

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Doc. Ing. Jiří Skalický, CSc.

**ELEKTRICKÉ POHONY A VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA:  
SOUČASNÝ STAV, PERSPEKTIVY A VÝUKA**

Inaugurační přednáška ke jmenování profesorem

Vysoké učení technické v Brně  
nakladatelství VUTIUM

Brno 2000

© 2000 J. Skalický  
ISBN 80-214-1601-7

## Obsah

Úvod .....	5
Vznik moderního oboru .....	6
Elektrický pohon jako systém .....	7
Elektrické stroje pro pohony .....	8
Prvky a měniče výkonové elektroniky .....	9
Elektrické servopohony .....	12
Moderní řízení elektrických pohonů .....	16
Perspektivy pohonů a výkonové elektroniky .....	18
Vlastní přínos rozvoji oboru .....	20
Rozvoj oboru studia .....	23
Závěr .....	24

**Jiří Skalický** se narodil se v r. 1940 v Brně, kde v r. 1962 ukončil vysokoškolské studium na Elektrotechnické fakultě VUT, obor elektrické stroje a přístroje.

V letech 1963 až 1990 pracoval v průmyslu, v podniku MEZ Brno, nejprve jako výpočtář elektrických strojů, pak jako projektant elektrických pohonů a nakonec jako vedoucí oddělení vývoje elektrických pohonů. V době působení v podniku MEZ Brno se výrazně podílel na zavedení nového výrobního programu - kompletních elektrických servopohonů pro numericky řízené obráběcí stroje.

V r. 1991 nastoupil na základě konkurzu na místo vedoucího katedry elektrických pohonů a výkonové elektroniky na elektrotechnickou fakultu VUT v Brně. Od r. 1998 do února roku 2000 zastával akademickou funkci proděkana pro zahraniční styky Fakulty elektrotechniky a informatiky VUT v Brně.

V r. 1991 obhájil disertační práci na téma "Numerické řešení nelineárních problémů stejnosměrných pohonů s polovodičovými měniči" a v r. 1992 habilitoval obhájením práce "Servopohon s elektronicky komutovaným motorem".

V oblasti pedagogického působení se podílel na zavedení nového studijního oboru mechatroniky na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně.

V uplynulých letech byl řešitelem dvou grantových projektů GAČR, jednoho grantu FRVŠ a spolurešitelem několika dalších grantových projektů.

## Úvod

Elektrická energie je nejvýznamnější formou energie v současné technicky vyspělé civilizaci. Znáčná část této energie, vyráběné v tepelných, vodních a jaderných elektrárnách, je před konečným využitím přetvářena zařízením výkonové elektroniky. Jako příklady lze uvést spínané zdroje pro počítače a další elektronická zařízení, zdroje malého napětí a velkých proudů pro elektrochemický průmysl, zdroje pro indukční ohřev, svařování a tavení kovů, v energetice pak měniče velmi vysokého napětí pro stejnosměrný přenos elektrické energie, aktivní filtry pro kompenzaci účinniku a vyšších harmonických v energetické síti a řada dalších aplikací.

K technicky nejnáročnějším patří aplikace výkonové elektroniky v elektrických pohonech: od nejmenších výkonů, jakými jsou na př. pohony periferních zařízení počítačů, přes servopohony numericky řízených strojů, robotů a manipulátorů, až k výkonům největším, jako jsou pohony důlních ventilátorů, vodárenských čerpadel, papírenských strojů, válcoven a kontinuálních technologických linek. V neposlední řadě je nutno jmenovat trakční pohony lokomotiv, tramvají a elektromobilů.

Výkonovou část elektrického pohonu, t.j. elektromotor a výkonový měnič, spolu s poháněným zařízením, lze považovat za dynamickou soustavu vyššího řádu, zpravidla nelineární, často s proměnnými parametry. Tuto soustavu je nutno řídit: neřídnou součástí elektrického pohonu je tedy jeho řídicí a regulační systém, na jehož vstupy jsou přiváděny jednak žádané hodnoty, jednak skutečné hodnoty ze zpětnovazebních snímačů. Řídicí a regulační podsystém je dnes realizován obvykle mikropočítačem s příslušnými přizpůsobovacími obvody, realizovanými A/D a D/A převodníky, obvody typu programovatelných logických polí a hardwareovými modulatory pro pulsní šířkovou modulaci (PWM).

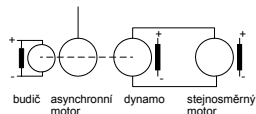
Výkonné mikropočítače umožňují i aplikace moderních metod řízení elektrických pohonů, jakými jsou na př. stavové řízení s pozorovatelem, optimální řízení, adaptivní řízení, fuzzy logické řízení a neuronové řízení.

Obor elektrických pohonů a výkonové elektroniky se v současnosti velmi rychle rozvíjí, a to ve všech svých oblastech: vývoj v oblasti motorů je umožněn novými kvalitními a levnějšími magnetickými materiály, díky rozvoji elektroniky jsou znovu perspektivní robustní spínané reluktanční motory, jejichž princip je znám více než 50 let a synchronní reluktanční motory s axiálně laminovaným rotorem. Vývoj měničů je závislý na zvyšováním parametrů výkonových polovodičových prvků a na vývoji prvků nových, pro něž bude třeba najít nejlhodnější obvodové struktury a současně rozvojem mikroelektroniky pro řízení těchto měničů.

Kritériem dalšího rozvoje elektrických pohonů je vedle zvyšování technických parametrů i úspora elektrické energie, spolehlivost, ekologičnost a kompatibilita s informačními systémy.

## Vznik moderního oboru

Elektrický pohon z dnešního pohledu je pohon regulační, t.j. s možností řízení otáčivé rychlosti, úhlu natočení, případně momentu na hřídeli. Prvním regulačním pohonem v historii byl pohon typu Ward Leonard, který byl patentován před více než 100 lety a byl nahrazen až po nástupu výkonových polovodičů v šedesátých letech. Ward Leonardův pohon sestával z



Obr. 1 Ward Leonardův pohon

rotačního měněče střídavé elektrické energie ze sítě na stejnosměrnou, t.zv. Ward Leonardova měniče, tvořeného mechanicky spojeným asynchronním motorem AM, stejnosměrným generátorem D, který napájel do kotvy regulovaný stejnosměrný motor M a buďiče B (obr. 1). Změnou buzení stejnosměrného generátoru se řídilo jeho napětí a tedy i otáčky motoru. Zpětnovazební řízení se realizovalo rotačními zesilovači (na př. amplidyem), otáčky regulovaného motoru se snímaly tachodynamem.

Ve třicátých letech se pro větší výkony začal používat statický měnič s výbojem ve rtuťových parách - ignitron, který umožňoval t.zv. fázové řízení zpožděním zapálení výboje oproti průchodu napětí nulou a tím plynulou změnu usměrněného napětí. Vzhledem k negativním vlastnostem rtuťového usměrňovače se nikdy moc nerozšířil. Na tomto místě je však vhodné se zmínit, že již tehdy byla vypracována teorie fideletných usměrňovačů, jejíž hlavní využití nastalo až v éře výkonových polovodičů [1].

