

# Inteligentní a mechatronické systémy

Otakar Horejš, Tomáš Holkup, Jiří Vyroubal, Petr Chvojka, Pavel Bach, David Burian, Jiří Švéda, Josef Vaněk, Richard Černý

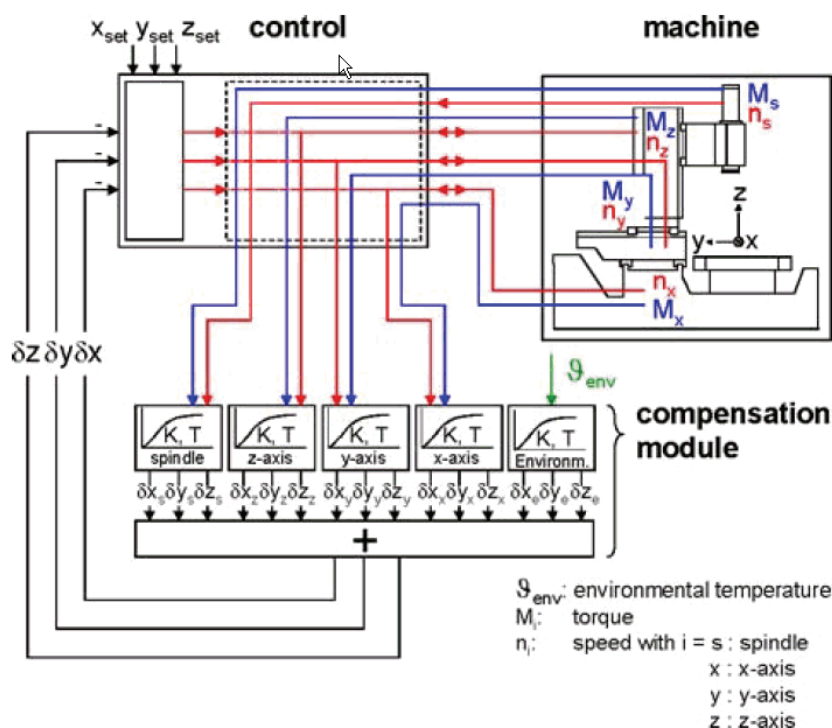
## Abstrakt:

V příspěvku jsou uvedeny nejmodernější koncepty teplotní stabilizace (chlazení k minimalizaci teplotních deformací stroje) a teplotních kompenzačních obráběcích strojů, představené na EMO 2009 v Milánu. V druhé části jsou uvedeny zajímavosti v oblasti inteligentních prvků strojů. Následují kapitoly o adaptivním řízení, aktivní kontrole, inprocesní a postprocesní měření spolu s dalšími aplikacemi mechatroniky.

## 1 Teplotní kompenzace strojů a jejich chlazení pro minimalizaci teplotních deformací

### 1.1 Next Project 2005-2009

V rámci výstavy EMO 2009 byly prezentovány výsledky projektu NEXT, který vznikl za podpory Evropské Unie v rámci 6 RP. Jedním z dílčích úkolů projektu byl výzkum vhodné strategie pro kompenzaci teplotních deformací. V rámci projektu byla řešena, jak přímá kompenzační metoda firmou EMCO, tak vývoj nepřímé kompenzace teplotních deformací (spolupráce WZL s EMCO). Hlavní výhodou nové nepřímé kompenzace je, že nepoužívá dodatečných teplotních čidel kromě jediného senzoru, který zaznamenává teplotu okolí. Metoda naopak využívá interních dat z řídicího systému stroje a to informace o stavu pohonů pohybových os a vřetena (krouticí moment a otáčky) dle obr. 1.

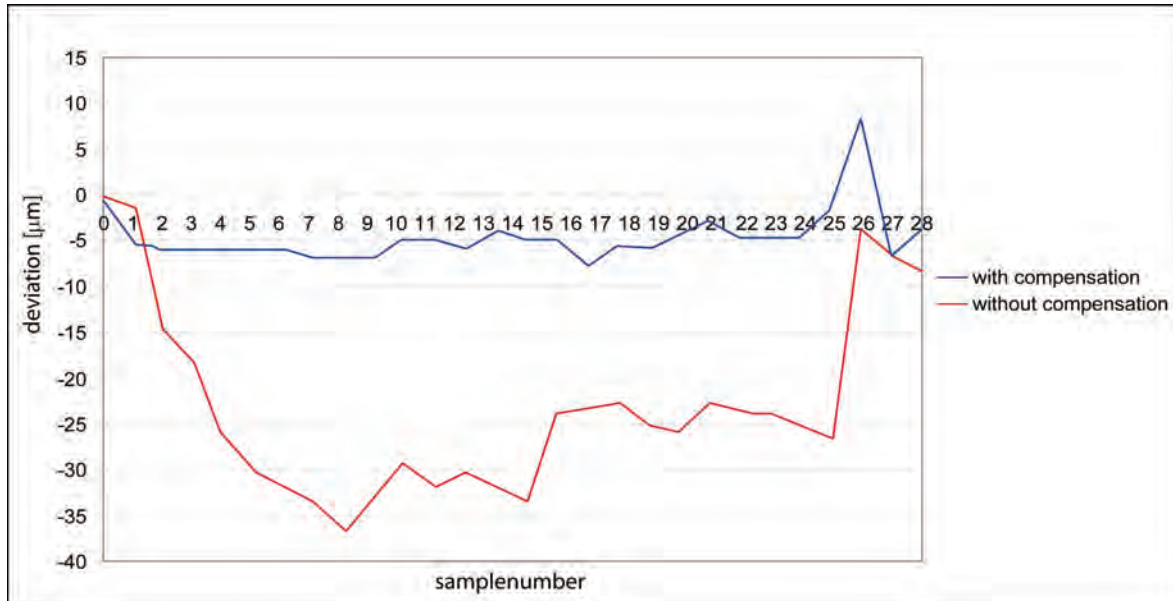


Obr. 1: Princip nepřímé teplotní kompenzace, řešené v rámci projektu NEXT.

