

Virtuální prototypování

Matěj Sulitka, Jiří Švéda, Martin Mareš, Otakar Horejš, Tomáš Holkup

Abstrakt:

Příspěvek přibližuje některé poznatky získané na EMO 2009 v oblasti využití pokročilých výpočetních nástrojů při vývoji strojů a jejich pohonů. S ohledem na menší význam uvedeného tématu v kontextu výstavy EMO byly získány jen některé dílčí informace, které tudíž nemohou dostatečně reprezentovat obecnou úroveň tématu. Při vyhledávání informací byl kladen důraz na otázky virtuálních modelů strojů, pokročilých funkcí řízení pohonů, optimalizace dráhového řízení a simulace řezného procesu.

1 Úvod

Výpočetní nástroje založené na metodě konečných prvků (MKP) jsou pro provádění základních analýz statických a frekvenčních vlastností (modální analýza) dnes již běžnou součástí procesu vývoje nových strojů a zařízení. Zvyšující se požadavky na funkční vlastnosti strojů vyvolávají ovšem nutnost podrobovat navrhované konstrukce pokročilejším analýzám, jejichž cílem bývá nejčastěji dosažení co nejlepších dynamických vlastností pohonů, rozhodujících o celkové užité hodnotě stroje. Zvyšování dynamických vlastností pohonů přímo souvisí s optimalizovaným návrhem nosné struktury stroje (uplatnění postupů parametrické, topologické a tvarové optimalizace) a optimalizací návrhu stavby pohonu. Z dosažených vlastností mechanické stavby stroje přímo vyplývá možnost nastavení parametrů regulátorů řízení. Výsledná kvalita a přesnost obrábění není ovšem projevem pouze celkových dynamických vlastností pohonů stroje, ale také způsobu přípravy NC dat a jejich interpolace řídicím systémem stroje.

V posledních zejména deseti letech je pro účely provádění pokročilých analýz stavby rámu stroje a pohonu pozornost věnována intenzivnímu vývoji komplexních modelů pohybových os (pro vyšetření dynamických vlastností mechanické stavby pohonu s připojenou strukturou stroje a modelem řízení pohonů), resp. virtuálních modelů. Tyto modely zahrnují i jádro skutečného řídicího systému s jeho interpolátorem a umožňují provádět simulace k získání relevantních odhadů přesnosti dráhového řízení a časů obrábění.

Presentace pokročilých výpočetních nástrojů na výstavách strojírenské techniky je ovšem zřejmě velmi vázána na očekávanou možnost získání konkrétních kontaktů v průmyslu. Narozdíl od naposledy navštíveného ročníku EMO 2005 v Hannoveru chybělo na EMO 2009 výraznější zastoupení softwarových firem, nabízejících MKP programové systémy, resp. firem a výzkumných institucí, které se vývojem nástrojů pro pokročilé simulace zabývají. Při návštěvě EMO 2009 se pozornost proto zaměřila na sledování zmínek o využití výpočetních a simulačních nástrojů u firem, které jsou dlouhodobě známy prosazováním nových technik a postupů. Kromě vlastních výpočetních nástrojů byla ve vazbě na dlouhodobý výzkumný záměr VCSVTT sledována také témata pokročilých funkcí řízení pohonů, simulace řezného procesu a přesnosti dráhového řízení.