Vznik moderního oboru elektrických pohonů a výkonové elektroniky se datuje od začátku šedesátých let. Impulsem bylo zavedení průmyslové výroby výkonového polovodičového tyristoru firmou General Electric v roce 1958, pouhě dva roky od jeho vynálezu. Tyristor umožnil nejprve stavbu spolehlivých fideletných usměrňovačů s vysokou účinností a tedy regulovaných pohonů se stejnosměrnými motory. Obvody řízení tyristorů a regulační obvody byly realizovány zapojeními s diskrétními tranzistory, jako základní jednotka pro stavbu regulátorů sloužily tranzistorový operační zesilovač.

Dalšími generačními mezníky ve výkonové elektronice a elektrických pohonech jsou:

Rok 1970, kdy byl realizován výkonový bipolární tranzistor, umožňující stavbu stejnosměrných a střídavých měničů s pulsní šířkovou modulací (PWM). Základním kamenem realizace regulátorů se stal integrovaný operační zesilovač a další analogové a digitální integrované obvody.

Od roku 1980 nastoupily v oblasti výkonových polovodičových prvků unipolární výkonové tranzistory MOSFET, tranzistory s izolovanou bází (IGBT) a vypínatelné tyristory GTO pro největší výkony. Tato etapa je již charakterizovaná přechodem od analogových regulátorů k regulátorům číslicovým, realizovaným mikroprocesory a mikropočítači.

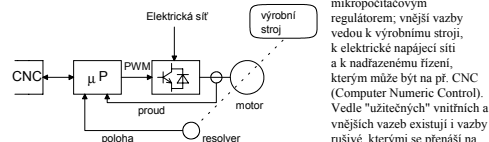
Současná etapa rozvoje pohonů se vyznačuje jednak dalším zvyšováním parametrů výkonových prvků, jednak nástupem prvků nových, jakými jsou na př. tyristor MCT (MOS controlled thyristor), tranzistor SIT (static induction transistor) a tyristor SITH (static

induction thyristor). V oblasti řízení pohonů je současná etapa charakterizována zvyšováním výkonu mikro počítačů, používáním signálových procesorů, stavbou speciálních mikro počítačů s integrovanými V/V obvody pro řízení pohonů, stavbou speciálních koprocesorů pro transformaci soudaných matematických modelů točivých strojů a zákaznickými integrovanými obvody VLSI.

### Elektrický pohon jako systém

Elektrický pohon lze definovat jako elektromechanický systém přeměny elektrické energie na mechanickou práci, řízený technologickými požadavky. Obecně je každý systém definován svými podsystémy a vnitřními a vnějšími vazbami.

Na obr. 2 je znázorněn elektrický pohon, tvořený motorem, výkonovým měničem a



Obr. 2 Schema elektrického pohonu

rušivých vazeb.



Obr. 3 Systémové pojetí elektrického pohonu

musí znát metodiku dimenzování, měl by mít znalosti z měničové techniky (prvky, obvodové struktury a způsoby řízení), z regulační techniky analogové i digitální, včetně regulačních

struktur, algoritmů řízení a regulace a z programovacích technik mikro počítačů pro řízení procesu v reálném čase. Nezbytná je znalost snímačů jak elektrických, tak neelektrických veličin, dále znalost technické diagnostiky a teorie spolehlivosti.

### Elektrické stroje pro pohony

Nejstarším elektrickým strojem pro regulované pohony je stejnosměrný motor. Pro průmyslové aplikace se používá stejnosměrný motor s cizím buzením, umožňující nezávislou regulaci napětím kotvy a budicím proudem. Pro servopohony malých výkonů, používané v robotice a pro numericky řízené stroje, se až donedávna používaly stejnosměrné motory s permanentními magnety ve statoru, které se ve spojení s tranzistorovými pulzními měniči vyznačovaly výbornou dynamikou, avšak v důsledku kluzného kontaktu (komutátor - kartáč) malou přetížitelností při vyšších rychlostech a zejména nižší spolehlivostí.

Stejný motor s permanentními magnety je v současnosti nahrazován synchronním motorem s permanentními magnety na rotoru, řízeném buď jako střídavý synchronní motor s třífázovým napájením sinusovými proudy a t.zv. vektorovým řízením, odvozeným od polohy rotoru (což představuje řízení statorového proudu tak, aby vektor proudu byl kolmý k vektoru magnetického toku), nebo jako t.zv. elektronicky komutovaný motor, který je možno charakterizovat jako "obrácený" stejnosměrný motor, t.j. s vinutím ve statoru a s buzením na rotoru; motor je napájen v každém intervalu jen do dvou statorových fázových vinutí, vždy po 60° elektrických dochází k přepnutí proudu do dalšího vinutí (elektronické komutaci); proud má obdélníkový tvar.

Nejrozšířenějším motorem je asynchronní motor, zejména pro neregulované pohony.

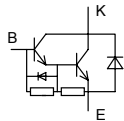
S rozvojem výkonové elektroniky, zejména s cenovou dostupností a spolehlivostí polovodičových měničů kmitočtu, začínají regulované pohony s asynchronními motory vytlačovat pohony stejnosměrné.

Většina pohonů s asynchronními motory malých výkonů jsou pohony v otevřené smyčce, otáčky motorů se řídí pouze změnou napětí a frekvence. Tyto pohony sice umožňují široký regulační rozsah, vykazují však nevyhovující dynamické vlastnosti (málo tluměný přechodový děj) při rychlých změnách rychlosti nebo zatížení. Pro dynamicky náročné pohony se používá t.zv. vektorové řízení, umožňující oddělené řízení momentu a magnetického toku motoru, podobně jako u stejnosměrného motoru s cizím buzením. Matematický model motoru, který je předpokladem vektorového řízení a který je implementovaný v programu mikro počítače, je obvykle rozšířen o estimaci otáček, takže pro zpětnou vazbu nemusí mít motor snímač otáček a lze tedy použít standardně vyráběný asynchronní motor.

Pro polohové servomechanizmy malých výkonů se s oblibou používá krokových motorků, které využívají buď reliktančního principu, nebo mají vestavěny permanentní magnety (t.zv. motorky s pasivním nebo aktivním rotorem), v některých případech jsou kombinovány oba principy. Zvětšování počtu kroků na jednu otáčku se dosahuje jednak konstrukcí statoru a rotoru, jednak elektronicky t.zv. drobením kroku. Polohový servomechanismus s krokovým motorkem je jediným servopohonom, který pro polohové řízení nevyžaduje polohovou zpětnou vazbu se snímačem polohy.

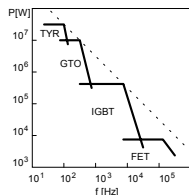
## Prvky a měniče výkonové elektroniky

Nejstaršími prvky výkonové elektroniky, dodnes používanými, jsou výkonové diody a tyristory. V současné době jsou mezní parametry těchto prvků 6 kV, 3 kA. Pro nejvyšší napětí se používá fototyristor s galvanicky oddělenou řídicí elektrodou. Pro použití tyristorů ve střídavých měničích je nutná vnější komutace (vypnutí) přidavnými komutačními obvody, spínací frekvence nepřevyšuje několik set Hz. Diskretních tyristorů a diod se používá pro polovodičová zařízení největších výkonů, dosaňovaných serioparalelnímazením těchto prvků. Nevyjznamenější aplikace jsou v elektroenergetice, z pohónů lze jmenovat použití v cyklokonvertech pro nízkootáčkové pohony největších výkonů a proudové měniče kmitočtu pro velké synchronní motory pro pohony čerpadel a kompresorů.



Obr.4 Transistorový spínač

regulace proudu a tedy i momentu, s dobou odezvy pod 1 ms a pásmem frekvenční propustnosti až 1 kHz, bylo použito výkonových tranzistorů, řízených ve spínacím režimu s pulsní šířkovou modulací a s opakovacím kmitočtem řádově jednotky kHz pro stavbu stejnosměrných a střídavých měničů. Prvním typem výkonového tranzistorového spínače byla dvojice bipolárních tranzistorů v Darlingtonově zapojení, integrovaná spolu se zpětnou diodou a t.zv. antisaturační diodou na jednom čipu a zapouzřena do bezpečnostního modulu (obr. 4).



Obr. 5 Oblasti aplikace prvků

Nevýhodou tyristorů - nemožnost vypnutí proudu řídicím impulsem - nemá vypínatelný tyristor GTO (gate turn off). Jeho vypnutí však vyžaduje značný proudový impuls (pro vypnutí 1000 A je nutný impuls až 200 A), tím i komplikovaný řídicí obvod. Spínací frekvence je podobná jako u tyristorů omezena na několik set Hz. Hlavními aplikacemi GTO tyristorů jsou napětové měniče kmitočtu pro střídavé pohony od 0,5 MW do 10 MW, na př. i pro elektrické lokomotivy s asynchronním pohonem.

Významným přínosem pro zlepšení dynamických vlastností elektrických pohonů, zejména rychlosti

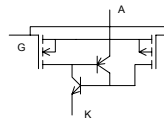
V současné době jsou bipolární tranzistory nahrazovány tranzistory s izolovanou bází (IGBT), které se na rozdíl od bipolárních tranzistorů neřídí proudem do báze, ale podobně, jako unipolární tranzistory MOSFET, pouze napětím. Tranzistorů IGB se používá pro stejnosměrné pulsní měniče a pro napětové měniče kmitočtu do výkonu ca 500 kW. Vzhledem k lepším dynamickým parametrům ve srovnání s bipolárními tranzistory je možno zvýšit opakovací frekvenci spínání na 20 kHz.

Významnou aplikací je t.zv. PWM- usměrňovač, který na rozdíl od diodového usměrňovače nezatažuje

sít' vyššími harmonickými a navíc je použitelný i pro aktivní kompenzaci účinníku a vyšších harmonických v napájecí síti.

Pro pohony malých výkonů do ca 50 kW se používá unipolárních tranzistorů MOSFET, jejichž výhodou je vysoký vstupní odpor řídicí elektrody a vysoká rychlost spínání. Odpor otevřeného kanálu tranzistoru MOSFET usnadňuje paralelní řazení těchto prvků, takže jsou vhodné pro aplikace malých napětí a velkých proudů.

Oblasti aplikací jednotlivých výkonových polovodičových prvků v závislosti na výkonu a frekvenci spínání, jsou znázorněny na obr. 5. převzatého z [2].



Obr. 6 Náhradní schema MC tyristoru

Perspektivním moderním prvkem je MCT (MOS Controlled Thyristor), t.j. tyristor, zapínatelný záporným a vypínatelný kladným napětovým pulsem. Jeho náhradní schéma je na obr. 6, ve skutečnosti jde o řádově 100 000 paralelních struktur na čipu.

Pro stavbu polovodičových měničů, zejména menších výkonů, je k dispozici řada integrovaných bloků, jako výkonové integrované obvody PIC (Power Integrated Circuits) s výkonovým obvodem na čipu, dále bloky typu "smart devices", u nichž je zapouzřen spolu s výkonovým prvkem i jeho

řídící obvod (driver) a případně i obvod proudového jištění. Výkonové bezpečnostní moduly typu IPM (Intelligent Power Modul) obsahují v jednom pouzřdu na př. až 6 vzájemně propojených tranzistorových spínačů tak, že tvoří úplné třífázové můstkové zapojení.

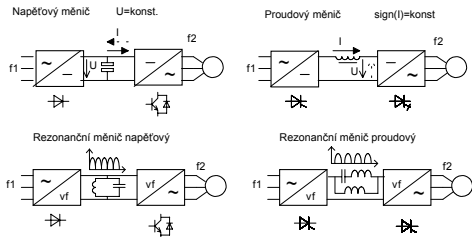
Z výkonových polovodičových prvků se staví polovodičové měniče:

- ♦ AC/DC tyristorové řídící usměrňovače, tranzistorové PWM usměrňovače
- ♦ DC/AC napětové střídače, proudové střídače
- ♦ AC/AC cyklokonvertoři, maticové měniče
- ♦ AC/DC/AC napětové měniče kmitočtu, proudové měniče kmitočtu

Většinu průmyslových aplikací měničů kmitočtu tvoří t.zv. nepřímé měniče se stejnosměrným meziobvodem napětovým nebo proudovým, typu AC/DC/AC.

V posledních letech je věnována pozornost měničům rezonančním, využívajícím t.zv. měkkého spínání v nule proudu nebo v nule napětí, pro snížení přepínacích ztrát. Stejnosemnný meziobvod je v tomto případě rezonančním kmitavým obvodem s kmitočtem řádově stovky kHz.

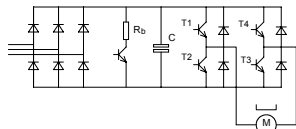
Principiální schéma zapojení základních typů výkonových měničů je na obr. 7. Prvky, které jsou použity v jednotlivých měničích na straně sítě a na straně zátěže, jsou naznačeny pod symbolem měniče.



Obr. 7 Principy nepřímých měničů frekvence se stejnosměrným meziobvodem

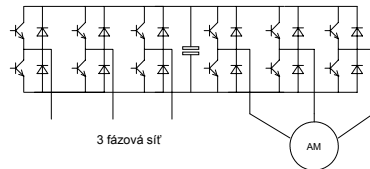
Pro napájení stejnosměrných motorů se používá stejnosměrný pulsní napěťový měnič v čtyřkvadrantovém spojení, napájený nejčastěji diodovým usměrňovačem (obr. 8). Stejnosměrný napěťový meziobvod je doplněn o brzdný odpor, spínaný tranzistorem v režimu brzdění motoru.

Rozšířením stejnosměrného měniče o jednu větev tranzistorových spínačů získáme třífázový napěťový měnič kmitočtu, který lze použít pro napájení střídavých pohonů s asynchronními, synchronními a elektronicky komutovanými motory.



Obr. 8 Stejnosměrný pohon s tranzistorovým pulsním měničem

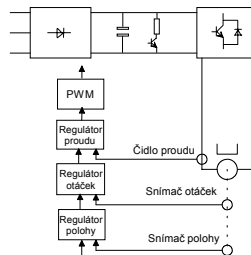
Místo diodového napáječe je možno použít tranzistorový usměrňovač s PWM, jehož předností je sinusový odběr síťového proudu při  $\cos \varphi = 1$ , viz obr. 9. Zatímco měnič na straně motoru je řízen na straně sítě je řízen na síťovou frekvenci.



Obr. 9 Napěťový měnič frekvence s tranzistorovým usměrňovačem

### Elektrické servopohony

Tato část přednášky je věnována zhodnocení současného stavu a vývojovým trendům elektrických servopohonů, používaných zejména pro numericky řízené stroje, roboty a další servomechanismy v automatizační technice.



Obr. 10 Schema stejnosměrného servopohonu

Elektrické servopohony jsou podskupinou elektrických regulačních pohonů, vyznačující se čtyřkvadrantovou pracovní charakteristikou a uzavřenou zpětnou vazbou. Referenčním vstupem je žádaná hodnota polohy nebo rychlosti, základním požadavkem na servopohon je pak kvalita regulace, charakterizovaná statickou a dynamickou chybou, pásmem frekvenční propustnosti pro řídicí signál, dobou odezvy na řízení a necitlivostí na poruchu, což bývá obvykle zatěžovací moment.

Historicky nejstarší je stejnosměrný servopohon, tvořený stejnosměrným motorem, napájeným z tranzistorového

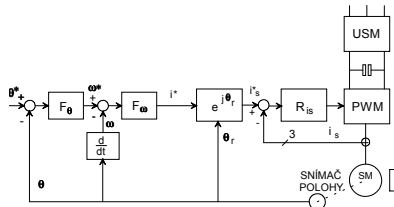
pulsního měniče. Stejnosměrný motor s permanentními magnety ve statoru lze pokládat za stroj s konstantním magnetickým tokem. Otáčky se regulují pouze změnou napětí kotvy. Motor je napájen z pulsního měniče s PWM, regulátor má otáčkovou vazbu od stejnosměrného tachodynamu s podřízenou proudovou smyčkou. Levnější pohony mají pouze

proudové omezení, většinou otáčkově závislé, neboť stejnosměrné motory s PM nemají komutační póly a proto hůře komutují při vyšších otáčkách a z toho důvodu je nutné omezení proudu na nižší hodnotu.

Pohonu v otáčkové vazbě bývá u pracovních strojů nadřazen regulátor polohy, přičemž snímač polohy může být namontován na hřídeli motoru (selsyn-fázový měnič, inkrementální snímač), nebo může být odměřování realizováno až za mechanickým převodem na pracovním stroji při rotačním nebo posuvném pohybu (odměřovací pravítka, induktsyn).

Schema stejnosměrného servopohonu je na obr. 10. Ve stejnosměrném meziobvodu je zapojen brzdý odpor s tranzistorovým spínačem pro brzdění motoru. V případě trvalého chodu motoru v generátorickém režimu (na př. u dynamometrů) je nutné místo diodového usměrňovače použít tranzistorový usměrňovač s PWM, umožňující rekuperaci do sítě.

Nejuživanějším typem servopohonu je pohon synchronním motorem s permanentními magnety na rotoru. Synchronní motor lze otáčkově regulovat buď v otevřené smyčce, kdy napájecí frekvence není závislá na poloze rotoru a není tudíž nutné snímání polohy rotoru, nebo v uzavřené smyčce, která vyžaduje snímač polohy rotoru. Řízení synchronního motoru v otevřené smyčce je výhodné na př. pro vícemotorové synchronizované pohony (na př. technologické linky). Vyžadují pomalý řízený rozběh i pomalé změny rychlosti, pro případ vypadnutí ze synchronismu je vhodné, aby motory měly na rotoru t.zv. amortizační klecové vinutí.



Obr. 11 Polohový servomechanismus se synchronním motorem

Pro servopohonu je nutné řízení v uzavřené smyčce, kterou se realizuje t.zv. vektorové řízení, zajišťující maximální moment motoru jak v ustáleném, tak i v přechodných stavech.

Podmínkou vektorového řízení je splnění požadavku kolmosti vektorů magnetického toku a statorového proudu. Poloha vektoru magnetického toku je u synchronních strojů s permanentními magnety na povrchu rotoru totožná s polohou rotoru a je snímána na př. pomocí resolveru, namontovaném na hřídeli motoru.

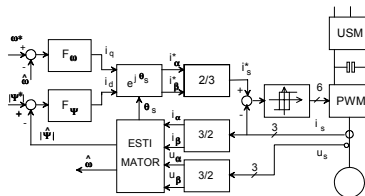
Blokové schéma servopohonu se synchronním motorem, buzeným permanentními magnety na rotoru, je na obr. 11. Synchronní motor je napájen z tranzistorového měniče kmitočtu se sinusovou pulsní šířkovou modulací výstupního napětí pomocí tří regulátorů statorových proudů. Transformací z rotorových souřadnic, v nichž je  $I^*$  skalární (t.j. stejnosměrná) veličina, je realizována v bloku transformace souřadnic  $e^{j\theta}$ , jehož druhým vstupem je úhel natočení rotoru  $\theta$ .

Nadřazenou smyčkou proudovým smyčkám je otáčková smyčka s regulátorem otáček  $F_\omega$ . Žádaná hodnota otáček, která je výstupem regulátoru polohy  $F_\theta$ , je srovnávána se skutečnou hodnotou, získanou jako derivaci skutečné polohy.

Zvláštním případem servopohonu se synchronním motorem je elektronicky komutovaný (EC) motor. Zatímco synchronní motor je napájen třemi sinusovými proudy a pro vektorové řízení je nutno znát trvale polohu rotoru, EC motor je napájen obdélníkovým proudem, v každém okamžiku pouze do dvou fázových vinutí, při čemž proud komutuje do další fáze po pootočení rotoru o  $60^\circ$  el. Odměřování polohy rotoru je diskrétní, na př. Hallovými sondami. Pohon s EC motorem byl ve své době rozšířený na numericky řízených výrobních strojích, zejména z cenových důvodů.

Pro servopohonu s asynchronními motory je nutno použít vektorové řízení, případně přímé řízení momentu, aby bylo možno na sobě nezávisle řídit magnetický tok a moment stroje.

Vektorové řízení je možno rozdělit podle způsobu získávání informace o vektoru magnetického toku, resp. o jeho úhlové poloze, na t.zv. přímé a nepřímé vektorové řízení.

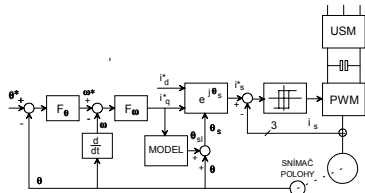


Obr. 12 Přímé vektorové řízení asynchronního motoru

Přímé vektorové řízení rekonstruuje vektor magnetického toku, t.j. jeho velikost a úhel natočení, z naměřených hodnot statorových napětí a proudů. Je-li navíc pro zpětnou otáčkovou vazbu použit estimator skluzu (matematický model pro rekonstrukci výpočtem), je možno pro toto řízení použít standardního asynchronního motoru bez dodatečně montovaných snímačů polohy či rychlosti. Na obr. 12 je blokové schéma přímého vektorového řízení. Výkonová část sestává z usměrňovače USM a střídače PWM, který je

řízen třemi hysterensními proudovými regulátory. Estimátor je matematický model asynchronního motoru pro rekonstrukci vektoru magnetického toku, případně úhlové rychlosti rotoru. Regulátory toku a rychlosti pracují v tzv. d-q souřadné soustavě, otáčející se synchronní rychlostí vůči statoru; pak podélná složka proudu určuje amplitudu magnetického toku a příčná složka, která je kolmá k vektoru magnetického toku, určuje moment motoru. Složky je nutno transformovat do třífázové statorové soustavy jako sinusové žádané hodnoty tří proudových regulátorů.

