řezné síly na 1 zub frézovacího nástroje (červená křivka) v čase jedné otáčky pro frézování do plného materiálu (ae=D) se třemi zuby v záběru.

Vztah pro výpočet střední hodnoty řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje (modrá čára vpravo):

$$\bar{f} = \frac{1}{b-a}\int_a^b f(x)\,dx \rightarrow F_{c_{m1z}} = \frac{1}{\varphi_{ex} - \varphi_{st}}\int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} F_{c1z}(\varphi)\,d\varphi$$

Vztah pro výpočet střední hodnoty řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje po dosazení aktuální hodnoty řezné síly na 1 zub frézovacího nástroje:

$$F_{c_{m1z}} = \frac{k_{c1.1}\left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{v_c}} b_D}{\varphi_{záb}} \int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} h_D(\varphi)^{1-m_c}\,d\varphi$$

Vztah pro výpočet střední hodnoty řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru:

$$F_{c_m} = \frac{k_{c1.1}\cdot\left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{v_c}} \cdot b_D \cdot N}{2\cdot\pi} \cdot \int_{\varphi_{st}}^{\varphi_{ex}} h_D(\varphi)^{1-m_c}\,d\varphi$$

Vztah pro výpočet aktuální tloušťky odřezávané vrstvy:

$$h_D(\varphi) = \frac{A_D(\varphi)}{b_D}$$

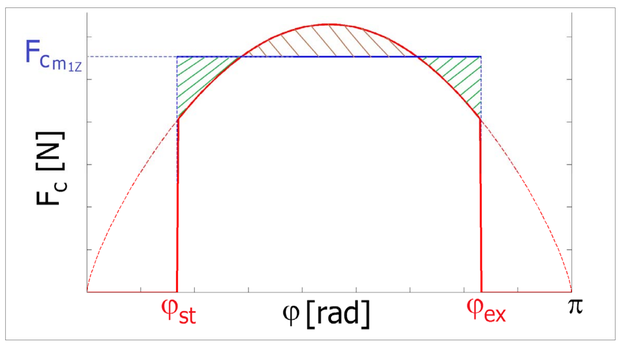
Pro výpočet aktuální hodnoty měrné řezné síly navrhuji vztah s vlivem řezné rychlosti:

$$k_c(\varphi_i(\varphi)) = k_{c_{1.1}} \cdot h_D(\varphi_i(\varphi))^{-m_c} \cdot \left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{v_c}}$$

Vztah pro výpočet aktuální hodnoty řezné síly na 1 zub frézovacího nástroje (červená křivka na obrázku vlevo):

$$F_{c1z}(\varphi_i(\varphi)) = k_{c_{1.1}} \cdot h_D(\varphi_i(\varphi))^{1-m_c} \cdot \left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{v_c}} \cdot b_D$$

Vztah pro výpočet aktuální hodnoty celkové řezné síly (modrá křivka na obrázku vlevo): $F_c(\varphi) = \sum_{i=1}^{z_e} F_{c1z}(\varphi_i(\varphi))$

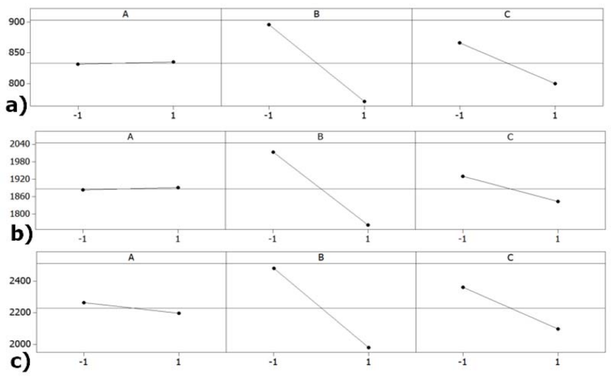


Průběh aktuální hodnoty řezné síly na 1 břit frézovacího nástroje (tučná červená) a střední hodnota řezné síly za záběr pro 1 břit frézovacího nástroje (modrá).

2. Získání materiálových konstant pro vybrané materiály

Pro navržený matematický model bylo nyní nutno získat materiálové konstanty ($k_{c1.1}$, m_c, m_{vc}). Vybranými materiály, pro které měly být určeny materiálové konstanty, byly tři: hliníková slitina EN AW 7075, titanová slitina Ti6Al4V a ocel DIN C45.

