

Moderní regulované pohony (2)

Jiří Javůrek

2. Spolupráce se ŠKODA D.T.

Spolupráce s plzeňským výrobcem lokomotiv trvá již deset let. Na počátku byly k dispozici jisté zkušenosti získané v ČKD Polovodiče a ÚE ČSAV, které tehdy vyústily k realizaci experimentálního pohonu tramvaje s asynchronním strojem. Na základě požadavku ŠKODA Controls vznikl tvůrčí kolektiv s mladými pracovníky, který byl postaven před zadání realizace konkrétního výrobku – regulace nové generace lokomotivního trakčního pohonu. Jednalo se o pohon s asynchronním strojem, napájeným z napěťového střídače, realizovaného na bázi v té době nejvýkonnějších výkonových prvků – GTO tyristorů. Byla to první aplikace této techniky nejen v tuzemsku, ale zřejmě i v podstatně širším regionu. Je rovněž zajímavé zamyslet se nad tím, kolik tuzemských výrobců tuto techniku do dnešního dne zvládlo a dovedlo do stavu průmyslového nasazení. Pro ČVUT měla tato spolupráce význam v podstatném rozšíření vlastního duševního vlastnictví, které by bylo možno užít ve výuce mladé generace. Vzniklo špičkové vybavení laboratoře elektrických pohonů hlavně pro experimentální práce v oblasti střídačů a mikroprocesorové techniky. Je tak možno do nejmenších detailů prezentovat většinu známých regulačních metod a modulací s použitím vlastních podpůrných prostředků. Ačkoliv se jednalo o speciální modifikace pohonů pro trakční účely, které mají své zvláštnosti, většina zákonitostí platí pro širokou škálu elektrických pohonů. Není proto v žádném případě úmyslem vytvářet zvláštní kategorii trakčních pohonů. Dále budou popsány vyvinuté aplikace v minulém období. Jedná se konkrétně o posunovací lokomotivu 90E, předměstskou jednotku ř. 471 a elektrickou výzbroj pro metro Kyjev.

2.1 Posunovací lokomotiva ŠKODA 90 E

Výkonový polovodičový měnič pro lokomotivu 90 E měl být základem pro modulární řešení dalších výzbrojí. Bylo použito konstrukční řešení střídače, které využívá olejové chlazení. Realita rychlého technického vývoje však způsobila, že pro následující aplikaci byl již použit modernější měnič, založený na prvcích IGBT. Samozřejmostí bylo plně mikroprocesorové řešení celého



Obr.1 Lokomotiva typu ŠKODA 90 E

řídícího systému. Pro řízení trakčního pohonu byly využity dva jednodeskové mikropočítače sběrnicového systému PRIMIS. Komunikace s výkonovou částí, stejně jako u ostatních aplikací, probíhala po světlovodech. I u výrobce HW regulátoru byly během vývoje získávány cenné zkušenosti. Jako podpůrný programový prostředek byl implementován systém KOMPLET, který vznikl na základě předchozích zkušeností na ČVUT a ÚE ČSAV. Náročnost řešení regulace spočívala především v nízkém spínacím kmitočtu použitých výkonových prvků střídače – GTO tyristorů, který se pohybuje kolem 300 Hz. To si vynutilo poměrně složité řešení modulatoru pracujícího se čtyřmi typy modulací.

Řešení bylo ovlivněno i návrhem některých parametrů trakčních motorů. Především rozptylové indukčnosti a rotorový odpor ovlivňují regulační vlastnosti stroje, přičemž požadavky na tyto parametry jsou z různých hledisek protichůdné. Nízký rotorový odpor znamená dobrou účinnost, zároveň ale nízký skluzový kmitočet a zvýšené nároky na přesnost regulace. Nízké rozptylové indukčnosti způsobují malý úbytek napětí základní harmonické, ale zároveň jsou příčinou vyššího zvlnění proudu (obsah vyšších harmonických). Opět se tak zvyšují nároky na funkci regulátoru, který musí vyhodnotit základní harmonickou, která je důležitá pro regulaci. Vyšší zvlnění proudu znamená i vyšší namáhání střídače špičkovými hodnotami, přičemž střídač byl navržen s minimální rezervou.

