

# Řízení vysokootáčkových synchronních strojů (2. část – dokončení)

Jaroslav Novák, Martin Novák, Jan Chyský, ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky

Tento výpočet je zřejmý i z obr. 3. Hodnota příkonu  $p_e$  je poté podle obr. 3 vynásobena konstantou  $K_p$ , která provádí převod do měřítka úhlů, resp. úhlové frekvence svorkového napětí statoru  $\omega_1$ , přičemž vychází z již uvedené úvahy. V bloku označeném  $\Delta$  se vypočítá diference součinu  $K_p p_e$ . Diference tohoto součinu představuje v příslušném měřítku přírůstek či úbytek hodnoty úhlové frekvence svorkového napětí statoru respektující hodnotu zátěžného úhlu  $\beta$ . Správné vyladění hodnoty konstanty  $K_p$  pro konkrétní pohon je pro správnou funkci klíčové.

Vstupní žádanou hodnotou řídicí struktury na obr. 3 je mechanická úhlová rychlost rotoru, resp. úhlová frekvence statorového svorkového napětí  $\omega_1$ . V bloku *výpočet napětí* na obr. 3 je z hodnoty žádané frekvence určena odpovídající potřebná efektivní hodnota napětí, v nejjednodušším případě např. výpočtem podle závislosti vycházející z průběhu na obr. 1. Požadovaná velikost svorkového napětí statoru je zároveň žádanou hodnotou složky  $u_\delta$  statorového napětí, neboť vzhledem k orientaci podle obr. 2 platí, že  $u_\gamma = 0$ . Obě požadované hodnoty složek napětí statoru vstupují do transformačního bloku, kde jsou přepočteny z rotující souřadnicové soustavy  $\gamma, \delta$  na referenční napětí v jednotlivých fázích motoru. Referenční napětí ve třech fázích jsou potom vstupními veličinami širkového modulátoru PWM.

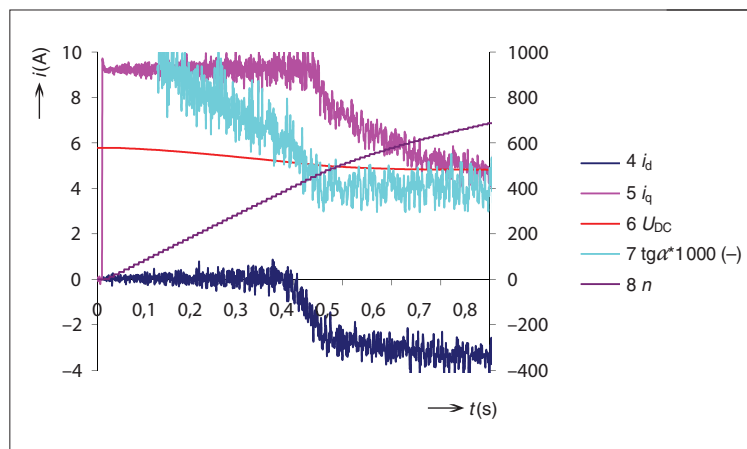
Transformování veličin mezi rotující soustavou souřadnic  $\gamma, \delta$  a soustavou třífázovou  $u, v, w$  vyžaduje znalost transformačního úhlu  $\varphi_1$ , tj. znalost okamžité polohy osy  $\delta$ , tj. polohy fázoru svorkového napětí statoru  $\mathbf{U}$  ke statoru. Tento úhel je podle obr. 3 vypočítán integrací úhlové frekvence statorového napětí  $\omega_1$ . Velikost  $\omega_1$  je určena jako rozdíl žádané hodnoty úhlové frekvence statorového napětí  $\omega_1^*$  a diference této frekvence určené z hodnoty příkonu. Zavedení tohoto rozdílu respektuje vliv zátěžného úhlu  $\beta$  a zajišťuje ochranu před překročením jeho mezní hodnoty.

Složka proudu potřebná pro výpočet příkonu  $i_\delta$  je určena z okamžitých hodnot dvou změřených proudů ve fázích motoru v transformačním bloku. Je-li známo vstupní napětí střídače, vyžaduje popsaná metoda měření jen těchto dvou proudů. Složka napětí  $u_\delta$ , potřebná pro výpočet příkonu, je výstupní hodnotou bloku *výpočet napětí*.

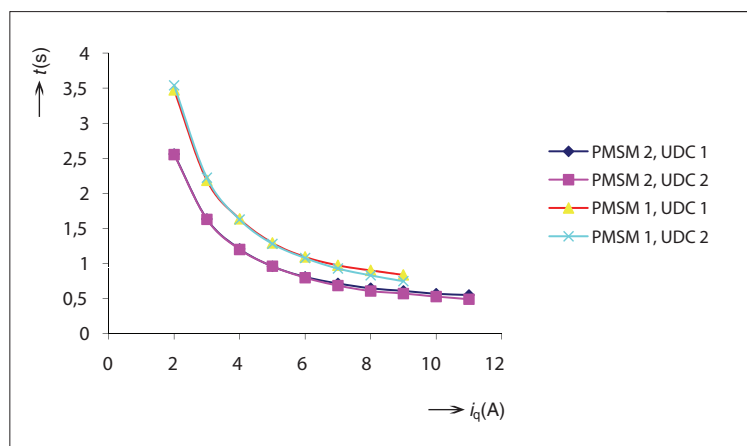
Popsaná metoda řízení je jednoduchá a vyžaduje jen měření dvou fázových proudů,

popř. ještě vstupního stejnosměrného napětí střídače. Při jejím použití u frekvenčně řízeného synchronního stroje pro široký pracovní rozsah otáček je však stanovení optimální hodnoty velikosti napětí pro konkrétní

proudu motoru. Tato metoda rovněž vyžaduje měření pouze dvou proudů ve fázích motoru, popř. měření stejnosměrného napětí na vstupu střídače. Regulační struktura opětovně pracuje v rotující soustavě souřadnic



Obr. 11. Rozběh vysokootáčkového motoru PMSM 2 s omezením zátěžného úhlu  $\beta$  - měkký zdroj napětí střídače



Obr. 12. Závislosti doby rozběhu pohonu na žádané hodnotě momentotvorné složky proudu statoru  $i_q$

ní frekvenci komplikované. Metoda řízení  $U/f = \text{konst.}$  vychází v podstatě z lineární závislosti indukovaného napětí střídavého elektrického stroje na frekvenci. V případě vysokootáčkových strojů je však často nutné zahrnout i vliv úbytku napětí na vnitřní impedanci statoru, který se při velkém rozsahu frekvencí a proudů může měnit ve velmi širokých mezích. Pevně nastavená závislost  $U = f(f)$  v tomto případě poskytuje velmi zkreslené požadavky na velikost napětí. Z uvedeného důvodu byla vyvinuta modifikovaná metoda vycházející ze struktury na obr. 3, doplněná však regulační smyčkou

označovaných opět  $\gamma, \delta$ . Při použití regulační struktury je však soustava souřadnic orientována na fázor statorového proudu podle obr. 4. Směr osy  $\delta$  tedy určuje poloha fázoru statorového proudu. Struktura s regulací proudu je na obr. 5.

Podobnost struktur na obr. 3 a obr. 5 je zřejmá. Vstupní žádaná hodnota, vyhodnocování příkonu  $p_e$  a transformačního úhlu  $\varphi_1$  a metoda ochrany před překročením mezního zátěžného úhlu  $\beta$  jsou totožné, stejně jako část pro transformaci složek napětí statoru a způsob formování výstupního napětí střídače pomocí modulátoru PWM.

Odlišnost spočívá ve vložení regulátorů složek proudů  $i_\gamma$ ,  $i_\delta$ . Vzhledem k orientaci souřadnicové soustavy na fázor statorového proudu je složka  $i_\gamma$  regulována na nulovou hodnotu (obr. 5) a složka  $i_\delta$  představuje hodnotu celkového proudu, v podstatě proudu momentotvorného. Zásadním algoritmem je určení žádané hodnoty  $i_\delta^*$  z žádané hodnoty úhlové frekvence statorového napětí  $\omega_1^*$ . Blok *výpočet proudu* neimplementuje univerzální funkční závislost jako blok *výpočet napětí* v obr. 3. Blok *výpočet proudu* určuje žádanou hodnotu proudu ze znalosti konkrétní závislosti  $M = f(\omega_m)$ , tj. mechanické zátěžné charakteristiky, pro daný pohon ve spojení s konkrétní zátěží. V případě motorů pro otáčky v řádech stovek tisíc  $\text{min}^{-1}$  představuje moment ztrát podstatnou složku celkového zátěžného momentu a žádanou hodnotu proudu lze vyčíslit ze vztahu:

$$i_\delta^* \approx \frac{2}{3\Psi_m} \cdot (k_1 \cdot \omega_1 + k_0) \cdot k_{\text{kor}} \cdot k_{\text{acc}} \quad (\text{A}; \text{s}^{-1}, \text{Wb}) \quad (6)$$

kde  $i_\delta^*$  je požadovaná hodnota proudu,  $\omega_1$  úhlová frekvence statorového napětí,  $\Psi_m$  sprážený magnetický tok permanentních magnetů rotoru.

Ve vztahu (6) jsou  $k_0$  a  $k_1$  parametry zátěže a je nutné je identifikovat při testovacích měřeních celého zařízení. Korekční činitel  $k_{\text{kor}}$  nabývá hodnoty přibližně 1,05 a zajišťuje zvětšení momentu jako korekci nepřesného určení konstant  $k_0$  a  $k_1$ . Hodnota  $k_{\text{acc}}$  se pohybuje v rozmezí 1,05 až 1,1 a zajišťuje dynamickou momentovou rezervu – pokrytí dynamického momentu při zrychlování pohonu. Vztah (6) může být pro konkrétní použití příslušným způsobem modifikován.

Popsané metody regulace synchronních strojů pro největší otáčky jsou velmi specifické postupy. Detailnější informace o těchto metodách lze nalézt např. v [4]. Pohony s těmito strukturami regulace nacházejí uplatnění např. v technice povrchových úprav materiálů.

## 5. Regulace experimentálního vysokootáčkového synchronního stroje na Fakultě strojní ČVUT v Praze

Na Fakultě strojní ČVUT v Praze byla v rámci činnosti Výzkumného centra spalovacích motorů a automobilů vyvinuta struktura regulace pro vysokootáčkový synchronní motor s permanentními magnety pro rychlosti do  $42\,000\ \text{min}^{-1}$ . Vývoj struktury regulace je součástí výzkumu hybridního pohonu přeplňovacího kompresoru pro automobil, u kterého se kombinují výhody klasického pohonu turbínou a pohonu elektromotorem. U tohoto systému je elek-

tropohon zdrojem točivého momentu zejména v intervalech, kdy není k dispozici dostatečný točivý moment turbíny. Jde především o intervaly zvyšování otáček spalovacího motoru, kdy elektropohon dodává systému větší dynamiku. Jmenovité otáčky přeplňovacích kompresorů jsou závislé na výkonu spalovacího motoru a klesají s jeho rostoucí hodnotou. Pro menší spalovací motory pro osobní automobily pracují přeplňovací kompresory s otáčkami přesahujícími  $100\,000\ \text{min}^{-1}$ . Potřebná hodnota výkonu elektromotoru pro tyto aplikace je v řádech jednotek kilowattů.

Při vývoji regulační struktury a při vyšetřování dynamických vlastností vysokootáčkového pohonu byly experimenty na ČVUT v Praze prováděny na dvou PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*, synchronní motor s permanentními magnety) provozovaných bez zatížení (obr. 6) – výrobce VUES Brno. První (PMSM 1) je instalován na vysokootáčkovém dynamometru. Tento testovaný PMSM 1 je dvoupólový s parametry 2,9 kW, 400 V, 6,5 A,  $40\,000\ \text{min}^{-1}$ , 0,7 N·m. Druhý testovaný motor (PMSM 2) nebyl při experimentech instalován na soustrojí, je rovněž dvoupólový a má parametry 3,14 kW, 400 V, 11 A,  $25\,000\ \text{min}^{-1}$ , 1,2 N·m, max.  $42\,000\ \text{min}^{-1}$ . Pro účely výzkumu byl navržen a realizován experimentální střídač IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*, bipolární tranzistor s izolovaným hradlem) (obr. 8) s mikroprocesorovým regulátorem a systémem pro vyhodnocení okamžitého úhlového natočení rotoru PMSM na bázi rezolveru. Pro zmenšení zvlnění proudu synchronního motoru byly do série se statorovými vinutími zařazeny tlumivky.

Regulační struktura byla implementována v mikroprocesorovém regulátoru od firmy Škoda Electric, a. s., s DSP TMS320F2812. Střídač pracuje s frekvencí šířkově pulzní modulace 10 kHz, regulační struktura je vypočítávána s frekvencí 15 kHz.

Regulační struktura experimentálního vysokootáčkového pohonu na ČVUT v Praze je zobrazena na obr. 7 a vychází z principů vektorové regulace momentu. Fázor proudu je regulován prostřednictvím oddělené regulace jeho dvou kartézských složek  $i_d$  a  $i_q$ . Složce  $i_q$  je úměrný moment podle vztahu:

$$M = 1,5 \cdot p_p \cdot \Psi_m \cdot i_q \quad (\text{N}\cdot\text{m}; -, \text{Wb}, \text{A}) \quad (7)$$

kde  $M$  je moment úměrný složce proudu  $i_q$ ,  $p_p$  počet pólů stroje (v případě experimentálních motorů  $p_p = 1$ ),  $\Psi_m$  sprážený magnetický tok permanentních magnetů rotoru,  $i_q$  složka proudu v ose q.

Složce  $i_d$  statorového proudu je úměrný statorový magnetický tok – reakce kotvy. Tato složka je v základním režimu regulována na nulovou hodnotu. Při zvyšování otá-

ček a následném růstu indukovaného napětí statoru však od určité meze musí být nárůst indukovaného napětí kompenzován nenulovou reakcí kotvy – režim odbuzování. Mezi pro přechod do odbuzování je dosažení maximálního výstupního napětí střídače. Ve struktuře na obr. 7 je regulátor poměrného výstupního napětí střídače  $|U|$ , který v režimu odbuzování generuje žádanou hodnotu složky  $i_d$  statorového proudu takovou, aby výstupní napětí střídače bylo udržováno na požadované, maximální hodnotě. Další informace o vektorové regulaci a odbuzování synchronního stroje s permanentními magnety jsou např. v [2].

V regulační struktuře na obr. 7 je znázorněno omezení momentotvorné složky  $i_q$  tak, aby v režimu odbuzování nebyla překročena maximální přípustná hodnota proudu statoru. Kromě tohoto omezení je při regulaci vysokootáčkového motoru v režimu odbuzování nutné omezit složku  $i_q$  statorového proudu i v případě, že by hrozilo překročení maximální hodnoty zátěžného úhlu  $\beta$  mezi svorkovým a indukovaným napětím – obr. 9. Mezní hodnota tohoto úhlu je  $90^\circ$ . Ve fázorovém diagramu na obr. 9 je zanedbán vliv odporu statorového vinutí.

Z hlediska efektivity a přesnosti výpočtu v řídicím DSP (*Digital Signal Processor*, digitální signálový procesor) pohonu a z hlediska průběhu funkce  $\text{tg}$  se omezení zátěžného úhlu  $\beta$  převádí na omezování doplňkového úhlu  $\alpha$  v obr. 9. Pro úhel  $\alpha$  platí:

$$\text{tg}\alpha = \frac{U_i - \omega L i_d}{\omega L i_q} = \frac{\omega \Psi_m - \omega L i_d}{\omega L i_q} \quad (-; \text{V}, \text{s}^{-1}, \text{H}, \text{A}) \quad (8)$$

kde  $\alpha$  je doplňkový úhel,  $U_i$  napětí střídače,  $\omega$  úhlová frekvence,  $L$  indukčnost vinutí,  $i_q$  složka proudu v ose q,  $i_d$  složka proudu v ose d.

Jednoduchou úpravou vztahu (8) se získá vztah pro mezní hodnotu složky  $i_q$  pro zadaný úhel  $\alpha_{\text{MIN}}$ , přičemž úhlu  $\beta = 90^\circ$  odpovídá úhel  $\alpha = 0^\circ$ :

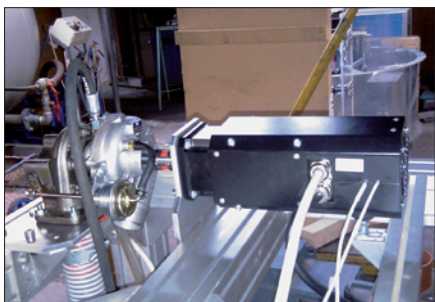
$$i_{q\text{MAX}} = \frac{\Psi_m - i_d}{\text{tg}\alpha_{\text{MIN}}} \quad (\text{A}; \text{Wb}, \text{H}, \text{A}, -) \quad (9)$$

kde  $i_{q\text{MAX}}$  je mezní hodnota složky proudu v ose q,  $\Psi_m$  magnetický tok,  $L$  indukčnost vinutí,  $i_d$  složka proudu v ose d,  $\alpha_{\text{MIN}}$  zadaný úhel.

Při velkých rychlostech motoru vlivem velké frekvence statorového proudu (až 700 Hz) nezanedbatelně vzrůstá úbytek napětí na reaktanci statoru. Ten navíc roste se zvětšujícím se proudem. Je-li pro pohon přeplňovacího kompresoru požadována velká

This paper presents some specific issues of high speed permanent magnet synchronous motors (PMSM) and principles of their control. The first part describes properties of high speed PMSM and illustrates various control structures. The second part informs about research in this area on the Czech Technical University in Prague, Faculty of Mechanical Engineering and presents the significant results obtained.

dynamika pohonu, protéká motorem velký proud. Ten při vyšší frekvenci vyvolává výrazné úbytky napětí na reaktanci statoru, což způsobí přechod motoru do režimu se zeslabeným magnetickým tokem při menších otáčkách. Vlivem omezení zátěžného úhlu  $\beta$  a složky  $i_q$  není nárůst dynamiky roz-



Obr. 13. Přípravované pracoviště s vysokootáčkovým motorem a přeplňovacím kompresorem na ČVUT v Praze, Fakultě strojní

běhu vysokootáčkového PMSM úměrný nárůstu zadaného rozběhového proudu. Situaci navíc komplikuje skutečnost, že v sérii se statorovými vinutími je u vysokootáčkového PMSM nutné zapojit vyhlazovací tlumivky, které sice eliminují zvlnění proudu statoru, ale vznikají na nich další úbytky napětí.

Na obr. 10 jsou znázorněny průběhy veličin vysokootáčkového pohonu s PMSM2 při rozběhu naprázdno při zadaném jmenovitém proudu 11 A. Na obr. 10 je zřejmý přechod pohonu do režimu odbuzování – vzrůst složky proudu  $i_d$  do záporných hodnot. Zároveň je zřejmý přechod pohonu do režimu limitace úhlu  $\beta$ , kdy se začne zmenšovat momentotvorná složka proudu statoru  $i_q$ . V tomto režimu je tangenta doplněkového úhlu  $\alpha$  udržována na hodnotě 0,25 (v měřítku obr. 10 na hodnotě 250). Z průběhů na obr. 10 vyplývá, že motor se rozeběhl na frekvenci 700 Hz (tj. na otáčky 42 000  $\text{min}^{-1}$ ) za 0,5 s. Tato dynamika je z hlediska použití na pohonu přeplňovacího kompresoru dostatečná a regulační struktura pracuje i v těchto velmi dynamických stavech spolehlivě.

Obr. 10 byl naměřen pro případ, že byl střídač napájen z tvrdého zdroje napětí – třífázového můstkového usměrňovače. Na obr. 11 jsou analogické průběhy naměřené pro případ, že byl střídač napájen z měkkého zdroje napětí – jednofázového můstkového usměrňovače. Z obr. 11 je zřejmé, že přechod do režimu odbuzování a přechod do limitace zátěžného úhlu  $\beta$ , resp. limitace  $\text{tg } \alpha$ , nastává při menších otáčkách vlivem poklesu stejnosměrného vstupního napětí střídače s rostoucím odebíraným výkonem.