2 Virtuální modely strojů

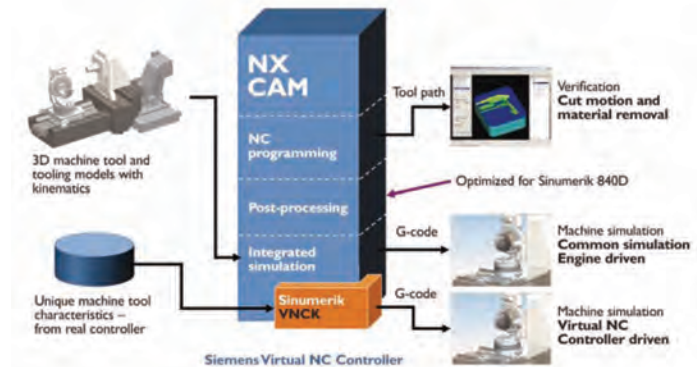
2.1 Siemens

V oblasti virtuálního modelování pohybových os OS a strojů nebyla fy Siemens na EMO 2009 presentována žádná významná novinka. Pro možnost virtuálního simulování dráhového řízení pohybových os stroje včetně zahrnutí interpolace NC dat řídicím systémem stroje je nabízeno již známé programové řešení "Virtual machine" pro stroje vybavené CNC systémem Sinumerik. Zahrnuto je virtuální jádro řídicího systému, tzv. "virtual NC kernel, VNCK" ve spojení s grafickým simulačním systémem (Real NC nebo NX CAM) pro výpočty úběru materiálu a kolizních stavů a uživatelské rozhraní SINUMERIK HMI. Jeho prostřednictvím je uživateli

na obrazovce PC k dispozici klasické ovládací rozhraní řídicího systému, přičemž je možno v systému nastavovat všechny parametry strojních dat jako na skutečném stroji, s výjimkou parametrů pohonu.

V základní konfiguraci jsou dynamické vlastnosti stroje v systému "Virtual machine" reprezentovány pouze hmotami se soustředěnými parametry. Pomocí uživatelsky vytvořených programů, např. v jazyce C++, je ovšem možno ošetřit komunikaci s VNC Serverem a k jádru řídicího systému VNCK připojit vlastní model dynamických vlastností stroje, který může zahrnovat i popis poddajnosti pohybových os.

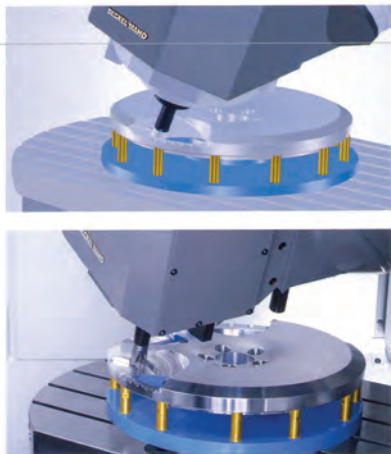
Hlavní předností systému je možnost realistické simulace obráběcího procesu, na jejímž základě lze kontrolovat programovací chyby a kolizní stavy a významně redukovat časy pro přípravu výroby. Propojením jádra skutečného řídicího systému s modelem stroje je možno rovněž získávat relevantní odhady simulovaných časů obrábění. Skutečné rychlosti pohybových os se totiž při odbavení NC kódu v řídicím systému mohou významně lišit od parametrů, které jsou zadávány jako technologicky doporučené v CAM systémech.



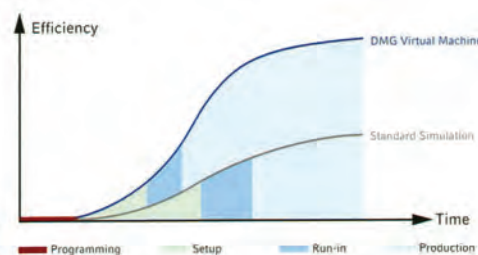
Obr. 1: Využití jádra řídicího systému VNCK v simulacích virtuálního dráhového řízení