Celá metoda pravděpodobně funguje na principu přenosových funkcí, které dávají do vazby údaje ze systému stroje (a teploty okolí) a deformace na špičce nástroje. Kompenzační algoritmus je sestaven na základě poměrně velké sady testů, kdy je např. vřeteno externě brzděno momentem, jehož hodnota je pro každý další test měněna, aby bylo možné získat závislost mezi teplotními deformacemi a daty z řídicího systému stroje. Obdobným principem kompenzaci teplotních deformací obráběcího stroje se zabývá též

VCSVTT v rámci řešení projektu 1.4.2. Rozdíl je však především v tom, že pro popis teplotních posunutí v místě nástroje je používáno více teplotních čidel (vhodně umístěných na struktuře stroje) namísto dat z řídicího systému stroje.

Výsledkem projektu NEXT je snížení deformací na špičce nástroje až o 70 % původní hodnoty v delší časové periodě, jak je ukázáno na obr. 2.



Obr. 2: Odchylna bez/s kompenzací (převzato z materiálů k projektu NEXT).

Řešitelé projektu NEXT proklamují, že tato metoda bude v budoucnosti standardně integrována do řídicích systémů strojů.

## 1.2 Yasda

Jedny z nejpřesnějších strojů ve své kategorii vyrábí firma Yasda. Příkladem je vystavované nové centrum YMC 430 (obr. 3) s lineárními pohony ve všech osách. Centrum je vybaveno lineárními odměřovacími pravítky a lineárními kuličkovými vedeními s 8 řadami kuliček.

Stroj používá stabilizační systém teplotních deformací, čímž se významně redukuje teplotní chyba stroje. Stabilizační systém vychází ze svého předchůdce stroje YMC 325, kdy je rám stroje dostatečně chlazen vnitřními chladícími okruhy viz obr. 4.

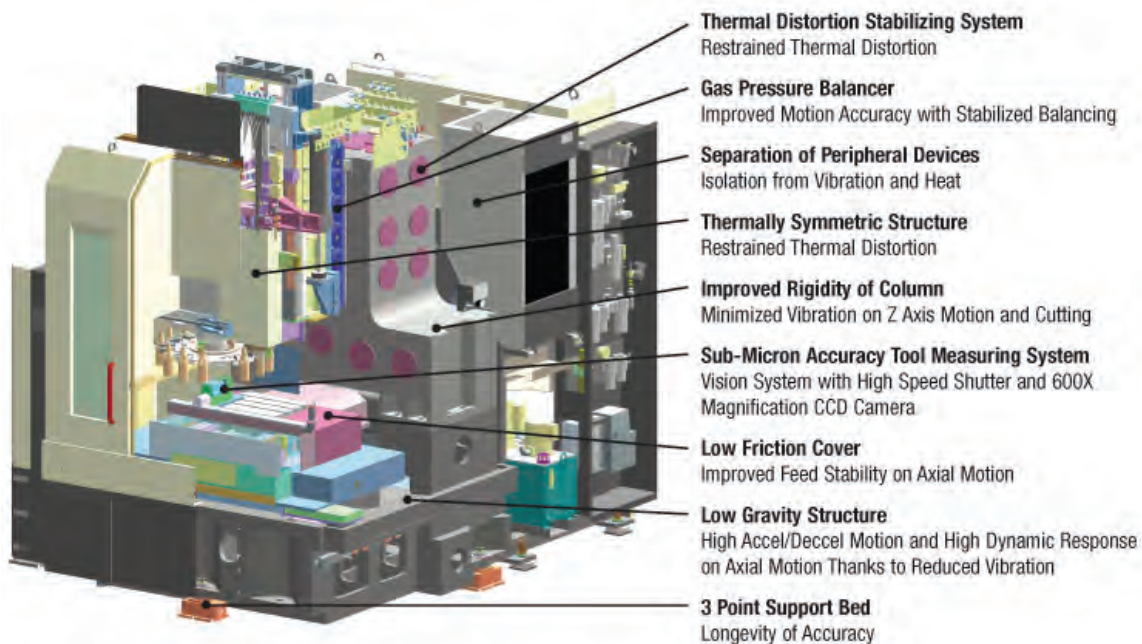


Obr. 3: Mikro centrum Yasda YMC 430.

Samozřejmostí je teplotně symetrická konstrukce stroje (totéž platí i pro další stroje fa Yasda a to včetně např. symetrického odvodu třísek) či odizolování zdrojů tepla. Všechny výše zmíněné charakteristiky stroje zaručují velmi nízké hodnoty chyb polohování, která je dle ISO 230-2:

- v ose X: 0,356 μm.
- v ose Y: 0,508 μm.
- v ose Z: 0,316 μm.

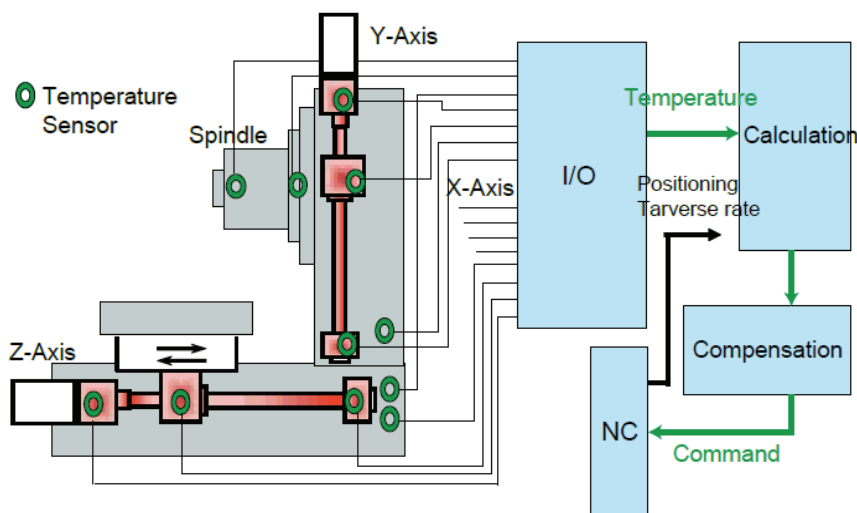
Ve všech osách je tedy zaručena chyba polohování < 0,6 μm. Není, však zcela jasné za jakých konkrétních podmínek je těchto výsledků dosaženo (např. jaký je rozsah změny teploty okolí v průběhu testu atd.).



Obr. 4: Stabilizační systém stroje YMC 325 (předchůdce stroje YMC 430) pro minimalizaci teplotních chyb.

### 1.3 Matsuura

Japonská firma **Matsuura** představila svůj koncept MIMS (*Matsuura Intelligent Meister System*), který zahrnuje kromě větší spolehlivosti stroje (diagnostika), zvýšení provozuschopnosti a lepší ekologičnost (použití ekologicky šetrných komponent, snížení CO<sub>2</sub> emisí), také teplotní kompenzace stroje. Teplotní kompenzace standardně zahrnují kompenzaci teplotních deformací vřetene. Dále je možné kompenzovat deformace od pohybových os. V budoucnu by takto měl být též minimalizován vliv teploty okolí. Systém monitoruje teploty vřetene a pohybových os X, Y a Z. Tyto údaje vstupují do výpočtu kompenzačních hodnot spolu s informacemi o aktuálních posuvových rychlostech pohybových os dle obr. 5.



Obr. 5: Princip teplotních kompenzací fa Matsuura převzato z katalogu ke stroji H.Plus-300.

Teplotní kompenzace jsou aplikovány např. na řadě horizontálních obráběcích center H. Plus. Spolu s teplotními kompenzacemi jsou teplotní dilatace na špičce nástroje minimalizovány pomocí chlazení vřetene olejem (chladičí okruh je ve vnějším tubusu vřetene) a speciální spojky ve vřetenu, která minimalizuje vedení tepla.

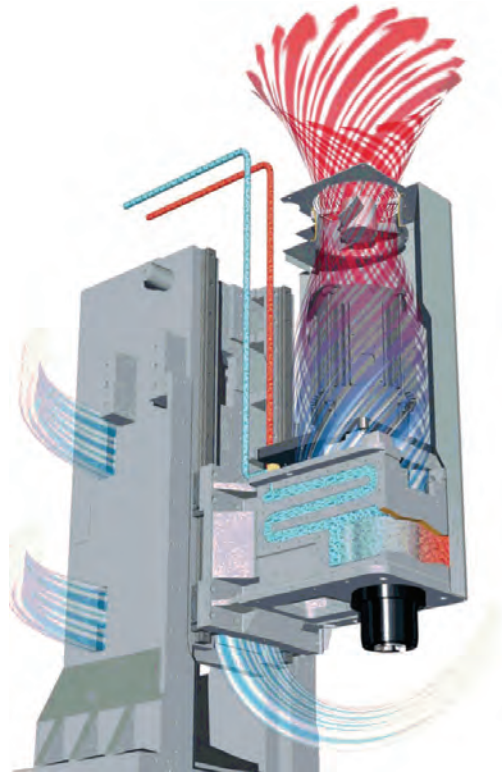
## 1.4 Haas

Firma Haas má velmi dobře řešenou teplotní stabilitu jejich strojů, která zaručuje výrazné snížení teplotních dilatací stroje. Například vertikální obráběcí centra firma HASS jsou vybavena chladicími prvky, které teplotně stabilizují vřeteník.

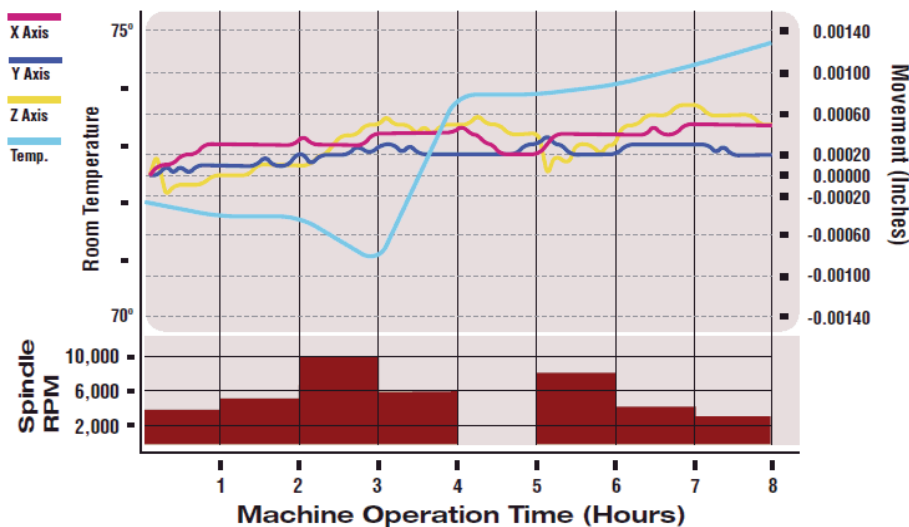
Jedná se jednak o poměrně standardní chlazení pláště hlavy odlitku chladivem, čímž jsou minimalizovány teplotní deformace v místě nástroje. Dále hlava vřetene je teplotně izolovaná a je zvýšen průtok vzduchu skrz vřeteník. Chladný vzduch vstupuje ze zadní části stroje a vystupuje horní částí vřeteníku mimo stroj, jak je zobrazeno na obr. 6. Teplý vzduch tak příliš neovlivňuje konstrukci stroje.

Všechna tato řešení udržují teplotu vřeteníku prakticky při konstantní teplotě. Deformace v místě nástroje při 8 hodinovém testu jsou na obr. 7. Test byl proveden při měnících se otáčkách vřetene (zobrazeno ve spodní části obr. 7) a v neklimatizované hale (změna teploty okolí je na grafu označena jako Temp).

Teplotní kompenzace strojů firmy Haas jsou pravděpodobně řešeny na základě klasického modelu založeného na vícenásobné regresní analýze. Podrobnější informace se však autorům nepodařilo získat.



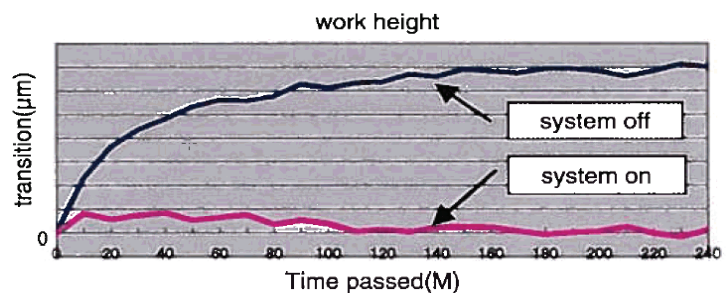
Obr. 6: Chlazení vřeteníku vertikálních obráběcích center firma HASS.



Obr. 7: Teplotní deformace stroje VMC při 8 hodinovém testu.

## 1.5 Brother

Brother je výrobce vrtacích a závitovacích center. Kompenzace teplotních deformací na těchto centrech se stanovují pouze na základě údajů pohybu vřetene a pohybu v osách stroje X, Y a Z. Podrobnější informace autoři článku u stánku na výstavě EMO 2009 ani webových stránkách nezískali.



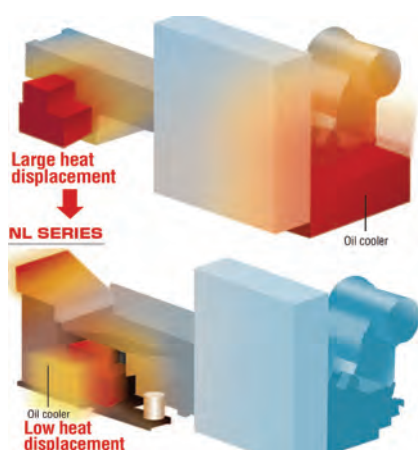
Obr. 8: Efekt kompenzace teplotních deformací fa Brother.

## 1.6 Mori Seiki

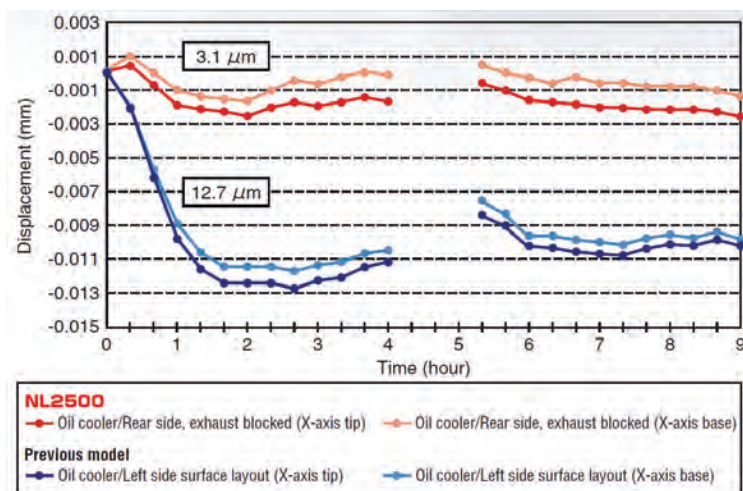
Velmi dobře z hlediska teplotních dilatací jsou řešeny CNC soustruhy řady NL firma Mori Seiki. Eliminace negativních vlivů způsobených sdílením tepla je proto také jednou z hlavních výhod této výrobní řady soustruhů.

Princip odstranění negativních tepelných vlivů je přitom velmi prostý - spočívá v maximální odstranění produkovaného tepla, čehož je dosaženo následujícími řešeními:

- **Vhodné umístění chladiče oleje** - je poměrně běžné, že chladič oleje který je významným zdrojem tepla, je často umístěn v blízkosti vřeten (obr. 9 nahoře, původní varianta soustruhů firma Mori Seiki). Výsledkem je, že se vřeteník teplotně deformuje. U řady soustruhů NL je chladič umístěn v zadní části stroje (obr. 9 dole), což má za následek nízké teplotní dilatace soustruhu. Přemístění chladiče oleje výrazně snižuje teplotní deformace, jak je patrné na obr. 10. Modrá křivka představuje původní umístění chladiče, zatímco červená jeho nové umístění.

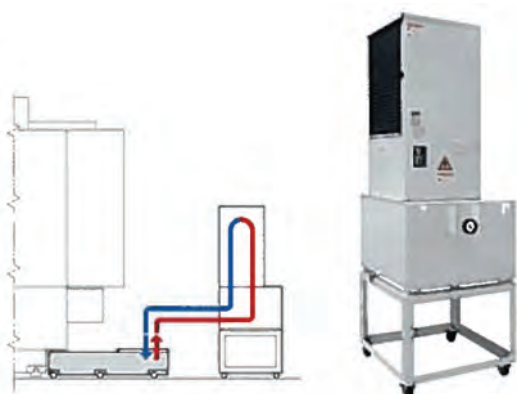


Obr. 9: Teplotní deformace stroje VMC při 8 hodinovém testu.



Obr. 10: Vliv přemístění chladiče oleje na teplotní deformace (převzato z katalogu firma Mori Seiki).

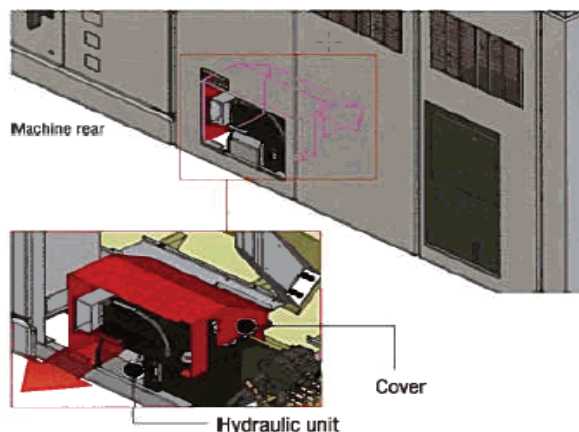
- **Použití oddělené chladicí jednotky** - na místo toho, aby ohřáté chladivo od vnitřních zdrojů tepla cirkulovalo strojem a tím zpětně ohřívalo konstrukci stroje, je ohřáté chladivo vedeno mimo obráběcí stroj. Tím nedochází k nežádoucímu ohřevu konstrukce stroje procházejícím chladivem (obr. 11 vlevo).
- **Odstínění tepelných zdrojů** - platí obecně u strojů firmy Mori Seiki např. odstínění hydraulické jednotky pomocí krytu z plechu (obr. 11).



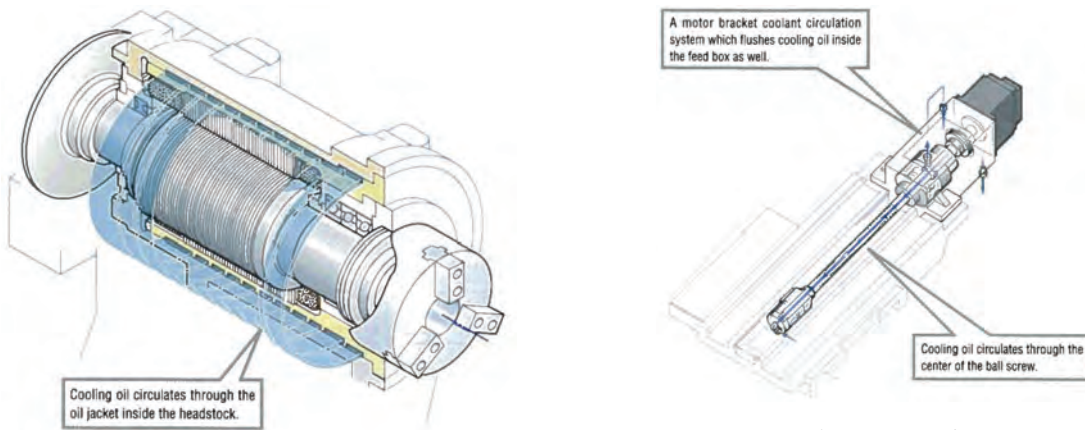
Obr. 11: Umístění chladicí jednotky mimo stroj (vlevo), odstínění tepelného zdroje (vpravo) (zdroj: Mori Seiki).

### Heat-shielding layout

Covering the hydraulic unit prevents heat from being transmitted to the machine.



- **Chlazení jednotlivých komponent** - platí obecně u strojů firmy Mori Seiki např. aktivní chlazení vřetene, kuličkových šroubů, revolverových hlav a dalších konstrukčních skupin (obr. 12).



Obr. 12: Aktivní chlazení fa Mori Seiki (převzato z katalogu).

- Dle zástupce u stánku firmy Mori Seiki je kompenzační algoritmus soustruhu NL 2000 založen na měřených teplotách v 8 různých místech.

## 2 Shrnutí problematiky teplotních kompenzací a teplotní stabilizace

Problematika teplotních deformací strojů je stále aktuální téma, které pálí prakticky všechny výrobce obráběcích strojů. Je zřejmé, že v této oblasti jsou ještě značné rezervy. Firmy které na tomto poli investovaly nemalé prostředky, si své pracně vydobyté "know-how" velmi pečlivě chrání. Sdílnost zástupců se tak omezovala skutečně pouze na základní informace.

V zásadě lze říci, že vypořádání se s výrobními nepřesnostmi způsobenými teplotními vlivy je třeba řešit komplexně. A to od konstrukční fáze až po závěrečné testy na stroji a vytvoření spolehlivého kompenzačního algoritmu.

V konstrukční fázi je třeba především navrhnout teplotně symetrickou konstrukci stroje (mělo by být již standardem), odstínit (tepelně izolovat) zdroje tepla či je umístit mimo zdroj (např. Mori Seiki).

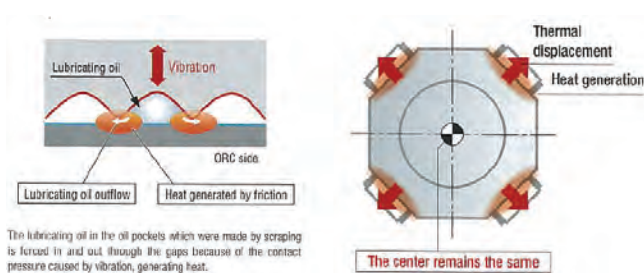
Dále pokud možno aplikovat v maximální možné míře nucené chlazení (míra je samozřejmě závislá na požadované přesnosti stroje a omezena investovanými finančními prostředky na stroj). Chlazení spočívá jak v odvodu tepla z odlitků např. protékané rámy (Yazda), profukování vřeteníku (Haas), tak chlazení významných zdrojů tepla - jedná se zejména o chlazení pohonů a jejich částí (kuličkových šroubů a jejich uložení, vřeten, revolverových hlav atd.).

Vhodnými konstrukčními zásahy a chlazením lze prakticky eliminovat úhlové deformace a výrazně snížit deformace v hlavních pohybových osách. Zbylé deformace v hlavních pohybových osách je nutné řešit spolehlivým kompenzačním algoritmem. Z veletrhu EMO v Miláně je patrný trend, že kompenzační algoritmus je založen na vstupních údajích pohonů (krouticí momenty, otáčky), získaných ze systému stroje (viz např. fa Brother), který může být navíc kombinován s daty z teplotních čidel, umístěných na stroji (Matsura či projekt Next).

### 3 Inteligentní prvky obráběcích strojů

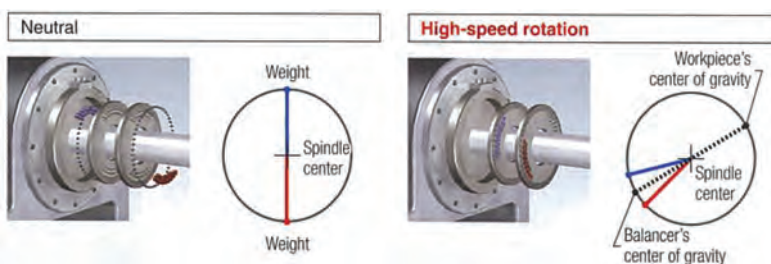
#### 3.1 Mori Seiki

Firma Mori Seiki patří mezi stálice inovativních firem, které posouvají vývoj obráběcích strojů kupředu. Nicméně ze zběžného pohledu nebyly tentokrát žádné převratné novinky viditelné. Firma prezentuje, že neustále zlepšuje svoje již na předchozím EMU prezentované systémy **ORC (Octagonal Ram Construction)**, **DDM (Direct Drive Motor)** a systém automatizovaného vyvažování nesymetrických (nevyvážených) obrobků a že dochází k jejich implementaci na nové stroje.



Obr. 13: ORC - symetrický ohřev vřeteníku (hydrostatické vedení), účinné tlumení vibrací ve dvou směrech

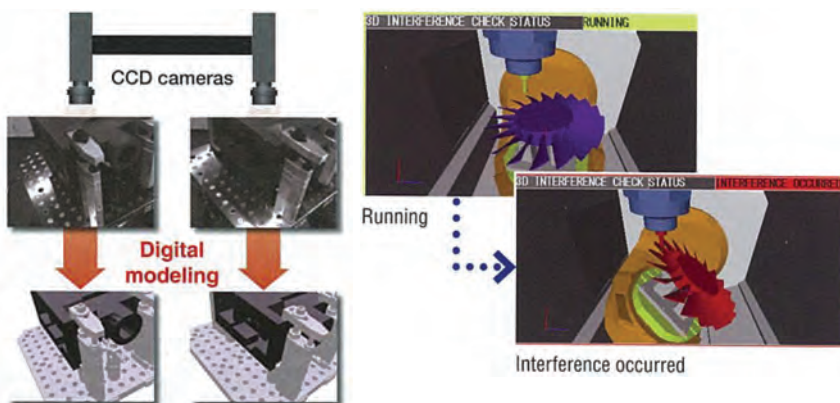
Na obr. 13 je vidět výše zmíněný systém ORC, který umožňuje útlum vibrací ve dvou směrech (energie je mařena v tenké vrstvě oleje hydrostatického vedení). Zároveň díky symetrickému uložení vedení dochází k rovnoměrnému ohřevu vřeteníku (obecně rámu) od provozu tohoto vedení.



Obr. 14: Dovyvážení rotujících částí (obrobku) za provozu (soustruhy)

Na obr. 14 je schema provozního vyvážení nesymetrických obrobků upínaných do vřeteníku soustruhů. Nesymetrické, nebo jinak nevyvážené obrobky způsobují nadměrné vibrace, které vedou ke zhoršení vlastností obrobeného povrchu a snižují životnost ložisek. Po upnutí obrobku dojde automaticky během cca 10 s k vyvážení rotujících částí vzájemným úhlovým natočením vyvažovacích kroužků. K vyvažování dochází iteracemi postupně. Fixace kroužků je zajištěna elektromagnety.

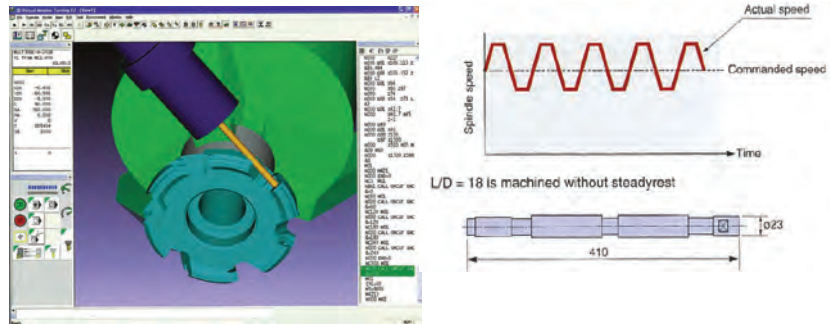
Firma **Mazak** přišla před časem s myšlenkou kontroly kolize nástroje a obrobku (či upínačů a pod.) formou 3D vizualizace, která běží s malým předstihem před vykonáním příslušného bloku a umožní tak v případě zjištěné kolize stroj bezpečně zastavit (**Intelligent Safety Shield**). Tuto myšlenku rozvinula firma **Mori Seiki** ještě dále a do pracovního prostoru umísťuje digitální CCD kamery (systém **Omni-Vision**). Ty umožní sejmoutí aktuálního stavu v pracovním prostoru a digitalizovaná data zasílají do vyhodnocovacího SW (**3D interference checking function**). Do systému lze jednoduše hrát z webu 3D modely nástrojů i s upínači.



Obr. 15: Vznik modelu pracovního prostoru pomocí kamer, SW 3D interference check

### 3.2 Okuma

Obdobný systém kontroly kolize nástro - obrobek jako výše zmíněné firmy má i firma Okuma. Neběží ovšem v reálném čase v řídicím systému, ale kontrolu kolize lze provést předem v kanceláři CAD - CAM. Tyto kontroly umožňuje většina CAM programů, ovšem firma Okuma deklaruje naprostou vernost běhu NC kódu a simulace pohybů stroje. Příklad screenu programu 3D virtual monitor je vidět na obr. 16 vlevo.



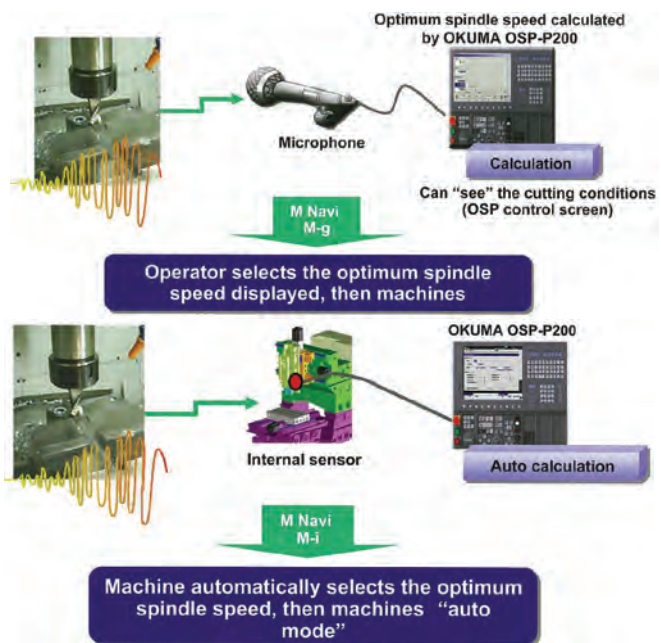
Obr. 16: 3D virtual monitor od firmy Okuma, potlačení chatteru při soustružení stíhlých hřídelí

Na obr. 16 vpravo je další z užitečných "fíglů" jak zabránit samobuzenému kmitání při soustružení stíhlých hřídelí. Aby nedošlo k vybuzení rezonance, neobrábí se konstantní rychlostí, ale otáčky se postupně zvyšují a opět snižují. Budící síly jsou tak "rozestřeny" a vznik samobuzených kmitů tak může být potlačen.

Obdobně se předchází samobuzeným kmitům i při řezání závitů, kde jsou otáčky svázané s posuvem. Firma Okuma nabízí synchronizovanou změnu otáček s posuvem. Opět jsou pak "rozestřeny" budící síly.

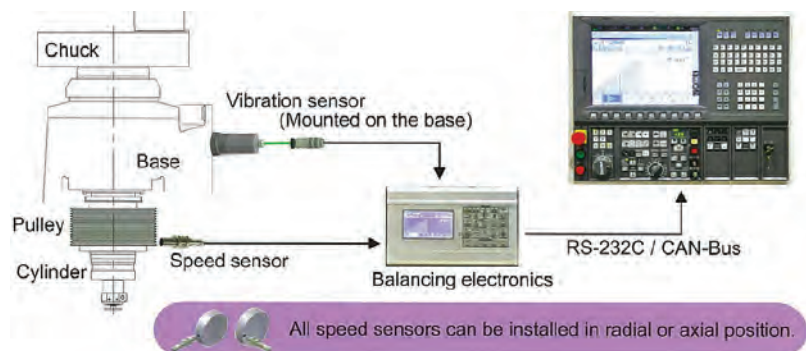
Firma Okuma také jako jedna z mála nabízí adaptivní řízení řezného procesu a to ve dvou formách. Systém **M Navi M-g** (g - guidance) snímá externím mikrofonom se směrovou charakteristikou emisi hluku z obráběcího procesu a pokud dojde k počátku vzniku samobuzeného kmitání upozorní obsluhu a nabídne jí možnou změnu řezných podmínek tak, aby k nadměrným vibracím degradujícím kvalitu obrobku nedocházelo.

Naproti tomu systém **M Navi M-i** (i - intelligence) zpracovává data z akcelerometru (bližší údaje se bohužel nepodařilo zjistit) a v automatickém módu změní otáčky vřetene tak, aby se nadměrné vibrace negenerovaly. Princip obou systémů je patrný z obr. 17. Takto mohou být vybrány optimálně vysoké řezné podmínky. Firma tvrdí, že efektivita obrábění se může zvýšit až o 50%. Systém je efektivní zejména u nástrojů s velkým počtem břitů.



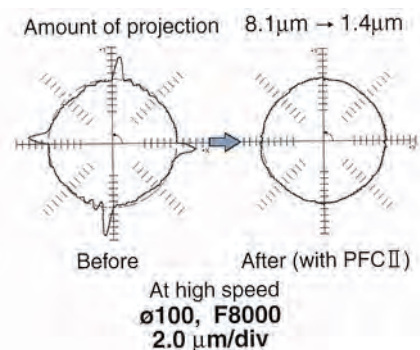
Obr. 17: Systémy potlačení samobuzených kmitů při frézování (M Navi M-g - nahoře a M Navi M-i - dole)

Na obr. 18 je znázorněno schéma měření nevyváženosti rotačních obrobků typu disk (kladka, polotovary ozubených kol a pod.) Tyto tvarově složité a často nesymetrické součásti se vyrábí na soustružnických automatech s integrovanými frézovacími vřeteny a ve finále obrábění jsou vzhledem k nesymetrii značně nevyvážené. Aby se součást nemusela uvonit z upnutí a převést na vyvažovačku, zde



Obr. 18: Schéma měření tepelné deformace.

přeměřit, znovu upnout a odvrátit přebytečný materiál, umožňuje firma Okuma tyto operace provést za jednoho upnutí na původním stroji. Měření je realizováno v kooperaci s firmou MPM, jejíž přístroj BMT230M zpracovává data z akcelerometru upevněného na vřeteník soustruhu. Data jsou vyhodnocena, je vypočten potřebný odběr materiálu na uživateli navoleném roztečném průměru a je spočítán příslušný úhel (natočení osy c). Stroj již spočte potřebný posuv, napoložuje osu a odvrátá ve vypočteném místě potřebnou hmotu materiálu. Zařízení je využitelné především v sériové výrobě. Předpokladem je dokonale vyvážený vřeteník (bez upnutého obrobku). Screen přístroje BMT230M je zobrazitelný přímo v ŘS, jako další uživatelská obrazovka.



Obr. 19: Omezení kvadrantových chyb; OKUMA - PFCII

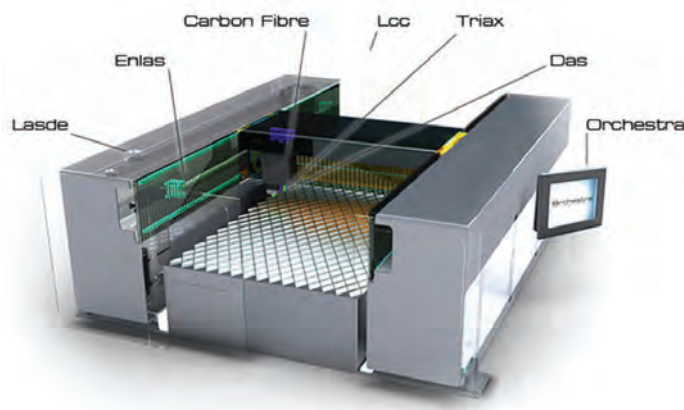
Firma Okuma dále prezentovala kompenzaci kvadrantových odchylek. Bohužel nevedla žádné detaily k tomuto řešení.

### 3.3 Mazak

Firma Mazak vsadila v období světové finanční a hospodářské krize na šetření provozních nákladů stroje. Osvětlení pracovního prostoru je realizováno LED diodami, na panelu řídicího systému je čidlo přítomnosti obsluhy a to kontroluje osvětlení stroje. Při delší době nečinnosti je aktivován "stand-by" stav stroje. Zůstaly zachovány systémy Active Vibration Control, Intelligent Thermal Shield, Intelligent Safety Shield, Voice Adviser a Intelligent Performance Spindle.

### 3.4 Sintesi

Zajímavě ucelené portfolio mechatronických prvků z hlediska senzoryky a sw přinesla italská firma Sintesi. Schematicky je vše znázorněno na obr. 20. **Lasde** je laserová měřicí hlava pro měření statických deformací, **Enlas** je laserový enkodér (měření dynamických deformací), **Triax** je tříosý kapacitní akcelerometr s integrovaným zpracováním dat a vnitřní pamětí, **Das** je šestiosý kapacitní akcelerometr (tříosý pro lineární pohyb a tříosý pro natočení). **LCC** je sw pro predikci a organizaci údržby strojů a diagnostiky a **Orchestra** je otevřený řídicí systém, který je schopen údajně řídit složité úlohy a snad dokonce i obráběcí stroj (zda komunikuje s původním ŘS obráběcího stroje a je jakousi nadstavbou a nebo převezme plně úlohu ŘS se bohužel nepodařilo zjistit). Dále firma nabízí poradenství v oboru mechatroniky, mj. i při návrhu komponent z uhlíkových vláken.



Obr. 20: Ucelená nabídka produktů firmy Sintesi

Protože obsah jednotlivých kapitol se částečně prolíná, doporučujeme čtenáři prolistovat také kapitoly "Měření vlastností obráběcích strojů, metody a přístroje pro měření"

## 4 Adaptivní řízení

Nejenže se na výstavě EMO 2009 v Milánu neobjevilo v této oblasti nic nového, ale EMO 2009 se ani nezúčastnili hlavní protagonisté v této oblasti jako jsou firmy **OMATIVE systems**, **Brankamp**, **Promotec** atd. Pouze malým (v podstatě informačním) stánkem se zúčastnila firma **Artis**, která spojila své aktivity s firmou **Marposs**, přičemž italská firma **Marposs** se sama rovněž neúčastnila s prohlášením, že firma **Marposs** nic zásadního nového nemá a ostatní konkurenti, že na EMO 2009 nejsou, protože šetří z důvodu světové finanční krize.

V adaptivním řízení tedy platí stav, který je popsán ve sborníku z minulé EMO výstavy z Hannoveru.