Nepřímé vektorové řízení nevyžaduje identifikaci vektoru magnetického toku, ale počítá pouze skluz, resp. jeho integrál, pomocí matematického modelu asynchronního motoru. Úhel vektoru magnetického toku  $\theta_e$  se získá jako součet vypočítaného úhlu skluzu  $\theta_{sl}$



Obr. 13 Polohový servomechanismus s nepřímým vektorovým řízením

a mechanického úhlu natočení rotoru  $\theta$ , který je nutno měřit snímačem polohy na motoru. Úhel vektoru magnetického toku je použit pro transformaci ze statorových souřadnic do souřadnic d-q, rotujících vzhledem ke statoru synchronní rychlostí.

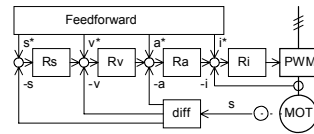
Nepřímé vektorové řízení tedy vyžaduje snímač polohy na motoru, který však je současně využíván pro otáčkovou zpětnou vazbu při regulaci otáček, případně i pro polohovou zpětnou vazbu při použití pohonu jako polohového servomechanismu, jak je naznačeno na obr. 13. V tomto případě se neuvazuje s odbuzováním motoru, což zjednoduší regulační strukturu. Regulator rychlosti  $F_\omega$  je zpravidla typu PI (tj. astatický, s nulovou chybou v ustáleném stavu), regulator polohy  $F_\theta$  je typu P pro sledovací servomechanismus, pro nastavovací časově optimální servomechanismus je pak polohový regulátor nelineární.

V řadě aplikací rotačních servopohonů se při zvyšování jejich parametrů (rychlosti, zrychlení, přesnosti, pásma frekvenční propustnosti) dosáhlo mezí jejich dosažitelnosti, dané zejména konstrukcí mechanických převodů. Proto se v posledních letech začíná používat lineárních servomotorů. Základními typy jsou synchronní servomotor s permanentními magnety a asynchronní servomotor.

Lineární motor si můžeme představit jako rotační motor s nekonečným poloměrem. Konstrukčně se lineární servomotor skládá z primární části, tvořené rozloženým třífázovým

vinutím uloženým v drážkách feromagnetického svazku (obdoba statoru rotačního stroje) a sekundární části, kterou v případě synchronního motoru tvoří permanentní magnety nalepené na ocelové podložce, v případě asynchronního motoru klecové vinutí v drážkách feromagnetického svazku. Pohyblivou částí může být buď primární část, nebo sekundární část, podle typu a konstrukce poháněného zařízení.

Blockové schéma regulační struktury lineárního servopohonu je na obr. 14. Jde o standardní strukturu regulace polohy s podřízenou rychlostní smyčkou, která má opět podřízenou proudovou smyčku. V některých případech se mezi regulátor rychlosti a regulátor proudu zazářuje další regulátor zrychlení. Mění se pouze poloha lineárním snímačem, rychlost



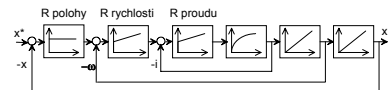
Obr. 14 Struktura řízení lineárního servopohonu

a zrychlení se vypočítávají z informace o poloze. Pro zlepšení dynamiky a zmenšení chyby sledování je struktura doplněna předkorekcemi (feedforwardem) rychlosti, zrychlení a proudu, generované řídicím systémem na základě požadované trajektorie a modelu soustavy.

### Moderní řízení elektrických pohonů

Elektrické pohony včetně poháněných zařízení jsou dynamickými soustavami, pro jejichž řízení se využívají jak klasických, tak i moderních regulačních algoritimů.

Nejúživanější metodou návrhu regulační struktury, historicky nejstarší, zůstává i nadále klasické zpětnovazební řízení s PID, resp. PI regulátorem, a to jak v analogové, tak v digitální verzi. Regulator je navrhován metodami lineární regulace, např. pomocí frekvenčních charakteristik, metodou optimálního modulu či symetrického optima a pod. Obvyklou strukturou je struktura s podřízenými regulačními smyčkami, ve které je vnitřní smyčkou

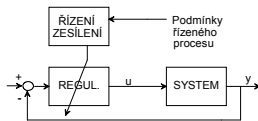


Obr. 15 Regulační struktura s podřízenými smyčkami



nejrychlejší - proudová smyčka, nadřazenou smyčkou pak smyčka rychlostní a v případě polohové regulace ještě další nadřazená smyčka polohová, viz obr. 15. Při syntéze regulátorů se postupuje od vnitřní smyčky ke smyčce vnější a stejným způsobem se pak provádí nastavování regulátorů na reálném pohonu při uvádění do provozu.

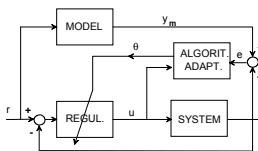
Použitím jednoduchého PID regulátoru pro poháněné soustavy vyšších řádů, jakými jsou na př. pružně vázané více motorové soustavy (na př. válcovací stolice), nelze dosáhnout rychlé a současně dostatečně tlumené odezvy. Pro tyto pohony je vhodnější stavové zpětnovazební řízení, zpravidla s pozorovatelem, nejsou-li měřitelné všechny stavové proměnné. Stavový regulátor se navrhuje buď intuitivně metodou rozložení pólů, nebo vhodněji jako lineární kvadratický regulátor (LQR).



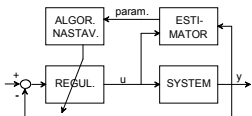
Obr. 16 Regulátor s řízeným zesílením

Pro soustavy s proměnnými parametry jsou vhodné adaptivní regulátory, z nichž nejpožívanějšími jsou v elektrických pohonech regulátory s řízeným zesílením (gain scheduling), regulátor s autonomním nastavováním (self tuning regulator) a soustava s referenčním modelem (model reference adaptive system), viz obr. 16, 17 a 18.

Všechny výše popsané algoritmy řízení vyžadují pro návrh regulátoru znalost matematického modelu řízené soustavy, ať už ve formě diferenciálních rovnic, přenosové funkce, či frekvenční charakteristiky.



Obr. 17 Adaptivní regulátor MRAS



Obr. 18 Adaptivní regulátor STR

Vedle těchto "exaktních" metod návrhu regulátorů začínají pronikat i do elektrických pohonů metody z oblasti umělé inteligence, jakými jsou umělé neuronové sítě a fuzzy logické regulátory, pro jejichž návrh není nutné znát matematický popis soustavy.

Algoritmus řízení neuronového regulátoru se vytváří "učením" neuronové sítě na dostatečném počtu vzorků vstupních a jim odpovídajících výstupních hodnot, algoritmus fuzzy logického regulátoru je vložen formou logických výroků na základě expertních znalostí. Výraznou předností jak neuronových, tak fuzzy logických regulátorů je jejich nelineární charakteristika, což je výhodné pro řízení nelineárních soustav (inverzní nelineární regulátoru k nelinearitě soustavy tuto nelinearitru soustavy kompenzuje).

### Perspektivy pohonů a výkonové elektroniky

Rozvoj výkonové elektroniky je podmíněn zvyšováním parametrů polovodičových prvků a vývojem prvků nových. Ideálním prvkem výkonové elektroniky by byl prvek s vysokými hodnotami napětí a proudu, s nulovým úbytkem napětí v sepnutém stavu, s nulovým zbytkovým proudem v zablokovaném stavu, říditelný pouze napětím, s velmi krátkými zapínacími a vypínacími dobami, teplotně odolný, vysoce spolehlivý a za přijatelnou cenu. Sledujeme-li vývoj prvků v posledním desetiletí, nové prvky se těmto parametrům přibližují [2]. Pomineme-li tranzistory IGB a MOSFET, které již pevně zakotvily v zařízeních výkonové elektroniky, k novým prvkům, jejichž aplikace se očekávají, patří:

- Static Induction Transistor (SIT), který je svou charakteristikou obdobou vakuové triody, avšak v pevné fázi; je proto použitelný jednak jako lineární zesilovač, jednak i jako spínač s PWM; oblasti aplikace jsou ultrazvukové generátory, výkonové audiozesilovače a zařízení pro indukční ohřev
- Static Induction Thyristor (SITH) je plně říditelný tyristor, podobný GTO tyristoru, tj. je řízen rovněž proudovými pulzy do řídicí elektrody, liší se však od něj vyššími hodnotami  $du/dt$  a  $di/dt$  a kratšími spínacími časy; je použitelný zejména pro aplikace vyšších výkonů v energetice, jako jsou aktivní filtry, statické kompenzátory jalového výkonu a HVDC přenos elektrické energie
- MOS Controlled Thyristor (MCT) se jeví jako velmi perspektivní prvek, který je zapínán i vypínán krátkým napětovým pulzem do řídicí elektrody struktury MOS; svými spínacími časy je srovnatelný s tranzistorem IGB, má však menší úbytek napětí v sepnutém stavu; předpokládá se využití zejména v elektrických pohonech, statických kompenzátorech a záskokových napájecích zdrojích pro nepřerušovanou dodávku elektrické energie.

V oblasti technologie prvků je předpoklad dalšího zvyšování integrace výkonových prvků s řídicími a ochrannými obvody včetně nadproudového zkratového a tepelného jističení do jednoho pouzdra.

Srovnání některých parametrů výše uvedených prvků s tranzistroy IGB ukazuje tabulka:

	IGBT	SIT	SITH	MCT
Charakter	lineární	lineární	lineární	spínací
Napětová char.	asymetrická	asymetrická	asymetrická	asymetrická
Řízení	napětím	napětím	proudem	napětím
Doba zapnutí (μs)	0,35	0,25	2,1	1,1
Doba vypnutí (μs)	0,55	0,3	2,5	0,6
Frekvence (kHz)	50	70	4	20

Rozvoj výkonových polovodičových prvků ovlivňuje významně i další vývoj polovodičových měničů. Současné i budoucí trendy ve vývoji měničů lze shrnout takto:

- tyristory s nucenou komutací v napětových i proudových měničích jsou nahrazovány vypínatelnými tyristory GTO, v budoucnu pravděpodobně tyristory MCT
- bipolární tranzistory v napětových měničích jsou nahrazovány tranzistroy IGB, pro aplikace malých výkonů tranzistroy MOSFET
- očekává se, že diodové usměrňovače větších výkonů a fázově řízené tyristorové usměrňovače budou postupně nahrazovány usměrňovači s PWM (tranzistorovými nebo s vypínatelnými tyristory)
- je pravděpodobné rozšíření aplikací s rezonančními měniči, využívajícími tzv. měkké spínání v nule napětí nebo proudu ke snížení spínacích ztrát

Pokud jde o kompletní pohony, pak v oblasti motorů lze očekávat výrazný nástup lineárních motorů, a to jednak pro trakční pohony, jednak pro servomechanismy s lineárním pohybem, dále rozvoj tzv. vysokomomentových nízkootáčkových motorů, jejichž rotor i stator je zabudován přímo do konstrukce pracovního stroje a rozvoj reluktančních motorů, a to jak spínaných reluktančních motorů, tak synchronních reluktančních motorů, u nichž zejména konstrukce s axiálně laminovaným rotorem slibuje výkon srovnatelný s asynchronním motorem. Očekává se rovněž zabudování výkonové a řídicí elektroniky přímo do motoru, buď do štitu nebo do svorkovnice.

Pokud se týká řízení a regulace pohonů, nejvýraznějším trendem je přechod od analogových obvodů k číslicové regulaci, realizované specializovanými mikropočítači s příslušnými I/O obvody integrovanými přímo na čipu (programovatelné čítače, A/D a D/A převodníky, PWM, vyhodnocovací inkrementálních snímačů atd.). Mikropočítač bývá často doplněn dalším koprocesorem, případně zákaznickým integrovaným obvodem typu ASIC, pro realizaci transformací souřadnic v reálném čase při vektorovém řízení.

V oboru metod a algoritmů řízení, aplikovaných v elektrických pohonech, se předpokládá rozšíření samočinného nastavování regulátoru před spuštěním pohonu na základě automatické identifikace soustavy, větší využívání adaptivních regulátorů, aplikace metod optimálního řízení a výraznější zavádění moderních algoritmů z oblasti umělé inteligence, jako jsou umělé neuronové sítě, fuzzy logické regulátory a expertní systémy.

## Vlastní přínos rozvoji oboru

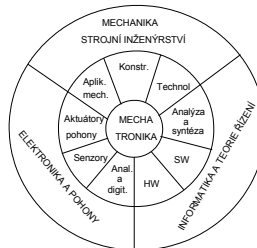
Vlastní přínos rozvoji oboru elektrických pohonů a výkonové elektroniky je tvořen jednak realizovanými inženýrskými díly z doby mého působení v průmyslu v letech 1963 až 1990, jednak vědecko-pedagogickou činností na VUT FEL v Brně od roku 1991.

Nejvýznamnějším přínosem z období mého průmyslového působení je úspěšný vývoj a zavedení seriové výroby elektrických servopohonů MEZOMATIC pro NC stroje a roboty, což v kontextu doby umožnilo tuzemským výrobcům obráběcích strojů vyrábět tyto stroje na srovnatelné světové úrovni a tím i jejich export prakticky do celého světa. V časovém sledu to byly od r. 1975 nejprve tyristorové stejnosměrné pohony posuvů, od r. 1984 pak inovovaná řada těchto pohonů v novém konstrukčním provedení a s adaptivním regulátorem, od r. 1985 řada stejnosměrných pohonů včetně s kombinovanou regulací do kotvy a do buzení, s adaptivním regulátorem proudu. Poslední v řadě po r. 1986 byly tranzistorové pohony posuvů se stejnosměrnými motory a pohony posuvů s elektronicky komutovanými motory. O technické úrovni těchto pohonů svědčí m.j. i řada autorských osvědčení na vynálezy, uplatněných na těchto výrobcích a několik zlatých medailí a dalších ocenění z mezinárodních veletrhů a specializovaných výstav obráběcích strojů. Některé z výsledků vývoje, obecnějšího vědeckého charakteru, byly rovněž publikovány v [8], [9].