Pro získání materiálových konstant u těchto tří materiálů obrobku bylo nejprve nutno navrhnout experimenty. Aby bylo možné sestavit matematický model, který by byl aplikovatelný pro nástroje s různou geometrií, respektive s různým poloměrem špičky, bylo přikročeno k frézování obrobku bez vlivu poloměru špičky. Za tím účelem byl navržen vzorek, kterým byla destička obdélníkového průřezu o různých tloušťkách vzorku. Pro realizaci frézování navržených vzorků byl navržen a vyroben přípravek, který byl upnut na dynamometru, viz obrázek vpravo.

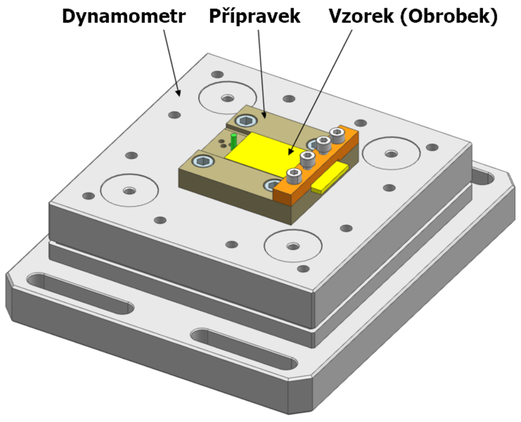


Vliv jednotlivých faktorů jako hlavních efektů na změnu měrné řezné síly pro všechny tři zkoumané materiály: a) EN AW 7075, b) Ti6Al4V, c) DIN C45.

Materiál	$k_{c_{1.1}}\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	m_c [–]	m_{v_c} [–]	$v_{c_{def}}$ [m/min]
EN AW 7075	558	0.212	0.174	450
Ti6Al4V	1245	0.213	0.072	27.5
C45	1048	0.380	0.179	200

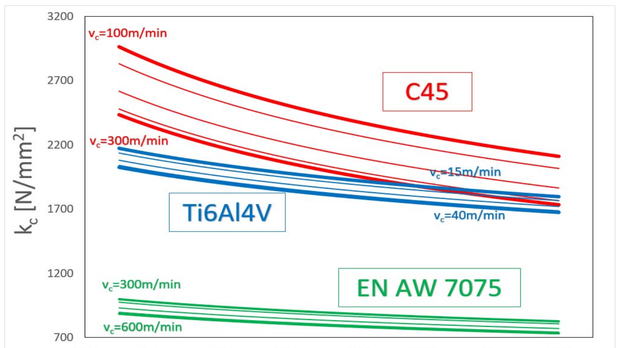
Materiál	R^2	R^2 Adj
EN AW 7075	99.32	99.23
Ti6Al4V	97.61	97.29
C45	94.88	94.19

Materiálové konstanty pro výpočet měrné řezné síly pro všechny tři materiály.



Navržený přípravek se vzorkem pro realizaci experimentů.

Před samotným získáním materiálových konstant byla nejprve provedena u každého materiálu analýza rozptylu pro ověření vlivu hlavních faktorů (A, B, C) na změnu velikosti měrné řezné síly. Z analýzy rozptylu se u všech tří zkoumaných materiálů prokázal faktor B (střední tloušťka odřezávané vrstvy) jako statisticky nejvýznamnější faktor. Dále se prokázal faktor C (řezná rychlost) jako druhý statisticky nejvýznamnější faktor. Co se týče statistické významnosti faktoru A (šířka odřezávané vrstvy), prokázal se u všech tří materiálů jako statisticky nevýznamný, jak jsem předpokládal. Pro doplnění analýzy rozptylu byly pro všechny tři materiály sestrojeny grafy vlivu jednotlivých faktorů jako hlavních efektů na změnu měrné řezné síly, viz horní obrázek vlevo. Původně navržený model měrné řezné s vlivem tloušťky odřezávané vrstvy a řezné rychlosti se tedy u všech tří materiálů prokázal jako relevantní a byl tedy následně použit pro získání materiálových konstant, kdy byly pomocí software Minitab zjištěny všechny tři materiálové konstanty pro všechny zkoumané materiály, viz dolní obrázek vlevo.