2.2 DMG Virtual Machine

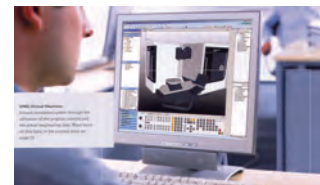
Mezi programovými nástroji uváděnými jako doplňková nabídka fy DMG byl presentován software DMG Virtual Machine. Program je podobně jako v případě řešení Siemens založen na propojení jádra řídicího systému (Heidenhain i830) s modelem stroje, poskytujícím simulaci kinematických a dynamických vlastností pohybových os. Dynamické účinky jsou v modelu zahrnuty prostřednictvím hmot se soustředěnými parametry, poddajnost struktury stroje a mechanické stavby pohonu není uvažována. Praktickým účelem využití tohoto programu je provádění simulací odbavení NC kódu a sledování kolizních stavů při současné simulaci změny tvaru obrobku v průběhu jeho obrábění. Na základě simulovaného pohybu nástroje je možno přímo z prostředí programu DMG Virtual Machine provádět úpravy NC kódu, přičemž není rozhodující, jestli byl NC program vytvořen v externím CAM programu, nebo přímo v CNC řízení stroje.



Maximum efficiency and time-savings



Obr. 2: Virtual Machine DMG. Graf prezentuje přínos využití DMG Virtual Machine ke zvýšení účinnosti predikce časů jednotlivých úseků procesu přípravy stroje a výrobních časů.



V součinnosti s PLC systémem stroje jsou do simulací procesu obrábění zahrnuty i časy na výměnu nástrojů a je tudíž možno získávat velmi relevantní predikce celkových časů obrábění. Podle údajů fy DMG je při stanovení časů obrábění dosahováno shody na 99,9 % se skutečnými časy obrábění. Výpočetní časy simulací probíhají přitom buď v reálném čase, nebo s urychlením, které podle typu úlohy může představovat zkrácení výpočetního času virtuálního obrábění v porovnání se skutečným (predikovaným) časem až o 70 %.

3 EU projekt NEXT

Výsledky tematicky velmi obsáhlého EU projektu, řešeného v rámci 6. rámcového programu v letech 2005 - 2009, byly na EMO 2009 prezentovány stánkem s hlavní atrakcí v podobě 2D robotu s paralelní kinematikou a dynamickými parametry, které dovolují robot označovat jako nejrychlejší. Robot dosahuje maximálního zrychlení 52 g a rychlosti 12,5 m/s, přičemž je současně jeho nosná struktura 10 x (!) lehčí a tužší než klasický 2D robot. Vývoj robotu byl prováděn výzkumnou institucí FATRONIK-France.

Vlastní náplň projektu se dělí do čtyř základních tematických okruhů:

- "Zelené stroje"
- Uživatelsky autonomní stroj
- Hranice obrábění
- Nové obchodní koncepty pro obrábění

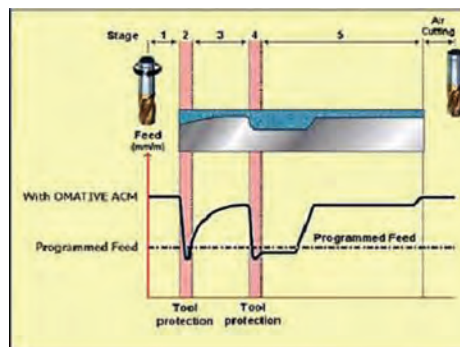
V oblasti *Uživatelsky autonomní stroj* byla řešena řada velmi zajímavých témat, které s virtuálním modelováním strojů souvisí buď přímo, nebo nepřímo prostřednictvím technik, uplatnitelných v pokročilém řízení pohybových os.

3.1 Optimalizace dráhového řízení

3.1.1 Adaptivní řídicí modul pro frézovací stroje

Firmou FIDIA (IT) byl vyvinut programový modul, který umožňuje v reálném čase sledovat výkonové nároky vřetena a podle výkonového zatížení upravovat posuvové rychlosti tak, aby byl nástroj chráněn před nerovnoměrnostmi jeho zatížení.