Za díle přínos, související s vývojem těchto pohonů, pokládám i soubor počítačových programů pro podporu projektování a dimenzování polovodičových měničů i kompletních pohonů, které jsem v té době vytvořil. V řadě těchto programů bylo využito numerických metod řešení nelineárních problémů ve výkonové elektronice, shrnutých později v kandidátské disertační práci. Následná habilitační práce čerpalá ze zkušenosti s navrhováním pohonů s elektronicky komutovanými motory, jejíž část byla publikována v

[3].

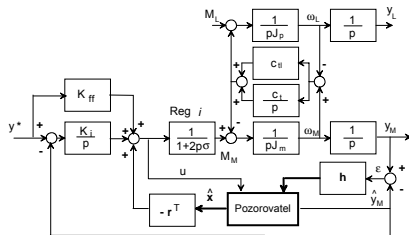
Z oblasti vědecko-pedagogické činnosti v dalším období po roce 1990 bych vyzdvihl svůj přínos k zavedení mechatroniky jako mezipředmětového studia na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně. Mechatroniku lze definovat jako synergickou integraci mechaniky s elektronikou, automatizací a inteligentním počítačovým řízením při navrhování a realizaci nových výrobků. Co je náplň studia mechatroniky na VUT FSI v Brně, je patrné z obr. 19. Hlavním cílem výchovy absolventů mechatroniky je získání znalostí jak strojních, tak elektrotechnických oborů a osvojení "mechatronického" přístupu k řešení inženýrských úloh, což zjednodušeně znamená vzájemnou



Obr. 19 Systémové pojetí mechatroniky

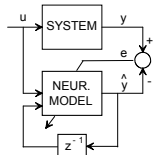
spolupráci strojních konstruktérů, elektrokonstruktérů a informatiků od samého počátku vývoje výrobku.

Mechanický přístup jako inženýrská metoda řešení technických úloh byl náplní výzkumného projektu, financovaného GAČR, s názvem "Inteligentní servopohony jako mechatronické systémy", jehož jsem byl řešitelem v letech 1994 až 1996.

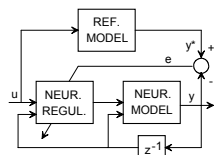


Obr. 20 Struktura řízení dvoumotorové soustavy s pružnou vazbou

Cílem projektu bylo modelování a řízení pohybu složitých mechatronických soustav, zejména nelineárních, s možností aplikací zejména v robotice. Jedním z výsledků je polohové řízení víceosých soustav s pružnými mechanickými vazbami [4]. Blokové schéma stavového zpětnovazebního regulátoru s pozorovatelem, integrátorem a feedforwardem, pro jednu pohybovou osu, je na obr. 20.



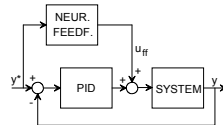
Obr. 21 Identifikace nelineární soustavy



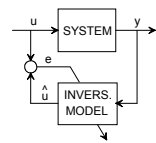
Obr. 22 Princip učení neuronového regulátoru

Dalším výzkumným projektem, jehož jsem byl řešitelem v letech 1996 až 1998, byl grant GAČR s názvem "Neuronové a fuzzy logické řízení elektrických pohonů", spoluřešitelem byl Ústav pro elektrotechniku AVČR. Cílem projektu bylo ověření možnosti moderních algoritmů z oblasti umělé inteligence, jako jsou umělé neuronové sítě a fuzzy logika, pro modelování a řízení elektrických pohonů, výkonových polovodičových měničů a aktivních filtrů.

Neuronovou síť lze v regulačních strukturách, tedy i ve strukturách elektrických pohonů, použít jednak k identifikaci a modelování zejména nelineárních soustav (obr. 21), jednak jako zpětnovazební nelineární regulátor nebo nelineární předkorekce (feedforward). Neuronový



Obr. 23 Struktura s neuronovým feedforwardem



Obr. 24 Princip učení inverzního modelu

zpětnovazební regulátor se obvykle trénuje s neuronovým modelem soustavy pomocí lineárního referenčního modelu, viz obr. 22. Nelinearita soustavy je kompenzována "inverzní" nelinearitou zpětnovazebního neuronového regulátoru.

Pro elektrické servopohony se ukázala jako jednodušší a z hlediska chyby sledování trajektorie přesnější struktura s klasickým PID regulátorem a nelineárním neuronovým feedforwardem (obr.23), který je trénován na inverzní model soustavy (obr. 24).

Jako inverzní model často vyhoví tzv. steady-state model, t.j. model v ustáleném stavu, který je jednodušší (u robotické souřadnice je to pohyb konstantní rychlostí). Struktura s neuronovým feedforwardem byla ověřena na servopohonu kloubového robotu, kde nelineární feedforward kompenzoval vliv gravitačních sil [5], [6].

Jinou aplikací v robotice je využití neuronové sítě pro řešení tzv. inverzního problému kinematiky, spočívajícího v transformaci kartézských souřadnic  $\mathbf{x}$  na kloubové souřadnice



Obr. 25 Inverzní transformace souřadnic

robotu  $\mathbf{q}$ , obr. 25. Analytické řešení vyžaduje počítání inverzního Jakobiana v reálném čase, naproti tomu natrénovaná neuronová síť, jejíž vstup jsou kartézské souřadnice a výstup robotické kloubové souřadnice, je podstatně rychlejší [7].

## Rozvoj oboru studia

Tato část přednášky je věnována jednak rozvoji studijního oboru silnoproudé elektrotechnika a elektroenergetika, a to v jeho zaměření na elektrické pohony a výkonovou elektroniku, jednak obecněji studijním programům elektrotechnika a informatika na VUT FEI v Brně.

Hlavním cílem rozvoje zaměření na elektrické pohony a výkonovou elektroniku je soustavě budování brněnské pohonářské školy, zaměřené na pohony malých výkonů s vysokým obsahem řídicí a regulační elektroniky, které jsou určeny především pro komplecti automatizovaných systémů.

V rámci současných i budoucích výzkumných projektů a přímé spolupráce s průmyslem se zaměříme na servomotory s permanentními magnety, na reluktanční motory, na krokové motory a na vektorově řízené asynchronní motory, včetně příslušných polovodičových výkonových měničů pro jejich napájení a mikro počítačových regulátorů. Budeme rozvíjet moderní regulační struktury a algoritmy řízení elektrických pohonů včetně algoritmů z oblasti umělé inteligence, jako jsou umělé neuronové sítě a fuzzy logické řízení. I nadále budeme ve spolupráci s fakultou strojního inženýrství rozvíjet mechatroniku jako vědecký i studijní obor.