2.2 Elektrická výzbroj pro předměstskou jednotku ř. 471

Tato aplikace je ukázkou příkladné spolupráce tuzemských podniků. Realizaci výkonové části se Škoda DT zařadila do světové elity mezi dodavatele trakčních výzbrojí, jelikož se jednalo o světové výjimečnou konstrukci střídače na bázi prvků IGBT, pracujícího přímo na trolejovém napětí 3 kV. Systém byl poprvé použit firmou ABB. Konstrukční řešení měniče využívá vodní chlazení součástek.

Regulační část doznala mírné změny, byly použity procesory stejné třídy jako v systému PRIMIS (INTEL 196KR) v kombinaci se signálovým procesorem od firmy Texas Instruments, pracujícím jako koprocesor. Zvýšila se tak výkonnost systému.

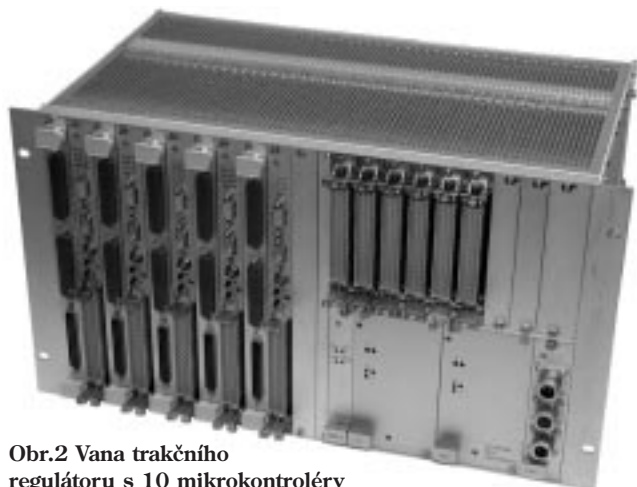
Původním záměrem bylo použití populární metody přímé regulace momentu (DSR). Při ověřovacích zkouškách na zkušební Škoda DT se nedosáhly zcela uspokojivé výsledky vzhledem k rychlosti výměny dat mezi oběma mikroprocesory a nemožnosti generování spínacích impulzů signálovým procesorem. Byl proto aplikován obdobný regulační algoritmus jako u 90 E. Implementace metody DSR je však k dispozici v laboratoři pohonů, takže studenti se mohou podrobně seznámit i s touto metodou. Nároky na regulaci pohonu byly ještě vyšší – regulační kmitočtový rozsah je do 200 Hz, přičemž jmenovitý skluzový kmitočet stroje je menší než 1 Hz. Z důvodu nízké rozptylové indukčnosti trakčních strojů se vyskytuje značné zvlnění proudu. Řešení regulace je možné pouze z toho důvodu, že použité výkonové prvky (tranzistory IGBT) umožňují vyšší spínací kmitočet do cca 800 Hz. Díky tomu byl poněkud zjednodušen modulator, který pracuje jen se třemi typy modulací.

V oblasti podpůrného programového vybavení byl opět zachován systém KOMPLET, který se zcela osvědčil při vývoji pohonu pro 90 E. Byly navíc doplněny některé funkce (práce s blokem parametrů, funkce pro ladění regulátorů). Důležité však je, že zůstal zachován systém komunikace s PC a filozofie volitelných módů práce pohonu, používaná hlavně ve stadiu vývoje, ladění, diagnostiky a servisu. Zcela kompatibilní je i verze programu KOMPLETW pod operačním systémem MS Windows.

2.3 Elektrická výzbroj pro metro Kyjev

2.3.1 Základní realizace systému

V tomto případě figuruje tuzemský výrobce jako dodavatel komponent s nejvyšší technickou úrovní a přidanou hodnotou, přičemž zahraniční partner dodává „železo“ (v mnoha dalších případech je to, bohužel, naopak). Výkonová část je opět založena na vodním chlazení a využívá moderní výkonové integrované inteligentní moduly. V regulátoru pohonů byl použit řídicí systém Unicontrols, který byl navržen speciálně pro řízení výkonových polovodičových měničů, převážně v trakčních aplikacích. Výrobce dodává k systému i testovací programy, které pomohou odhalit eventuelní závady regulátoru a řízeného měniče.