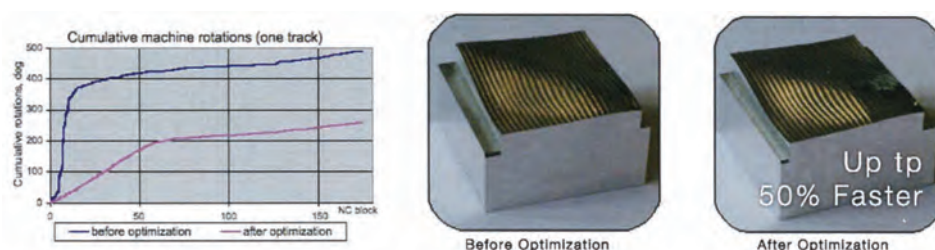
Na obr. 3 je schematicky zobrazena funkčnost systému. Zvýšení výkonu vřetena indikuje větší zatížení nástroje např. při zvětšení axiální hloubky řezu. Systém v těchto režimech obrábění automaticky sníží posuvovou rychlost pod naprogramovanou hodnotu.



Obr. 3: Adaptivní řízení posuvové rychlosti nástroje podle jeho zatížení

3.1.2 Algoritmus pro optimalizaci dráhového řízení 5-osých obráběcích strojů

Pětiosé obrábění se v posledních letech stává stále populárnější díky zkrácování časů obrábění, lepší kvality obrobených povrchů a zvýšené životnosti nástrojů. Rychlost i výsledná kvalita obrábění závisí ovšem významně na množství rotačních pohybů příslušných pohybových os. Na KU Leuven byl vyvinut inteligentní modul pro tvorbu trajektorií pětiosého obrábění, který při zohlednění kinematických a dynamických vlastností (profily rychlostí a zrychlení) stroje umožňuje účinné a rychlé obrábění komplexních ploch. Pomocí vyvinutého modulu je zvýšena jednoduchost a spolehlivost vytváření a vyhlazování žádaných drah nástroje, díky čemuž je možno dosáhnout velmi hladkého průběhu dráhy nástroje. Modul je doplněn i o automatickou detekci kolizí mezi nástrojem a obrobkem a kontrolou maximálních úhlů natočení jednotlivých pohybových os. Na prezentovaném příkladu je demonstrováno obrobení komplexní plochy v čase o 50 % kratším než v běžném případě, při o 50 % menším kumulativním natočení os stroje.



Obr. 4: Zvýšení rychlosti a kvality obrobení při optimalizaci natáčení rotačních os při 5-osém obrábění

3.1.3 Adaptivní řídicí a monitorovací systém pro vrtací stroje

Záměrem bylo ve spolupráci partnerů WZL (RWTH Aachen, DE) a Bosch (DE) vyvinout systém pro řízení axiální síly vrtání prostřednictvím úpravy rychlosti posuvu. Systém provádí on-line identifikaci řízené dráhy nástroje, stanovuje parametry regulátoru s využitím modelu a zaručuje stabilitu procesu.

V rámci řešení tématu byly vyvinuty a verifikovány 3D simulační MKP modely, jejichž prostřednictvím je

- predikována řezná vrtací síla a dynamické chování nástroje
- predikována tvorba otřepů
- provedeno naladění modelů pro aplikace obrábění v automobilovém průmyslu.



Obr. 5: Simulační model vrtání a jeho aplikace při adaptivním řízení vrtání

3.2 Pokročilé funkce řízení pohonů

Výsledkem spolupráce několika partnerů projektu NEXT jsou některé velmi zajímavé doplňkové pokročilé funkce pro řízení pohonů.

3.2.1 Kinematické měření (CYCLE996)

Měřicí cyklus "CYCLE996" je v řídicích systémech SINUMERIK 840D nabízena již jako uživatelsky dostupná funkce. Algoritmus byl vyvinut pro rychlou kalibraci vzájemné orientace rotačních os 5-osých obráběcích strojů. Ke kalibraci je použita pouze kalibrační koule a sonda, jejichž prostřednictvím je možno měření a kalibraci kinematiky rotačních os provést během cca 10 min. Běžným postupem prováděné kalibrace vyžadují i jeden den práce.