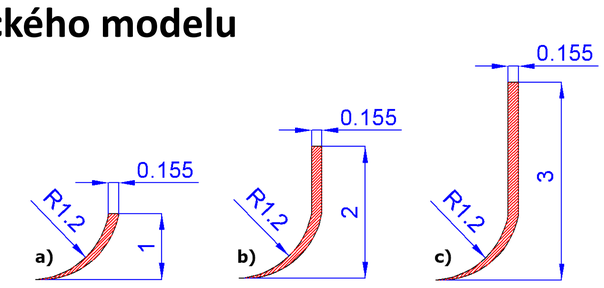
Závislost měrné řezné síly na posuvu na zub pro všechny tři zkoumané materiály.

Na obrázku vlevo je závislost vypočtené měrné řezné síly na posuvu na zub pro řezné rychlosti v rozsahu, v jakém byly měřeny, tedy: u hliníkové slitiny EN AW 7075 je to v rozsahu 300 až 600 m/min, pro titanovou slitinu Ti6Al4V v rozsahu 15 až 40 m/min a pro ocel DIN C45 v rozsahu 100 až 300 m/min. Jak je vidět na tomto obrázku, největší hodnoty měrných řezných sil dosahuje téměř ve všech případech ocel DIN C45. Výjimku tvoří titanová slitina Ti6Al4V při použití řezných rychlostí v rozsahu 15 až 28 m/min při velkých tloušťkách odřezávané vrstvy, kdy jsou hodnoty měrné řezné síly vyšší, než u oceli DIN C45 při použití velkých řezných rychlostí (271 až 300 m/min). Nejmenší hodnoty měrné řezné síly má hliníková slitina EN AW 7075.

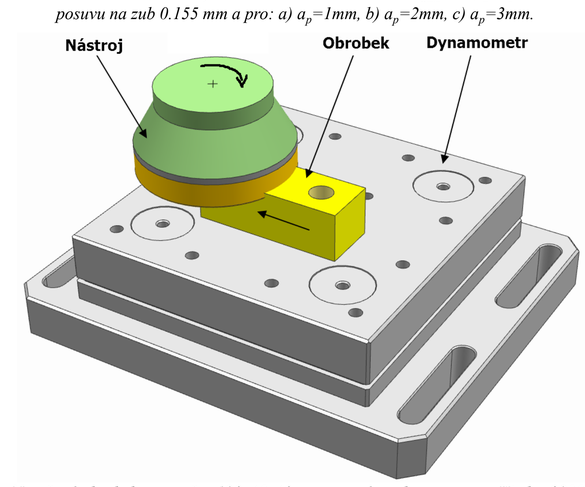
3. Ověření navrženého matematického modelu

Tato část se zabývala ověřením středních hodnot řezné síly za záběr pro 1 zub frézovacího nástroje vypočtených dle navrženého modelu s uvažováním vlivu poloměru špičky. Ověření bylo provedeno porovnáním vypočtených středních hodnot řezných sil s hodnotami experimentálně zjištěnými, které byly získány experimenty navrženými v této kapitole způsobem, aby se obráběla buď jen zaoblenou částí břitu řezné hrany, nebo jak zaoblenou, tak rovnou částí břitu řezné hrany, viz obrázek vpravo. Hlavním úkolem této kapitoly bylo tedy ověřit vliv poloměru špičky na přesnost výpočtu. Pro tento účel byly uvažovány dva modely – model s/bez uvažování poloměru špičky.

Pro tento typ ověření matematického modelu byla vybrána ocel DIN C45. Jedná se o stejný materiál, jaký byl použit pro získání materiálových konstant. V tomto případě však byly ze stejného materiálu vyrobeny vzorky jiného tvaru, které byly uchyceny dvěma šrouby na dynamometru, viz obrázek vpravo. Analýzou dat bylo zjištěno, že u modelu bez uvažování poloměru špičky se v rozsahu procentuálních odchylek -5 až 5 % nachází 15 % všech měření a v rozsahu procentuálních odchylek -10 až 10 % se nachází 37 % všech měření. U modelu s uvažováním poloměru špičky se v rozsahu procentuálních odchylek -5 až 5 % nachází 59 % všech měření a v rozsahu procentuálních odchylek -10 až 10 % se nachází 89 % všech měření. Na základě této analýzy lze konstatovat, že navržený matematický s uvažováním poloměru špičky je přesnější.