Na obr. 12 jsou znázorněny závislosti doby rozběhu pohonů s oběma testovanými motory PMSM 1 a PMSM 2 pro případy rozběhu s napájením střídače z tvrdého (UDC 2) i měkkého (UDC 1) zdroje napětí. Doby rozběhu jsou u motoru PMSM 1 delší, neboť tento motor je nainstalován na dynamometru a při rozběhu působí větší moment setrvačnosti. Je zřejmé, že v oblasti větších proudů se již doba rozběhu se zvětšujícím se proudem zkracuje velmi málo. Příčinou je snižování hodnoty otáček, při kterých pohon přechází do režimu limitace úhlu  $\beta$  a složky  $i_q$ . Právě intervaly zrychlování jsou pro hybridní pohon přeplňovacího kompresoru významné, neboť v této době elektromotor pokrývá dodávku výkonu, který není schopna dodat turbína.

## 6. Závěr

Vzhledem k trendu zmenšování rozměrů a hmotností a zvyšování účinností elektromechanických soustav lze předpokládat, že regulované vysokootáčkové elektrické stroje budou nadále nabývat na významu. Vzhledem k širokému spektru otáček, výkonů a aplikací lze u těchto systémů očekávat vývoj řady specifických regulačních metod. Kromě vysokootáčkových synchronních strojů budou jistě i nadále nacházet uplatnění i vysokootáčkové stroje asynchronní.

Odborníci připravují další výzkumné aktivity v tomto oboru i na ČVUT – Fakultě strojní. U prezentovaných laboratorních pohonů se připravují v nejbližší době zkoušky se zatížením přeplňovacím kompresorem (obr. 13) a zkoušky energetické jednotky s regulovaným vysokootáčkovým synchronním generátorem. V delším výhledu budou práce zaměřeny na regulaci synchronních a asynchronních motorů pro otáčky 60 000 až 100 000  $\text{min}^{-1}$ .

### Literatura:

- [1] NOVÁK, J: *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 1. část*. Elektro, 2006, č. 6, s. 4–7, ISSN 1210-0889.
- [2] NOVÁK, J: *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 2. část*. Elektro, 2006, č. 7, s. 8–11, ISSN 1210-0889.
- [3] NOVÁK, J: *Uplatnění synchronních strojů v dopravní technice – 3. část*. Elektro, 2006, č. 8, s. 76–78, ISSN 1210-0889.
- [4] BORISAVLJEVIC, A. – POLINDER, J. – FERREIRA, A.: *Realization of the If Control Method for a High-Speed Permanent Magnet Motor*. In: Conference of Electrical Machines, ICEM 10, Rome, Italy, September 2010.

**Recenze:** doc. Ing. Jiří Javůrek, CSc.



**Prof. Ing. Jaroslav Novák, CSc.**, ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoproudá elektrotechnika v roce 1989. V roce 1992 ukončil studium ve vědecké výchově na téže fakultě na katedře elektrických pohonů a trakce. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 úzce spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s. r. o., v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích. Od roku 2011 pracuje jako profesor na Dopravní fakultě Jana Pernera Univerzity Pardubice. Svou odbornou činností zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, testování elektromechanických soustav a mikroprocesorového řízení.



**Ing. Martin Novák, Ph.D.**, dokončil v roce 2003 magisterské studium v oboru přístrojová a řídicí technika na Fakultě strojní ČVUT v Praze, kde pokračoval doktorandským studiem v oboru technická kybernetika, které úspěšně ukončil v roce 2008. Od roku 2006 působí jako odborný asistent v Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. Mezi jeho hlavní oblasti zájmu patří nasazení mikroprocesorů, zpracování signálu, měřicí metody a řídicí systémy.



**Doc. Ing. Jan Chyský, CSc.**, je absolventem oboru technická kybernetika na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze. Od ukončení studia v roce 1979 pracuje na Fakultě strojní, postupně na katedrách automatizace a elektrotechniky. V roce 1992 se habilitoval v oboru elektrotechnika ve strojírenství. Od roku 2009 je vedoucím Ústavu přístrojové a řídicí techniky. Jeho odborná činnost je orientována na aplikace vestavěných systémů pro modelování, diagnostiku a řízení výrobních zařízení se zaměřením na snižování energetické náročnosti a zlepšování ekologických parametrů.