Obr.2 Vana trakčního regulátoru s 10 mikrokontroléry

Základ podpůrného programového vybavení tvoří opět program KOMPLETW, určený pro počítače PC, spolupracující s komunikačním jádrem v regulátoru. To muselo být nově odladěno, protože regulátory jsou založeny na moderních mikrokontrolérech Texas Instruments. Zvýšil se tak výpočetní výkon systému, přičemž jsou k dispozici specializované periferie, mimo jiné usnadňující generování modulací.

Podařilo se zajistit, že celý systém řízení pohonů pracuje na jedné programové platformě, t.j. včetně úrovně MASTER, vyvíjené ve firmě Škoda DT. Aplikací programy pro řízení v oblasti výkonové elektroniky a elektrických pohonů kladou vysoké nároky na rychlost a synchronizaci s reálným časem. Z tohoto důvodu je široce využíváno programování v assembleru. Zvýšení komfortu programování a zpřehlednění programu lze docílit makroprogramováním, které je užíváno na dvou úrovních. V první řadě jsou odladěna makra společná všem aplikacím – například práce s bity, s dlouhými operandy, rampa, omezení, komparátor, dělení, odmocnina, výpočet přepony atd. Pro určitou třídu aplikací jsou využívána společná makra – například práce s I/O porty, ovládání přerušovacích úrovní, přepočty a normalizace vstupních veličin, transformace, matematické modely, generování spínacích pulzů atd.

Na straně PC jsou některé funkce, které nejsou implementovány v programu KOMPLETW, realizovány ve specializovaných jednoúčelových programových prostředcích, které je možno předat i zákazníkovi (např. program pro čtení a vyhodnocení záznamů PostMortem, editaci parametrů atd.).

Právě systém Post Mortem byl u aplikace metro Kyjev dobře pracován. Pro dodatečnou analýzu význačných událostí ve vyvíjeném systému jsou k dispozici jeho dvě funkce. Při každé předvolené události je do vnitřní paměti zaznamenán datový blok s průběhy význačných veličin. To umožňuje podrobnou analýzu zachycené události pomocí časových průběhů předvolených proměnných před a po události. Druhá funkce ve zvoleném okamžiku ukládá do vnitřní paměti hodnoty všech příznakových a dalších předvolených registrů, přičemž v paměti je trvale uchováno řádově větší množství takovýchto záznamů, než křivek. Hodnoty jsou na povel přeneseny do PC a zde mohou být analyzovány.

Algoritmy regulace byly zcela přepracovány. Nově byl použit systém vektorové regulace v pravouhlých souřadnicích, které rotují synchronní rychlostí a zajišťují její vysokou dynamiku.

Pohon metra je představitelem třídy aplikací typu MHD, které pracují ve výkonové úrovni do 200 kW s napětovou hladinou do 1 kV se spínacím kmitočtem výkonových prvků kolem 3 kHz. Bylo proto možno opět zjednodušit realizaci modulátoru.

Systém KOMPLETW byl doplněn o možnost komunikace po sběrnici CAN, která je nezbytná k přístupu do všech 40 mikrokontrolérů, které zajišťují na základní úrovni regulaci pohonného systému soupravy. Vzniklo další podpůrné SW vybavení, např. pro natahování uživatelských programů do všech mikrokontrolérů, již zmíněný PostMort Reader a další.

Důležité pro realizaci jsou i další programové prostředky pracující off-line. Jedním z nich je program SINUS pro generování různých include tabulek sinusových funkcí typu sinus a cosinus s volitelnou amplitudou a injektovanou třetí harmonickou. Tyto tabulky jsou nedílnou součástí modulačních algoritmů a transformačních funkcí. Druhým je program OPTIMUM pro podporu generování optimalizačních tabulek regulátoru. Vstupy tvoří základní parametry asynchronního stroje. Výsledkem je pro každé zatížení pohonu zadaná tokotvorná a momentotvorná složka statorového proudu, rotorový magnetický tok, skluzový kmitočet a sycené parametry matematického modelu stroje.