Plocha odřezávané vrstvy v maximálním úhlu záběru (φ_{max}=90°) při použití posuvu na zub 0.155 mm a pro: a) a_p=1mm, b) a_p=2mm, c) a_p=3mm.



Navržený obrobek o rozměru 120x45x40 mm upnutý na dynamometru Kistler 9255b.

4. Zobecnění navrženého modelu a jeho ověření

První zobecnění modelu spočívalo v uvažování opravného koeficientu úhlu čela, který přepočítává měrnou řeznou sílu na základě úhlu čela nástroje, který byl použit pro získání materiálových konstant (γ_{O0}) a nástroje, který chceme použít pro predikci silových parametrů (γ_{Oakt}). Na základě experimentálně zjištěných dat byla sestrojena závislost opravného koeficientu úhlu čela na úhlu čela a vliv úhlu čela byl implementován do vztahu pro výpočet opravného koeficientu úhlu čela, který je znám z různých referencí. Tento vztah byl následně implementován do vztahu pro výpočet měrné řezné síly:

$$K_{\gamma_o} = 1 - 0.01 \cdot (\gamma_{o_{akt}} - \gamma_{o_0}) \qquad k_c = k_{c_{1.1}} \cdot h_D^{-m_c} \cdot \left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{v_c}} \cdot K_{\gamma_o}$$

Další zobecnění spočívalo v uvažováním opravného koeficientu materiálu obrobku, který přepočítává měrnou řeznou sílu na základě meze pevnosti v tahu materiálu, který byl použit pro získání materiálových konstant (R_{m2}) a materiálu, pro který chceme predikovat silové parametry (R_{m1}). Na základě experimentálně zjištěných dat byla sestrojena závislost opravného koeficientu materiálu obrobku na poměru mezí pevnosti v tahu a byl zjištěn vztah opravného koeficientu materiálu obrobku. Tento vztah byl následně implementován do vztahu pro výpočet měrné řezné síly, nyní už i s uvažováním opr. koeficientu úhlu čela:

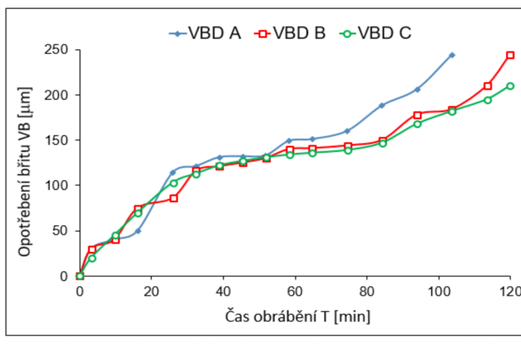
$$K_{mat} = \left(\frac{R_{m1}}{R_{m2}}\right)^{0.612} \qquad k_c = k_{c_{1.1}} \cdot h_D^{-m_c} \cdot \left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{v_c}} \cdot K_{\gamma_o} \cdot K_{mat}$$

Nejprve byl ověřován model řezné síly za otáčku pro 1 zub v záběru s uvažováním opravného koeficientu úhlu čela, a to pro dva nástroje s různou geometrií a tvarem VBD. Dále byl pro tyto nástroje ověřován model řezné síly za otáčku pro N zubů v záběru s uvažováním opravného koeficientu úhlu čela. Ověřením bylo prokázáno, že model byl úspěšně zobecněn a je aplikovatelný pro nástroje s různou geometrií (nejenom s různými hodnotami poloměru špičky a úhlu nastavení, ale i s různými hodnotami úhlu čela), tvarem VBD (kruhového a nekruhového tvaru) a různým počtem zubů v záběru.

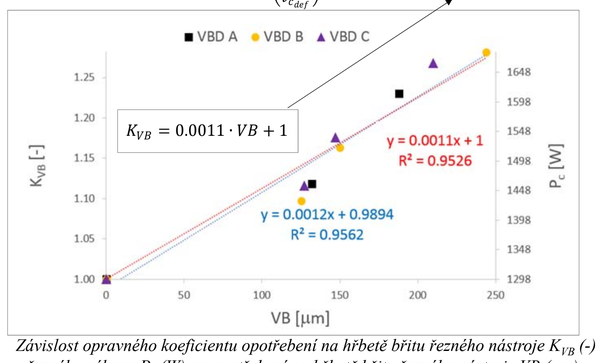
5. Zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení

Cílem této části bylo zpřesnění navrženého modelu o vliv opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje (VB). Tento vliv výrazně ovlivňující měrnou řeznou sílu je obvykle vyjádřen opravným koeficientem opotřebení (K_{VB}). Pro splnění tohoto cíle byl zvolen jeden materiál obrobku, kterým byla ocel s označením DIN C45 a byl použit nástroj osazený jednou VBD. Byly změřeny trvanlivosti a opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje pro tři VBD a byl sestrojen graf závislosti opotřebení na hřbetě na čase obrábění (na obrázku vlevo). Při několika měřeních opotřebení byly zároveň změřeny proudy a napětí, ze kterých se vypočítal výkon, z jehož průběhu v čase se vyhodnotil řezný výkon. Na základě získaných hodnot řezných výkonů byly vypočteny opravné koeficienty opotřebení a byl sestrojen graf závislosti opravného koeficientu opotřebení a řezného výkonu na opotřebení na hřbetě. Pomocí lineární regrese byl získán matematický model opravného koeficientu opotřebení na opotřebení na hřbetě (na obrázku vpravo) a tento získaný vztah byl pak následně zakomponován do rovnice pro výpočet měrné řezné síly. Hodnota opravného koeficientu opotřebení narůstá od hodnoty 1 (nová VBD) do hodnoty 1.27, kdy je VBD opotřebená. Vzrůst řezného výkonu byl tedy u opotřebené VBD o 27 %.

$$k_c = k_{c_{1.1}} \cdot h_D^{-m_c} \cdot \left(\frac{v_c}{v_{c_{def}}}\right)^{-m_{v_c}} \cdot K_{\gamma_o} \cdot K_{mat} \cdot K_{VB}$$



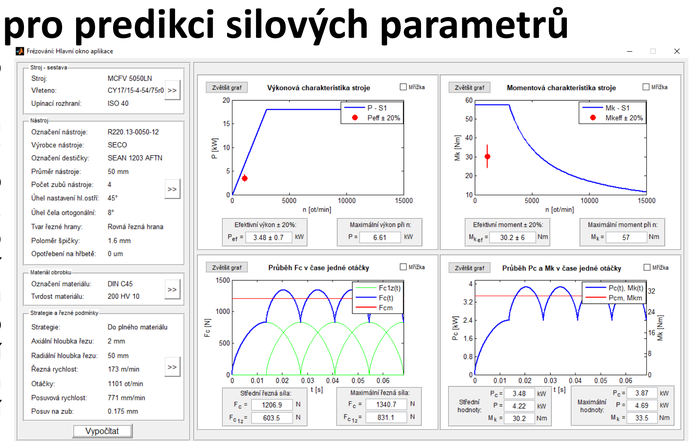
Závislost opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje na čase obrábění.



Závislost opravného koeficientu opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje K_{VB} (-) a řezného výkonu P_c (W) na opotřebení na hřbetě břitu řezného nástroje VB (μm).

6. Návrh softwarové aplikace pro predikci silových parametrů

Na základě navrženého a ověřeného matematického modelu a získaných materiálových konstant byla vytvořena softwarová aplikace pro predikci silových parametrů řezného procesu při frézování frézovacími hlavami, viz obrázek vpravo. Jak je vidět na tomto obrázku, mezi výstupní parametry patří aktuální, střední a maximální hodnoty řezné síly, řezného výkonu a krouticího momentu. Dále pak efektivní hodnoty výkonu a krouticího momentu, které jsou zobrazeny ve vykreslených charakteristikách zvoleného stroje. A nakonec také aplikace zobrazuje maximální hodnoty výkonu a krouticího momentu při zvolených otáčkách. Tyto hodnoty jsou počítány pro aktuální režim zatížení vřetene (S1 nebo S6).



Hlavní okno navržené softwarové aplikace.

K použití navržené softwarové aplikace není nutná speciální znalost výpočtu silových parametrů, a tak je aplikace v praxi snadno použitelná. Díky implementované predikci zatížení vřetene se s pomocí softwarové aplikace mohou z hlediska maximální produktivity navrhnout řezné podmínky tak, abychom stroj plně vytížili.

Řešení práce bylo provedeno mimo jiné také v rámci projektu aplikovaného výzkumu Centrum kompetence – Strojírenská výrobní technika, který byl spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR.