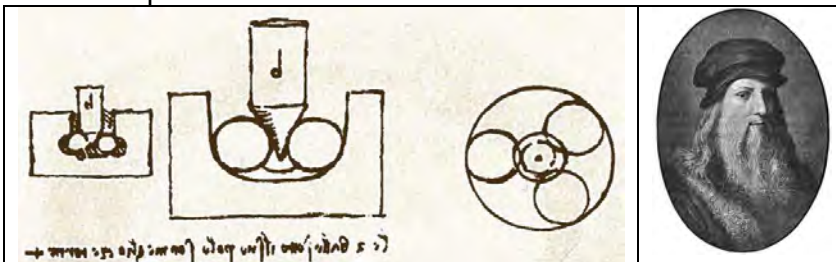


Pohony posuvů NC strojů podle EMO 2009 v Miláně

Pavel Souček, Jan Moravec

Informaci o **EMO 09** v Miláně nemůžeme začít jinak, než zmínkou o Leonardovi da Vinci, který zde pobýval v období 1482 až 1499 a napodruhé 1506 až 1513. I on zasáhl do oblasti

zpracování kovů svými návrhy fréz, strojů na řezání závitů, broušení šicích jehel a zabýval se tažením a navíjením drátů. Znamé jsou i jeho nákresy kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem. Odvážně též popřel perpetuum mobile, což mohlo být



v jeho době a zvláště na italské půdě považováno za kacířské zpochybňování schopností Boha.

Všeobecný dojem z výstavy

Speciální zastoupení pohonů jakožto samotných stavebních prvků bylo na výstavě velmi malé a jedinou větší expozici (i když oproti minulosti jen částečně inovovanou) předvedl **Fanuc**. Firmy si uvědomují, že zákazníka (uživatele NC stroje) nezajímají odborná kritéria a vysoké parametry samotných pohonů, nýbrž konečný výsledek jejich instalace na stroji, tj. obrobek a jeho přesnost, kvalita povrchu, technologický čas a s ním spojená cenová hlediska atd. O kvalitách pohonů se bylo možno přesvědčit jen nepřímo na předváděných strojích v chodu "pod třískou", který byl na výstavě samozřejmostí. V tomto směru jako obvykle dominoval **Haas**, jehož expozice vzbuzovala podezření, že na půdě výstavy jede komerční výroba.

Vystavovatelé strojů většinou zredukovali množství uváděných parametrů a na rozdíl od nedávných výstav, kde se předháněli v údajích o velikostech rychloposuvů, zrychleních atd., byla nyní nejdůležitějším údajem velikost pracovního prostoru a demonstrace "typického obrobku". Např. v celém rozsáhlém speciálním žurnálu firmy DMG jsme nenalezli jedinou (a dříve tak oblíbenou) zmínku o možných osových zrychleních!!!

Demonstrační aplikace a obrobky byly jako dříve hlavně "pětiosé" (kompresorová kola, lopatky). Nově ale přistoupily ortopedické a dentistické implantáty (klouby, náhrady lebečních kostí atd.), což je nová forma reklamní strategie, hraničící s citovým nátlakem, která jistě zapůsobí na zákazníky z řad přestárlé evropské civilizace. V tomto směru se vývoj ubírá k souběhu chirurgické operace a výroby příslušné náhražky "on line" počínaje skenováním kostí pacienta na operačním stole.

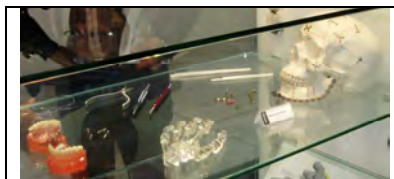
Protože Miláno leží v zemi, kde cyklistický sport je ikonou, nemohly chybět ani ukázky příslušných obrobků z titanu, kombinace kov - kompozit atd. Závodní kolo je dnes po technologické stránce stejně tak špičkovým výrobkem jako moderní letadlo.

Oproti poslední výstavě byly méně četné robotické manipulace u obráběcích strojů, zaujal ale největší robot **Fanuc M2000iA** s nosností 1200kg. Téměř úplně vymizely obráběcí stroje s paralelní kinematikou. Lze ale pozorovat rozšiřování velkých synchronních servomotorů do oblastí tvářecích strojů.

Pro doplnění obrazu o vývoji pohonů uvedeme v dalším textu i několik zajímavostí z výstavy pohonů a řídicí techniky **SPS/IPC 11/09** v Norimberku.

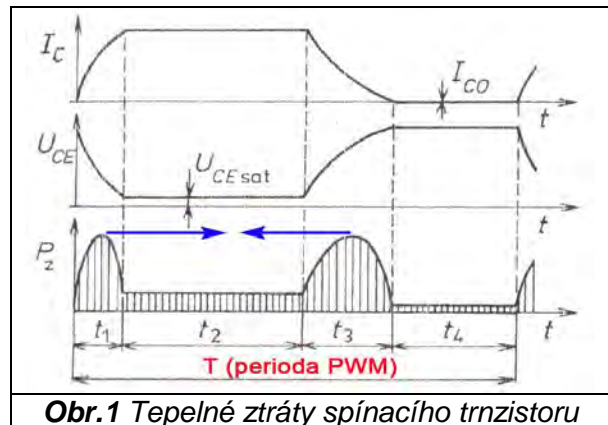
Nosné téma v pohonech - úspory energie

Ekologická hlediska byla ještě nedávno podceňována, nyní se z nich ale stává reklamní slogan. Možná i z těchto důvodů nebyly tentokrát lineární pohony se svými proudovými nároky prezentovány na strojích tak výrazně jako dříve. Úspory elektrické energie v měničích souvisejí s



kvalitou spínacích tranzistorů a s modulačním kmitočtem - viz **obr.1**. Ztracený výkon (součin napětí a proudu kolektor - emitor) v otevřeném i uzavřeném stavu tranzistoru sice není podstatný (časové úseky t_2, t_4), ale hlavní tepelné ztráty