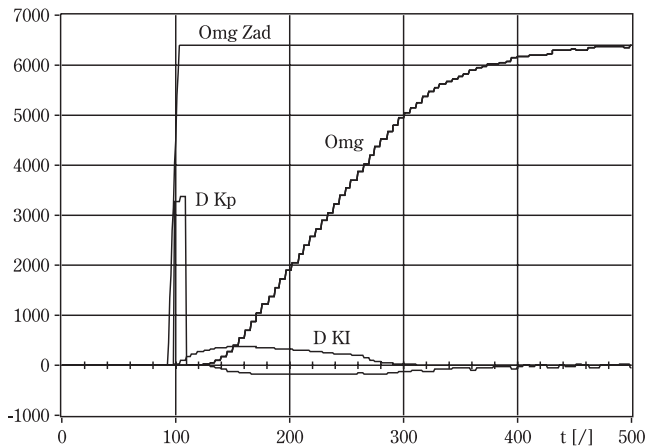
2.3.2 Implementace otáčkového regulátoru

Myšlenka implementovat otáčkový regulátor do systému řízení pohonu vznikla ze dvou důvodů. Při ověřování pohonu na zkušebně jsou často mechanicky spojeny dva stejné stroje, přičemž každý pracuje v odlišném režimu (motor – generátor). Otáčky soustrojí musí udržovat jeden stroj, jehož regulátor musí být proto opatřen otáčkovou smyčkou. Druhým důvodem je možnost demonstrace funkce otáčkového regulátoru v laboratoři elektrických pohonů a porovnání požadavků na některé funkční bloky systému regulace pro klasický trakční pohon a pro otáčkově regulovaný pohon.

Experiment vychází ze systému vektorové regulace napětového typu, implementovaného v dvouprocesorovém jednodeskovém mikropočítači TPP-1 firmy Unicontrols. Šestnáct systémů s touto regulací tvoří pohonný systém soupravy metra. Jako u všech dosud vyvíjených programů pro regulaci elektrických pohonů je věnována pozornost maximální unifikaci všech systémů a zajištění vzájemné kompatibility shora. Úpravy byly proto prováděny postupně na výchozí verzi programu.

Požadované vlastnosti otáčkového regulátoru mohou být ovlivněny cílovou aplikací. Ve většině případů vyhoví běžný PI (v číslicové verzi PS) algoritmus. Je užita obvyklá verze algoritmu s výpočtem změny jeho složek, kdy aktuální výstup se rovná součtu těchto změn a minulého akčního zásahu.

Podle požadavku regulace je však možno provést různé modifikace algoritmu. Na obr. 3 je průběh regulačního pochodu při rozběhu asynchronního stroje 4 kW v laboratoři elektrických pohonů. Při vysoké dynamice není prakticky znatelný žádný překmit, což může být v některých aplikacích velmi žádoucí. I další kritéria



Obr.3 Regulační pochod při modifikaci integrační složky

pro posouzení kvality regulačního pochodu zde dávají podstatně lepší výsledky, než u základního algoritmu. Na záznamu je naznačen průběh změn obou složek regulátoru, označených jako $D K_p$ a $D K_I$ a skutečné a zadané rychlosti. Vzorčky na ose x jsou vzdáleny o 3,256 ms.

2.3.3 Blokové schéma regulátoru pohonu

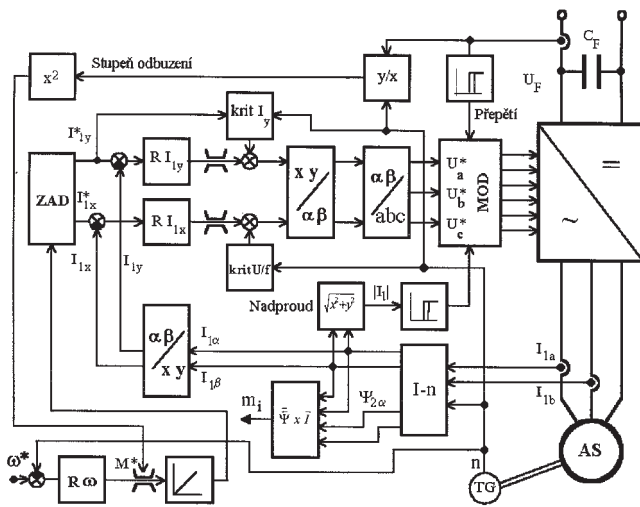
Blokové schéma vychází, tak jako upravené algoritmy ve formě programu, ze základní struktury regulace užitě pro trakční pohon metra. Základem je matematický model I-n asynchronního stroje, odkud jsou získány potřebné veličiny pro regulaci. Vlastní regulace probíhá nad transformovanými složkami statorového proudu s významem tokotvorné a momentotvorné složky, které se v kvažiustáleném stavu jeví jako stejnosměrné. Po zpětných transformacích se získají okamžité hodnoty zadávacích napětí pro modulator, které použitý dopředný suboscilační algoritmus vygeneruje.