Obr. 6: Kalibrační měření CYCLE996

3.2.2 Auto servo tuning

Optimální naladění parametrů regulátorů řízení pohonů je jedním z důležitých faktorů, které rozhodují o vhodném využití dynamických vlastností stroje. V dosavadní praxi jsou parametry kaskádní regulace nastavovány postupem zkoušek přímo na stroji, což je proces časově značně zdoluhavý. Nastavení dosažené tímto postupem může být pro určité spektrum technologického využití stroje vyhovující, nemusí se ovšem jednat o nastavení optimální, které by umožňovalo využít plně kapacity stroje.

Ve spolupráci partnerů WZL (RWTH Aachen, DE), Emco (IT), Correa Annayak (ES) a Siemens (DE) byl vyvinut modul pro automatické naladění parametrů polohového regulátoru, rychlostního regulátoru a rychlostního feedforwardu in prostředí Sinumerik Operate.

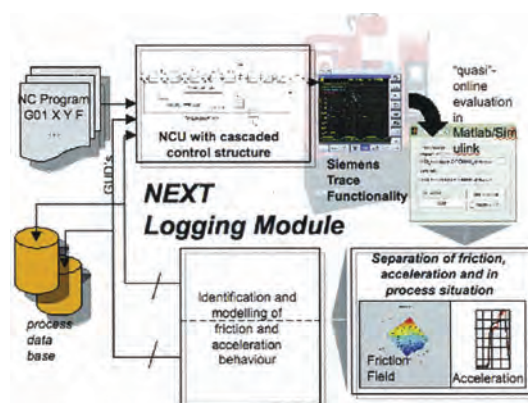
Po úvodní inicializaci vybrané pohybové osy a startu optimalizační úlohy provede pohybová osa sadu pohybů, na jejichž základě je provedena identifikace dynamických vlastností. Automaticky je následně odvozeno optimální nastavení parametrů regulátorů.

3.2.3 Kompenzace pasivních odporů

K potlačení vlivu jednotlivých komponent stroje na obráběcí proces je vyvinut ve spolupráci WZL a Siemens model pro kompenzaci tření. Navržený algoritmus je založen na identifikaci třecích a akceleračních sil prostřednictvím definovaných pohybů pohybové osy stroje. Pomocí funkce "Trace" v řídicím systému Sinumerik 840D je sledován průběh momentotvorného proudu. Přiřazením jednotlivých částí průběhu

proudu úsekům definovaného pohybu se zrychlením, nebo konstantní rychlostí je možno od sebe oddělit příspěvky třecích a akceleračních sil. Na základě vyhodnoceného průběhu složky třecích sil je provedena identifikace odpovídajícího modelu pasivních odporů.

Identifikované průběhy pasivních sil a sil zrychlení jsou podkladem pro výpočet korigovaného momentotvorného proudu v rámci kaskádního schématu regulace pohonu. Metodika byla aplikována na obráběcích strojích Chiron FZ22S a EMCO E900, přičemž byl zjištěn velmi dobrý soulad simulovaného a měřeného průběhu proudu.



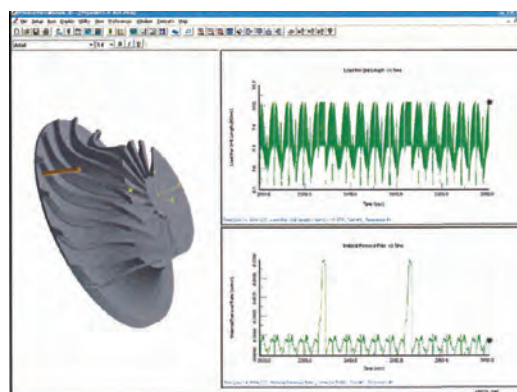
Obr. 7: Schéma řízení pohonu s kompenzací pasivních odporů

4 Simulace řezných sil

V oblasti simulace řezných sil a navazující optimalizace dráhového řízení představuje AdvantEdge Production Modul nástroj s jedinečnými vlastnostmi. V programu lze plně definovat geometrickou konfiguraci stroje i jeho dynamické vlastnosti, typ nástroje, vlastnosti obráběného materiálu, CAD/CAM data obrobku a parametry řezného procesu. Nástroj je kromě specifikace jeho geometrie popsán uživatelsky voleným počtem axiálně a radiálně rozložených bodů.