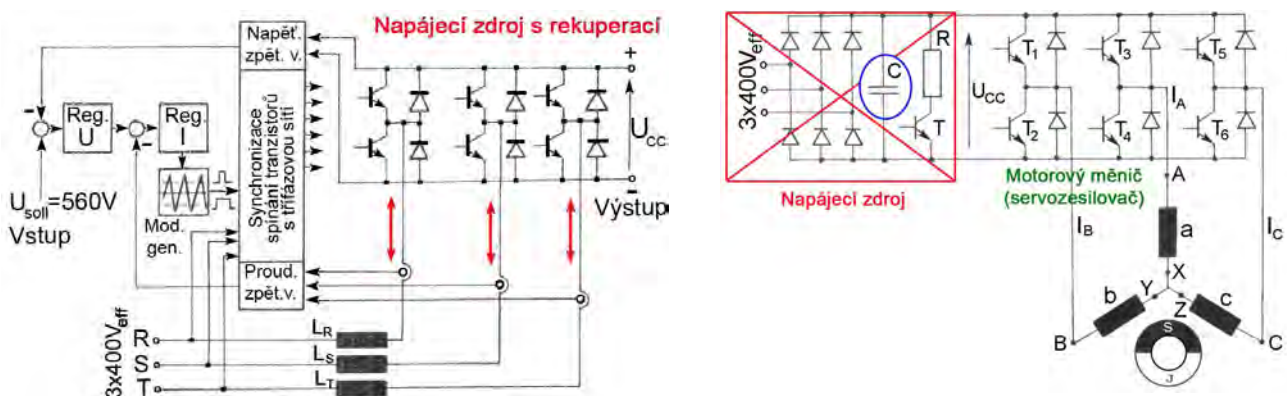
nastávají v přechodových úsecích t_1, t_3 , které by měly být co nejkratší, takže rostou požadavky na rychlost reakce tranzistorů. Se zvyšováním kmitočtu PWM klesá dopravní zpoždění v regulaci proudu, čímž se zvyšuje její kvalita (propustné pásmo), ale na druhé straně se výkonové špičky přibližují a tepelné ztráty rostou. Některé firmy řeší toto dilema **přizpůsobováním modulačního kmitočtu**. Při nižších nárocích na kvalitu regulace je použit nižší kmitočet, v opačném případě vyšší i za cenu vyšších tepelných ztrát (např. **Fanuc** až do 12kHz). U motorů menších velikostí jdou výrobci měničů na kmitočty přes 50kHz.



Obr.1 Tepelné ztráty spínacího tranzistoru

Rekuperace proudu do sítě při generátorickém režimu motoru není principiální novinkou a v současné době se jedná spíše o zkvalitnění její součástkové základny. Realizace rekuperačního zdroje pomocí reciproké funkce motorového měniče je používána mnoho let - viz jedno z možných zapojení na **obr.2** vlevo (vpravo je starší verze zdroje bez rekuperace i s motorovým měničem). Třífázová síť R, S, T je přes tlumivky připojena tam, kde je u motorového měniče připojen motor svorkami A, B, C . Výstupní veličinou je stejnosměrné napětí U_{CC} , řízené zpětnou vazbou s PI regulátorem napětí. Napěťová vazba je zde úplnou obdobou rychlostní zpětné vazby motoru, proudová zpětná vazba (rovněž s PI regulátorem) je stejná jako u motorového měniče. Spínací tranzistory jsou koordinovány třífázovou sítí tak, aby při $U_{CC} < 560V$ tekly proudy ze sítě ke stejnosměrnému výstupu, při $U_{CC} > 560V$ naopak. Velikost proudů je řízena střídou spínání tranzistorů v taktu modulačního generátoru. Červeně orámovaná část v pravém obrázku při použití rekuperačního zdroje odpadá, kondenzátor C může být zachován pro výpomoc při proudových špičkách.