2.4 Další vyvinuté aplikace

V posledním období bylo provedeno množství dalších zajímavých studentských prací. Aktivity se dotkly i HW, kde byl realizován jednodeskový mikropočítač s modernějším mikrokontrolérem Texas Instruments.

V oblasti návrhu a implementace algoritmů patří k nejzajímavějším regulátor pulzního měniče s možností volby všech známých způsobů řízení a typů regulace v otevřené nebo uzavřené vazbě a ošetřenými beznárazovými přechody mezi jednotlivými módy, použitelný jako výborná učební pomůcka.

Již zmíněný systém přímé regulace momentu asynchronního stroje zahrnuje nejen klasickou Depenbrockovu metodu, ale i metodu Takahashiho a byl rozšířen i o implementaci fuzzy techniky. Byly učiněny některé pokusy s metodou přirozené regulace. Byl



Obr.4 Blokové schéma regulátoru pohonu

odladěn program mikroprocesorového regulátoru pro proudový střídač ČKD SV 50, který byl součástí laboratoře elektrických pohonů.

Úspěšná disertační práce řešila regulaci kompatibilního usměrňovače se sinusovým odběrem. Zařízení je v laboratoři k dispozici v rutinním provozu.

Byla řešena problematika automatické parametrizace regulátoru, kdy v rámci inicializace jsou určeny parametry soustavy a regulátor provede své nastavení.

Pozornost byla věnována i klasické tyristorové technice, kde je vyvíjen mikroprocesorový regulátor s předpokládaným použitím při rekonstrukcích se zachováním stejnosměrných strojů. I ve výuce by se mohli studenti podrobně seznámit s funkcí programové realizace generátoru pulzů pro fázově řízený tyristorový měnič.

Závěr

V příspěvku jsou uvedeny některé osobní postřehy k problematice výuky v oboru výkonové elektroniky. Zamyšlení nad těmito náměty by snad mohlo přispět ke ztraktivnější studiu daného oboru. Stejně tak jako v zahraničí je z důvodu zájmu především o módní směry trvalý nedostatek studentů daného oboru, což ve svém důsledku dále vede k omezování prostředků pro jeho rozvoj. Bohužel, i na ČVUT nově schválená přestavba studia prakticky ukončila výuku mikroprocesorové regulace v oblasti polovodičových měničů a elektrických pohonů.

Literatura

- [1] JAVŮREK, J., NOVÁK, J., RYBA, J.: Vektorové řízení trakčního pohonu s asynchronním motorem. XXIV konference o elektrických pohonech. Plzeň 1995, 13. – 15. června 1995.
- [2] JAVŮREK, J., SKALA, V: Control System for Suburban Electric Multiple-unit Train. 8-th International Power Electronics & Motion Control Conference PEMC, Praha, 8. – 10. září 1998.
- [3] JAVŮREK, J.: Použití signálového procesoru TMS 320F240 pro řízení elektrických pohonů. Konference Elektrické pohony a výkonová elektronika EPVE. VUT Brno 1998, 11. – 12. listopadu 1998.
- [4] JAVŮREK, J.: Implementace vektorového řízení v rotujících souřadnicích. XIII. oborový den vědeckých a pedagogických pracovníků VŠ. Praha 23. 11. 2001, Klub elektrotechniků v dopravě.
- [5] JAVŮREK, J.: Programové vybavení regulátoru trakčního pohonu pro metro Kyjev. FEL ČVUT, Technická zpráva č. VZ 1/JJ/2000.
- [6] JAVŮREK, J.: Implementace otáčkového regulátoru do systému vektorové regulace pohonu FEL ČVUT. Technická zpráva č. VZ 212/K314/2002.

doc. Ing. Jiří Javůrek, CSc.

ČVUT Praha
Katedra elektrických pohonů a trakce
Elektrotechnická fakulta
Technická 2, 166 27 Praha 6, ČR
e-mail: javurek@feld.cvut.cz