Program umožňuje výpočetně velmi rychlou simulaci úběru obráběného materiálu a výpočet řezných sil, které jsou zobrazovány v uživatelsky zvoleném časovém kroku. Ve VCSVTT jsou v současné době prováděny zkušební simulace v rámci testovací licence. Ukazuje se, že řezné síly jsou počítány v každém výpočetním kroku a zohledňují skutečný aktuální průřez bříty nástroje s obráběným materiálem. Výpočet sil není tudíž zřejmě prováděn jako středěný přes delší časové úseky s využitím knihovnic dat řezných sil.

Ve verzi 5.7, která byla uvolněna v listopadu 2009, je mezi několika funkčními novinkami programu zajímavá zejména možnost programování na střed nástroje, import stabilitních dat z měřicího systému MetalMAX, zahrnutí časů na výměnu nástrojů nebo import dráhy nástroje z programu Vericut (možnosti využití programu Vericut pro optimalizace NC dat dráhového řízení jsou zmíněny v kapitole CAD, CAM, CIM systémy).



Obr. 8: Pracovní obrazovka Production Module se zobrazením obrobku a grafů silového zatížení nástroje a množství odebraného materiálu

5 Komerční výpočetní kanceláře

5.1 Sintesi

Sintesi je mladou firmou, která vznikla oddělením se od italského výzkumného centra Fiat CNR. Zaměřuje se především na poskytování mechatronických řešení pro řízení deformací, řízení a tlumení vibrací, řízení pohonů a redundantní řízení. Pro uvedené aplikace využívá vlastních snímačů zrychlení a laserových encoderů. V oblasti pokročilých konstrukcí pro mechatronické aplikace jsou firmou Sintesi používány kompozitové materiály, jejichž využití bylo na stánku na EMO 2009 demonstrováno portálovou frézku s kompozitovým vřeteníkem.

S vývojem mechatronických řešení úzce souvisí nutnost využívání pokročilých výpočetních nástrojů. V rámci programu "Mechatronic Design" se firma Sintesi zabývá mj. vývojem simulačních modelů a virtuálních prototypů a jejich verifikací. Zvláštní zřetel je přitom věnován zejména výpočetním modelům kompozitových materiálů. Standardně jsou řešeny úlohy výpočtu strukturálních vlastností, topologické, tvarové a rozměrové optimalizace.

Pro analýzy výrobních a provozních nákladů nabízí firma Sintesi vlastní program LCC (Life Cycle Cost). Program je založen na specificky vyvinuté metodice LCCA a RAM (Reliability, Availability, Maintainability),

jejichž kombinací je možno efektivně provádět návrhy nabídky a plánování vývoje a výroby a následného servisu. Analýza RAM využívá mj. simulační algoritmus Monte Carlo pro výpočty spolehlivosti v určitém čase, výrobní prostoje, dostupnost a náklady výrobku, systému a jeho součástí. Pomocí LCC simulací jsou prováděny odhady celkových nákladů, které připadají na pořízení, provoz a údržbu výrobků a systémů. Prostřednictvím těchto výpočtů je možno jednoznačně určit oblasti s potenciálem pro snižování ztrát souvisejích s údržbou výrobků a zajištěním náhradních dílů.