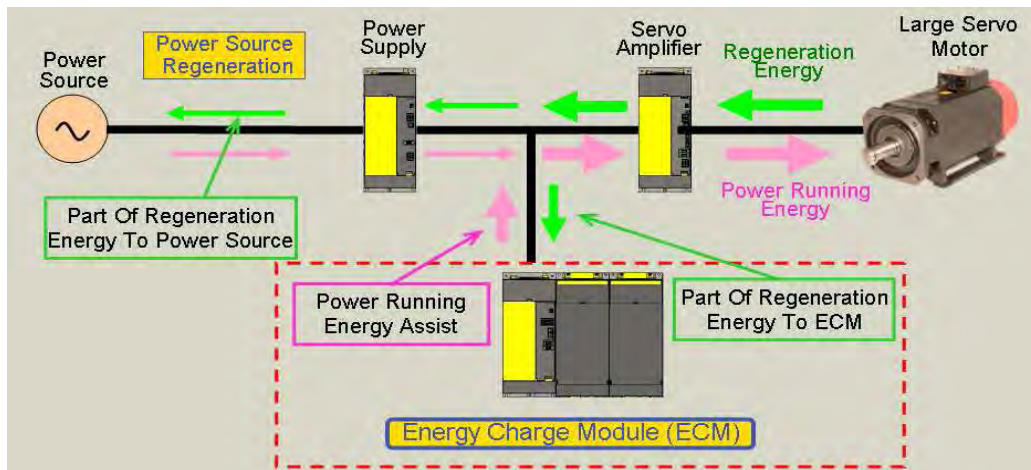
Poznámka: S použitím tzv. superkondenzátorů není problémem vtěsnat dříve nemyslitelnou kapacitu v tisících μF do rozměrů, odpovídajících napájecímu modulu střední velikosti. Rozhodující veličinou je velikost povrchu elektrod. Dnes je možno s jedním gramem speciálního uhlíkového prášku naneseného na hliníkové fólii dosáhnout plochu $2000m^2$.



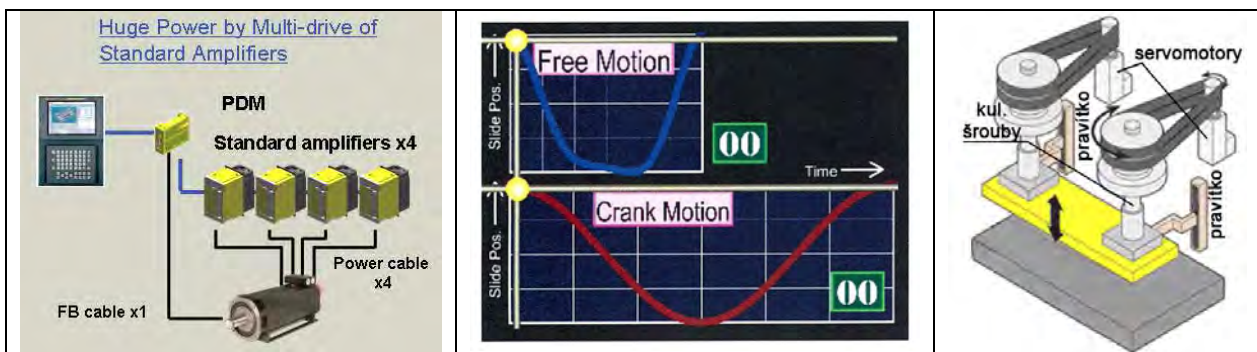
Obr.2 Rekuperační zdroj (vlevo), zdroj bez rekuperace a motorový měnič (vpravo)

Úspory energie při rekuperaci jsou citelné u pohonů včetně a obecně u extrémně velkých motorů. Např. u motoru **Fanuc Largo** (max.5500Nm, 2000ot/min, 530kW, viz **obr.3**) se úspory udávají až 50%. Rekuperační obvod doplňuje kondenzátorová jednotka (Energy Charge Module) s kapacitou $50000 \mu F$ (!!!). Tyto motory s robustními kuličkovými šrouby se začínají prosazovat i v tvářecích strojích a vzniká nová kategorie tzv. **servo - lisů** (koncepte "**Free Motion**" - **Burkhardt, Enomoto, Komatsu**), kde lze účelově a přesně programovat časový průběh síly i zdvihu s přesností v μm - viz **obr.4**. Byly již realizovány velikosti 25 000kN (**Amino**). Oproti mechanickým

klikovým (crank) lisům se udává až poloviční čas cyklu. Obrázkem zdvojeného pohonu u "dvoubodového" lisu plynule přecházíme do další kapitoly.



Obr.3 Schéma rekuperace **Fanuc**



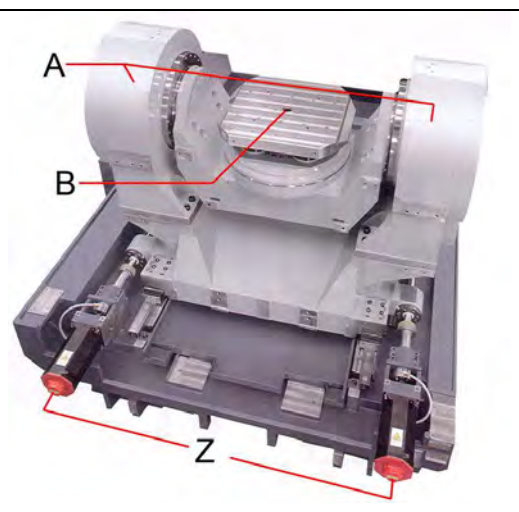
Obr.4 Uplatnění synchronních motorů **Largo** u lisů

Zdvojování motorů

Starší pamětníci si jistě vzpomenou na výkonný soustruh **SU50** z 50.let 20. století se dvěma **asynchronními** motory v pohonu vřetena. Uspořádání posuvové osy se dvěma paralelními motory a šrouby (obr.4,5,6) nebo se dvěma pastorky na jednom ozubeném věnci není rovněž konstrukční novinkou, ale zdvojování pohonů obecně se rychle šíří i jinak, např. do kolébek s prstencovými motory nebo dokonce do **synchronních** pohonů vřeten - viz obr.6,7.

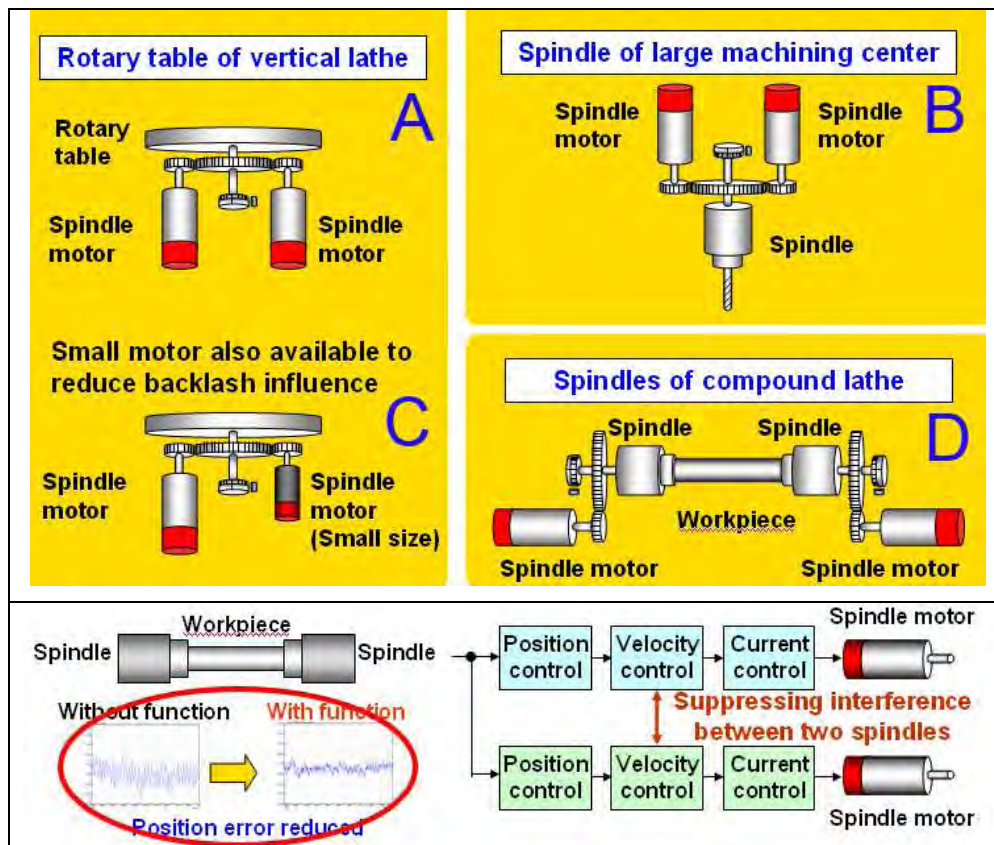


Obr.5 Čtyřosé horizontální centrum **MCM**



Obr.6 Kolébka **Mori Seiki**

Fanuc demonstroval experimentální vřeteno se dvěma motory a řemenovými převody na 180° . Radiální síly na ložiska od řemenů (nebo v případě obr.7B od ozubených kol) se navzájem ruší.



Obr.7 Variace na téma zdvojování pohonů (Fanuc)

Paralelní chod dvou motorů má více výhod, z nichž zdůvodníme alespoň dvě:

A) Přibližně lze říci, že krouticí moment synchronního motoru roste se druhou mocninou průměru vzduchové mezery mezi statorem a rotorem, kdežto moment setrvačnosti rotoru s mocninou čtvrtou a obě veličiny s první mocninou délky rotoru:

$$M_K = konst \cdot L \cdot D^2, \quad J_M = konst \cdot L \cdot D^4$$

Nahradíme-li původní jediný motor s průměrem rotoru D dvěma motory s průměrem $D_1 = D/\sqrt{2}$, celkový krouticí moment zůstane zachován:

$$M_K = konst \cdot L \cdot D^2 = 2M_{K1} = 2 \cdot konst \cdot L \cdot D_1^2$$

Hmotový moment setrvačnosti rotoru u každého z obou menších motorů ale bude čtvrtinový:

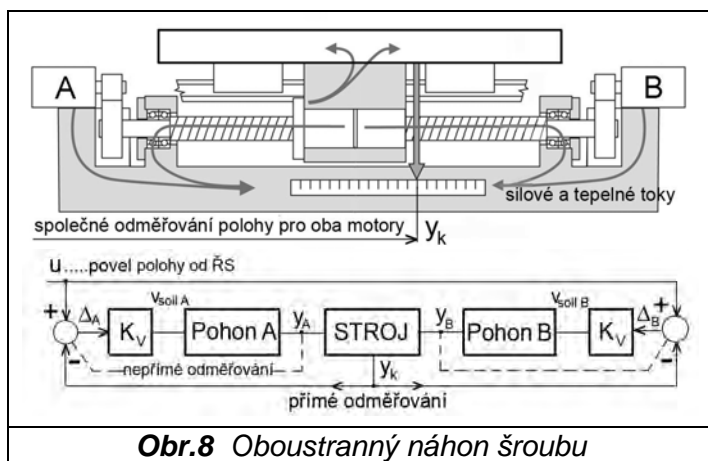
$$J_{M1} = konst \cdot L \cdot D_1^4 = konst \cdot L \cdot D^4/4 = J_M/4, \quad \text{takže} \quad J_{CELK} = 2J_{M1} = J_M/2$$

Ve výsledku dojde ke **zmenšení setrvačných hmot**, příslušejících oběma motorům, na polovinu. Tím se zvýší dynamika posuvové osy stroje a potažmo i kvalita regulace.

B) Krouticí moment celého motoru je úměrný první mocnině proudu I , ale Jouleovy ztráty, ohřívající vinutí s odporem R , rostou s mocninou druhou: $Q = RI^2$. Použijeme-li dva motory v paralelním chodu s polovičním proudem $I_1 = I/2$, zůstane celkový moment zachován, ale celkové tepelné ztráty, vyvinuté oběma motory, budou poloviční:

$$Q_C = 2Q_1 = 2RI_1^2 = RI^2/2 = Q/2$$

Obě úvahy jsou sice přibližné, ale přesto hovoří pro výhodnou náhradu jednoho motoru dvěma slabšími. Bez bližšího teoretického zdůvodnění uvedeme nejpodstatnější výhodu, kterou je **redukce parazitních kmitů mechanické konstrukce**, umístěné mezi oběma pohony a její "elektrické vyztužení". Z těchto důvodů se jeví výhodný **oboustranný náhon kuličkového šroubu**, který je již delší dobu teoreticky a experimentálně zkoumán i ve **VCSVTT**. Polohové vazby obou motorů, pracujících v paralelním režimu, využívají společné pravítka podle **obr.8**, nebo snímače na motorech.



Obr.8 Oboustranný náhon šroubu



Obr.9 Čtyřosé centrum **MCM**

Nabídka ke společnému vývoji stroje s touto koncepcí nebyla v minulosti našimi výrobci bohužel akceptována. Ukazuje se ale, že princip je

životaschopný - viz stroj italské firmy **MCM** na **obr.9**.

Na zkušebním standu **VCSVTT** bylo ověřeno, že tímto způsobem je možno částečně nebo i úplně potlačit všechny liché tvary kmitů posuvové osy, což v důsledku umožnilo zvýšit zesílení K_V polohové

regulace 2,5-krát, viz záznam měření na **obr.10**.

Červené křivky platí pro klasický jednostranný náhon šroubu, zelené pro oboustranný. Výrobní náklady na toto uspořádání nemusejí proti případu s jedním motorem dramaticky narůst, uvážíme-li, že ze silového hlediska postačí dva motory s přibližně polovičním momentem. Šroub nedozná podstatné změny a narostou pouze náklady na spojky a vložené převody, ale i ty vyjdou laciněji, neboť mohou být dimenzovány méně. Přínosem této koncepce je symetrizace nejen silových, ale i tepelných toků z motorů do rámu stroje.

Patentovým průzkumem bylo zjištěno, že oboustranný náhon šroubu je chráněn (ale jen v Japonsku) firmami **Kitamura** (oba motory shodné) a **Mori Seiki** (různé motory i různé vložené převody).

Další postřehy (**EMO** i **SPS/IPC**)

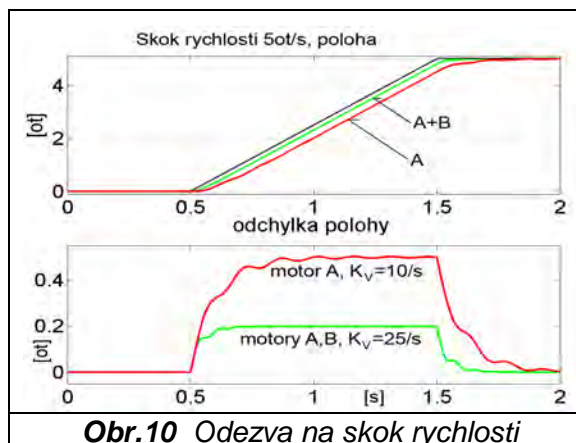
Siemens předvedl novou řadu kompaktních synchronních servomotorů **1FT7**, které jsou díky úspornému způsobu vinutí statoru asi o 30% kratší než **1FT6**. Udává se zlepšená rovnoměrnost chodu, čtyřnásobná přetížitelnost, antivibrační montáž encoderu (v provedení sin-cos 2048 period/ot, s inkrementálním výstupem 4Mio/ot), chlazení přirozené, vodní i nucenou ventilací, na přání montáž planetové převodovky, napájení a digitální komunikace s měniči **Sinamics S210**, oba konektory lze směrově orientovat podle potřeb při zástavbě motoru.

Jsou k dispozici dvě provedení:

- **1FT7 CT** (**c**ompact) má větší moment setrvačnosti a tím i rovnoměrnější chod, což zaručuje lepší kvalitu povrchu při obrábění;
- **1FT7 HD** (**h**igh **d**ynamic) se zmenšeným momentem setrvačnosti pro extrémní dynamické požadavky u tiskařských, textilních, balicích strojů atd.