5.2 Roschiwal + Partner Engineering

Samostatným výstavním stánkem se presentovala konstrukční kancelář Roschiwal + Partner Engineering se sídlem v Augsburgu (Německo). Kancelář s dalšími zastoupeními v Berlíně a Temešváru poskytuje komplexní konstrukční a vývojové práce od tvorby koncepčních studií až po zhotovení prototypů. V řetězci vývojových prací nabízí kancelář Roschiwal + Partner Engineering jako samozřejmou součást mj. i MKP analýzy navrhovaných konstrukcí a výpočty výrobních nákladů.

MKP výpočty jsou kanceláří poskytovány od konce 90. let. Rozsah prováděných typů MKP výpočetních úloh zahrnuje výpočty strukturálních statických i nelineárních analýz (deformace, napětí), výpočty tuhostí navrhovaných konstrukcí, kontaktní úlohy, frekvenční (modální) analýzy, teplotní analýzy (deformace vlivem teplotního pole), výpočty kontaktních úloh a úlohy optimalizační (optimalizace se změnou vybraných geometrických parametrů) a výpočty topologických analýz.

Zajímavý je přehled programů, které jsou kanceláří pro různé typy konstruktérských výpočtů používány:

- KISSsoft-Hirware (<http://www.kisssoft.ch/>): program pro návrh čelních ozubených kol (vnější, vnitřní), kuželových kol, pastorků a ozubených tyčí, nosníků, valivých ložisek, kluzných ložisek, řemenových převodů
- SIDIM (software fy Siemens; Siemens DIMensioning): program pro podporu výběru servomotorů pohybových os ve spojení s pohony Sinamics S120 nebo Simodrive 611U/D
- Cymex (software fy Wittenstein, dříve Alpha; <http://www.wittenstein-us.com/tech-support/design-tools/cymex-software.cfm>): program pro návrhy konfigurací pohybových os
- ME-Design: výpočty pro dimenzování čelních ozubených kol, kuželových kol, pastorků a ozubených tyčí, válečkových ložisek, kluzných ložisek, řemenových převodů
- Bechtel: výpočty čelních ozubených kol
- MathCAD
- Program fy FAG pro výběr valivých ložisek.

V referencích kanceláře Roschiwal + Partner Engineering je uváděno několik desítek evropských významných výrobců z dopravní i výrobní techniky. V oblasti výrobních strojů a jejich komponent patří mezi zákazníky kanceláře např. mj. firmy Bharat Fritz Werner, DMG, Emco, Franz Kessler, Hermle, HIWIN, Hüller Hille, SEW Eurodrive, Siemens, SKF, THK, Trumpf nebo Waldrich Coburg.

6 Shrnutí a závěr

Příspěvek podává stručný náhled některých poznatků získaných na EMO 2009 o využití pokročilých výpočetních nástrojů při návrhu strojů. Presentace firem na EMO 2009 ovšem tuto problematiku samy nezdůrazňovaly a proto jsou popisované poznatky jen velmi neúplným přehledem.

Tvorba komplexních modelů pohybových os a analýza dynamických vlastností řízení pohonů ve spojení s mechanickou stavbou pohonu a připojenou strukturou stroje není již zřejmě natolik novým tématem, které by opravňovalo k zvýrazněným ukázkám možného využití. Pomalu se ovšem rozšiřuje nabídka systémů virtuálních strojů (Siemens VNCK, Heidenhain VirtualTNC, Virtual Machine DMG), v nichž se spojuje jádro skutečného řídicího systému s modelem řízení pohonů a dynamických vlastností mechanické stavby stroje. Systémy virtuálních strojů nabízených komerčně se zaměřují především na možnosti praktického využití pro kontrolu a opravy NC programů, detekci kolizních stavů a predikce realitě velmi blízkých časů obrábění. Pro uživatelské využití se u těchto systémů nepředpokládá sledování přesnosti dráhového řízení a přesnosti obrobeneho povrchu, neboť systémy nezahrnují výpočty řezných sil. Pro simulace řezného procesu jsou vyvíjeny samostatné programy, které ovšem prozatím nenabízejí možnost vložení detailního modelu dynamických vlastností mechanické stavby pohonu a stroje.