Svoji řadu lineárních motorů doplnil **Siemens**

již před více než rokem o motory **1FN6** (viz **obr.11**), které mají vinutí i permanentní magnety pouze v primárním dílu. Sekundární díl je jen z pasivního železa s vyniklými zuby, takže u větších délek vychází podstatně laciněji, než u verze s magnety. Jedná se o lineární analogii k tzv. reluktančním motorům s magnety, kde dochází k řízené interakci magnetických polí cívek a magnetů přímo v primárním dílu. Maximální síla největšího motoru (při čtyřnásobném přetížení) je 8000N, rychlost do 4,5m/s, u menších



Obr.10 Odezva na skok rychlosti



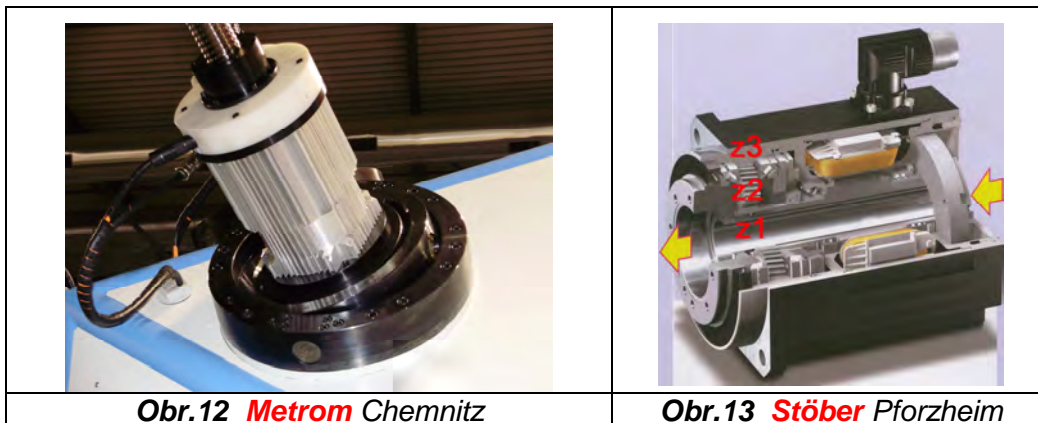
Obr.11 Lineární motor **Siemens 1FN6**

Maximální síla největšího motoru (při čtyřnásobném přetížení) je 8000N, rychlost do 4,5m/s, u menších

motorů 9m/s. Rozměry primárního dílu jsou poněkud větší než u motorů 1FN1. Napájení se opět děje pomocí měniče Sinamics S210, který komunikuje přes sběrnici Drive-CLiQ s externím modulem SME, do něhož je připojen komutační snímač a lineární odměřovací pravítko. Chlazení je pouze vzduchem, **odpadají dřívější starosti s krytováním celé délky sekundárního dílu**. Lze očekávat výhodné uplatnění zvláště u rozměrných (dlouhých) aplikací (manipulace, řezání plechů atd). Sekundární díl se dodává v modulech o délce 200mm.

Průvlekové motory v Kardanově závěsu s kuličkovými šrouby použila firma **Metrom Chemnitz** (**obr.12**) u svého obráběcího stroje s paralelní kinematikou (jednoho ze dvou, které se autorovi na **EMO** podařilo najít).

Fy. **Stöber** (výstava **SPS/IPC 11/09**) u svých motorů s planetovými převodovkami typu 2K-U (až ve třech stupních s převody 3-9-27) uvádí nový, tzv. orthocyklický lineární způsob navíjení cívek statoru, který umožnil zvýšit koeficient plnění vinutí a tím údajně zdvojnásobit krouticí moment, resp. dvojnásobně zkrátit stavební délku motoru. Tyto "superkompaktní" motory (**obr.13**) mají dutý vstupní hřídel (ϕ díry 28 a 38mm) a robustně uloženou výstupní přírubu unašeče, takže jsou vhodné pro širokou škálu možností zabudování do stroje. Přední část statoru je možno vybavit obvodovým kanálem pro kapalinové chlazení. Vůle převodovky se udává max. 4 arcmin, vstupní otáčky 3000/min, výstupní momenty do 500Nm. Převod v jednom stupni je $1 + z_3/z_1$.



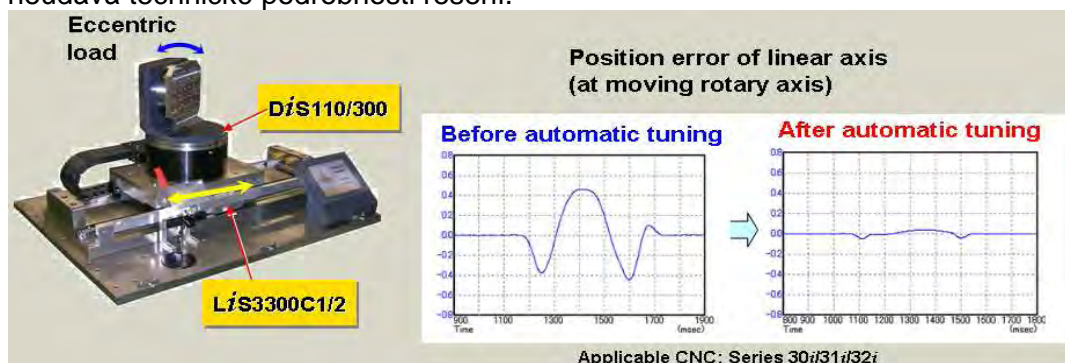
Obr.12 Metrom Chemnitz

Obr.13 Stöber Pforzheim

Lineární motory: **THK** uvádí maximální rychlost 12m/s, 9g, **Fanuc** u samotného motoru 30g.

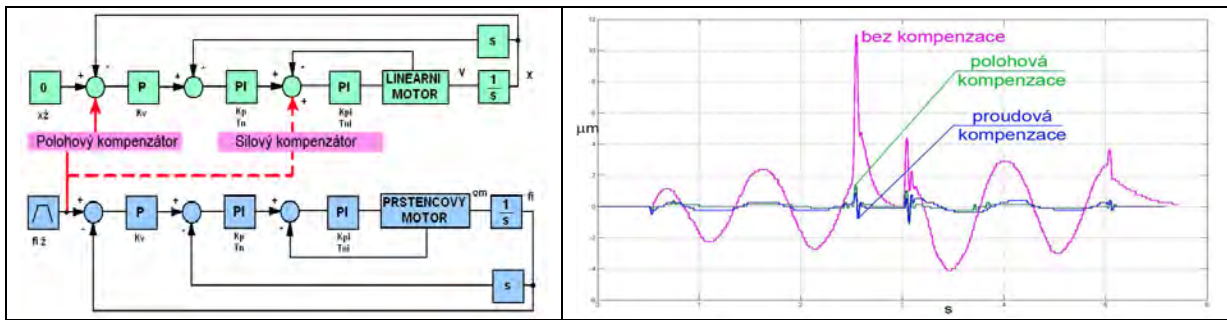
Prstencové motory: největší velikosti tradičně **Etel**, max. ϕ 1260mm, 31200Nm.

Vzájemné dynamické ovlivňování spoluinterpolujících os je problémem zvláště u čtyř- a pětiosých strojů s lineárními motory, které vykazují všeobecně nižší dynamickou tuhost polohové regulace. Řídící systémy **Fanuc** mohou být vybaveny automatickou kompenzací vlivu nevývahy při součinnosti prstencového a lineárního motoru - viz **obr.14**. Naladění na konkrétní nevývahu se děje automaticky, chyba polohy nosného lineárního motoru klesne údajně až 10krát. Výrobce jako obvykle neudává technické podrobnosti řešení.



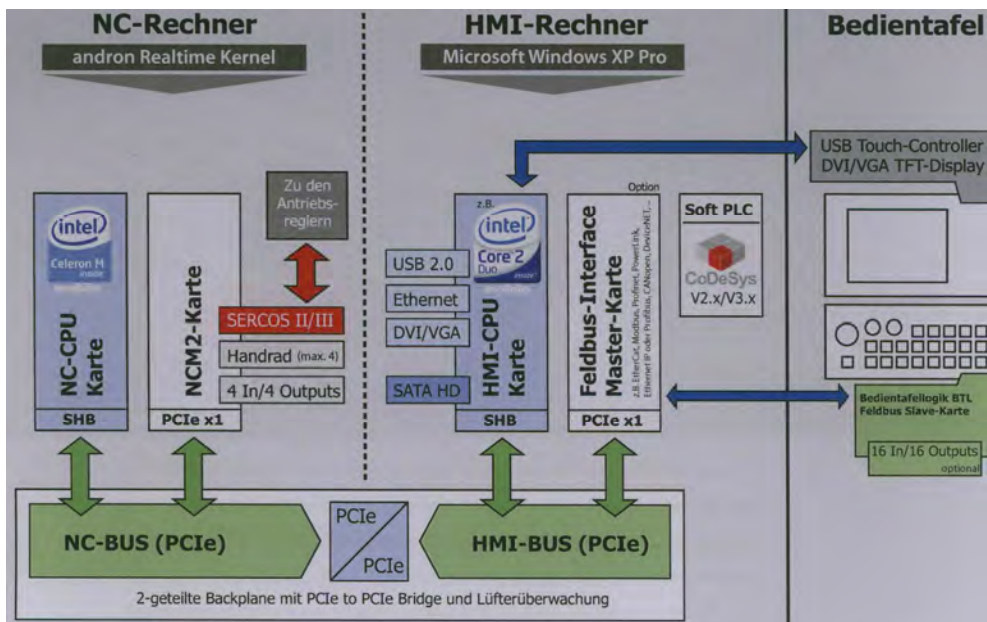
Obr.14 Kompenzace vlivu odstředivých sil (Fanuc)

Výzkum tohoto problému probíhá i ve **VCSVTT** dvěma způsoby - viz **obr.15**. Ze zadané polohy prstencového motoru je on-line vypočítávána odstředivá síla nevývahy a její průmět do směru pohybu lineárního motoru. Přes matematický model je kompenzační signál přiváděn přímo na regulátor proudu, nebo (v případě, že na něj nemá uživatel přístup) na regulátor polohový. Obě metody dávají slibné a navzájem srovnatelné výsledky - viz měření na obrázku vpravo.



Obr.15 Dva možné způsoby kompenzace (VCSVTT)

Řídicí systémy: z pohonařského hlediska je zajímavý multiprocessorový systém **Andronic 3060** firmy **Andron**: je schopen řídit až 16 současně interpolujících os při 30m/min a rozlišení $0,1\mu m$, takt polohové regulace $125\mu s$ (protokol **SERCOS**), tzv. pikointerpolace od $1 \cdot 10^{-4} mm$ do $0,6 \cdot 10^{-9} mm$.



Obr.16 Řídicí systém Andronic 3060

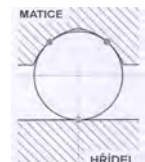
Pohybové šrouby

Vývoj šroubů pokračuje obvyklými cestami (vrtání s chlazením, keramické kuličky, hloubková nitridace šroubu, hydrostatika).

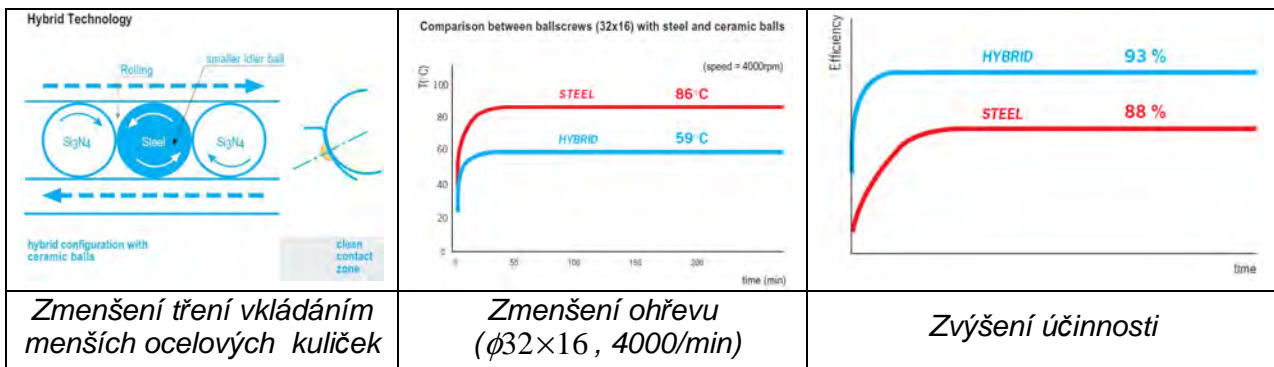
NSK udává u silně nadčtvercového hybridního šroubu $\phi 40 \times 80$ s keramickými kuličkami (materiál kuliček Si_3N_4) maximální rychlost 240m/min;

Mannesmann: celocelové kuličkové šrouby o průměrech 25 ÷ 160mm do délek 12 m (na přání až 15 m) a stoupání do 40mm. Hloubkovou nitridací je dosažena tvrdost povrchu HV900 (odpovídá 67HRC), pevnost jádra až $1000N/mm^2$, součinitel $n \times d = 200000$, max. 150m/min. Teleskopické čtyřstupňové šrouby mají výsuvný poměr 1:3,6.

KŠ Kuřim předvedl vtipné zjednodušení šroubu pro silově nenáročné aplikace (tzv. "bezprofilové provedení"), mající závit jen v matici. Šroub je nahrazen kalenou a broušenou válcovou tyčí, po které šplhá matice jen pomocí třecích sil. Lze si představit elegantní a levnou aplikaci řízení polohy s odměřováním pomocí pravítka, ale raději v horizontální poloze.



Umbra: hybridní šrouby max. 180m/min, zrychlení na suportu 5g, otáčkový součinitel $n \times d = 250000$. Pokles spotřeby maziva se udává 50%, většinou není nutné chlazení. Firma nabízí i průvlekové synchronní motory se svými šrouby a s maximální silou 4000N při rychlosti až 180m/min.



Obr.17 Vliv keramiky u kuličkových šroubů **Umbra**

Hyprostatik (hydrostatické šrouby a jejich radiálně-axiální uložení, **obr.18**): jmenovité průměry 40 ÷ 200mm, maximální délka až 4m (podle průměru), stoupání 8 ÷ 50mm/ot (podle průměru), 4 ÷ 6 chodů, axiální výrobní mezera 30 ÷ 70 μm , napájecí tlak max.160bar. Vrcholový úhel lichoběžníkového profilu 40° umožňuje i mírné radiální zatížení, např. gravitační silou převislého konce šroubu.

Příklad aplikace:

Šroub-matice: Jmenovitá velikost 50 (vnější ϕ 52mm, jádro ϕ 36mm, plocha jádra 10,2cm²), stoupání 20mm/ot, 4chody, činná plocha 8,1cm²/chod, axiální únosnost 10kN při tlaku 63bar a 50% rezervě, spotřeba oleje 2,8l/min při 40°C, dovolené otáčky 3250ot/min (65m/min), tuhost matice 1000N/ μm ;

Ložisko: axiální únosnost 13,8kN (při 50% rezervě), spotřeba 1,9l/min při 40°C, tuhost 2000N/ μm .



Obr.18 Šroub **Hyprostatik**

Uvažujeme-li např. délku 1m a pro namáhání v tahu a krutu odhadneme přibližný průměr 40mm, jednoduchým výpočtem tahové a redukované krutové tuhosti vychází tuhost celé posuvové osy 180N/ μm . Rozdělení deformací bude v poměru tah 65%, redukovaný krut 8%, ložisko 9%, matice 18%.

Dle údajů firmy je možné dosáhnout při stoupání 30mm/ot rychlost až 120m/min. U plně hydrostatického křížového stolu nepřesáhla chyba kruhové interpolace hodnotu 0,1 μm .

... a závěrem ...

...jeden z nejhezčích exponátů na **EMO 09:**

Osmiosá (až devítiosá) nástrojařská frézka **Deckel** (sice bez číslicového řízení, ale s fotoelektrickým odměřováním):

- základní kartézský systém X-Y-Z1 (ruční i strojní posuv)
- naklápěcí vřeteník B2
- výsuvná pinola Z2 (ruční klika)
- otočný a naklápěcí stůl v osách A, B1, C1.

Devátá osa (přídavný otočný stůl C2) není zobrazena.