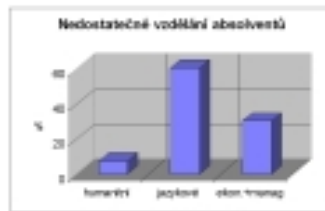
Pokud jde o studijní program oboru silnoproudé elektrotechniky a elektroenergetiky, je možno jej považovat za vyhovující současným podmínkám a odpovídající svou strukturou studijním programům ostatních oborů studia na FEI. Domnívám se však, že jak náplň, tak i formu studia je vhodné zlepšovat ve smyslu rozvíjení tvůrčích inženýrských schopností. K inženýrské činnosti potřebují naši absolventi nejen odborné znalosti, ale zejména osvojení metodiky inženýrské práce, k níž patří nejen počítačová podpora projektování, konstruování, simulace, testování a řízení technologických procesů, ale i schopnosti samostatně analyzovat problémy, hledat řešení, rozhodovat, komunikovat a jednat s lidmi. Rozvíjení těchto schopností je možné podporovat přesouváním studijní zátěže na samostatnou tvůrčí činnost, jako jsou individuální a skupinové projekty, semináře s aktivní účastí, studium z cizojazyčné literatury a v neposlední řadě i absolvování části studia na zahraniční univerzitě.

V minulém akademickém roce koncipovala FEI nové studijní programy podle požadavků nového vysokoškolského zákona. Dle mého subjektivního pohledu lze jednotlivé programy charakterizovat takto: studijní program magisterského studia je téměř optimální pro ty studenty, kteří pokračují v doktorském studiu: má rozsáhlý teoretický základ, volbou volitelných předmětů ve 2. stupni lze získat i úzce specializované odborné znalosti, snad jediným nedostatkem je malý důraz na znalosti cizích jazyků.

Studijní program magisterského studia pro inženýry, nastupující po absolvování studia do praxe, není již dle mého názoru optimální, což se rovněž odrazilo ve výsledcích ankety absolventů, pořádané v roce 1998. Podle této ankety považuje 60 % absolventů jazykové vzdělání za nedostatečné, 30 % absolventů postrádá ekonomické a manažerské vzdělání a téměř 80 % absolventů se domnívá, že škola nerozvíjí schopnost mezilidské komunikace. Podle mne je ve struktuře studijního programu předimenzován teoretický základ v 1. stupni studia, dále se domnívám, že předepsaná kreditová skladba (spolu s hodnocením pedagogických výkonů) potlačuje studium netechnických předmětů, v důsledku čehož chybí absolventům ekonomické, manažerské a nakonec i humanitní znalosti a zejména aktivní znalost alespoň dvou cizích jazyků. Vzhledem k poloze naší republiky, obchodním kontaktům a vzhledem k tomu, že i u nás působí řada zahraničních firem a naši absolventi budou

pracovat ve stále větší míře ve sjednocené Evropě, je až zarážející téměř zanedbatelná znalost jiných evropských jazyků kromě angličtiny.

Pokud bych chtěl hodnotit nově zaváděné bakalářské studium typu "Y", tak v pojetí, jak je



navrženo, nemůže plnit obdobu anglosaského bakalářského stupně univerzitního vzdělání, a bude tedy i nadále cestou z nouze pro ty studenty, kteří nestačí postoupit na magisterský stupeň. Přestože je bakalář často definován jako "provozní" inženýr, v jeho studijním programu je celý dvouletý teoretický základ magisterského studia, na odborné předměty včetně odborné praxe a závěrečného bakalářského projektu

zbývají pouze tři semestry. Domnívám se proto, že se již v blízké budoucnosti vzhledem k demografickému vývoji a ke stále se rozšiřující nabídce vysokoškolského studia dostane náš systém do potíží, protože velké procento přijatých studentů nebude schopno projít stávajícím 1. stupněm, pokud zůstane obsahově a rozsahově beze změny. Východiskem by mohl být standardní seriový bakalářský stupeň, ovšem s podstatně omezeným teoretickým základem, při čemž náročnější části teoretického základu by mohly být přesunuty do magisterského stupně, případně i jako volitelné a přizpůsobené jednotlivým oborům.

## Závěr

Závěrem své přednášky bych chtěl vyjádřit přesvědčení, že obory silnoproudé elektrotechniky jsou perspektivními obory, a to jak ve výzkumu a vývoji nových technologií, tak i jako obor studia na VUT v Brně.

Výchova a vzdělávání mladých inženýrů je, podobně jako inženýrská činnost, činností tvůrčí, z níž plyne jak uspokojení nad dosaženými výsledky, tak i neustálé hledání nových a lepších řešení. Nejvyšším cílem každého učitele, a tedy i cílem mým, je vychovávat všestranně intelektuálně vzdělané a schopné absolventy, vstépat jim lásku k povolání a zancenost pro inženýrskou práci a být jim vzorem i svým vystupováním a chováním.

Děkuji za pozornost.

## Seznam publikací

- [1] GLASER, A., MÜLLER-LÜBECK, K.: Theorie der Stromrichter, Bd. 1, Elektrotechnische Grundlagen, Berlin, 1935
- [2] JAECKLIN, A.: Future Devices and Modulus for Power Electronic Applications, Proc. of EPE 1993, Brighton, pp. 1-8
- [3] SKALICKÝ, J.: The New Generation of Brushless Drives for Machine Tools Applications, Int. Conf. ED&PE, Košice, 1992, pp. 514 - 518
- [4] SKALICKÝ, J.: Motion Control of Multi-Axes Mechatronic Systems, Proceedings of EDPE '96, High Tatras, Slovakia, 1996, pp. 568-571
- [5] SKALICKÝ, J.: Neural Control of Servodrives in Mechatronic systems, Proceedings of PEMC '98, Prague, 1998, pp. 5-47-50
- [6] SKALICKÝ, J.: Motion Control of Robotic Joints Applying Neural Networks, Proc. of the Int. Conf. Mechatronics and Robotics '99, Brno, 1999, pp.155-159
- [7] SKALICKÝ, J.: Application of Neural Networks in Robotics, Proceedings of Mechatronics and Robotics '97, TU Brno, 1997, pp. 87-92
- [8] SKALICKÝ, J.: Regulační vlastnosti otáčkové smyčky stejnosměrného pohonu MEZOMATIC-K, Elektrotechnický obzor 74, 1985, č.5-6, str. 278 - 281
- [9] SKALICKÝ, J.: Vliv způsobu řízení na statické charakteristiky stejnosměrného tranzistorového měniče, Elektrotechnický obzor 79, 1990, č.5, str.283-289
- [10] BOSE, B.: Power Electronics and Motion Control - Technology Status and Recent Trends, IEEE Transactions on IA, Vol. 29, No 5, Sept./Oct. 1993, pp. 902-909
- [11] YASUHIKO DOTE: Application of Modern Control Techniques to Motor Control, Proc. of the IEEE, Vol. 76, No 4, April 1988, pp.438-454

## Abstract

This lecture reviews the contemporary state of electrical drives and power electronics which is the study programme of the branch Power Electrical Engineering and Power Systems at Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science.

As an introducing part there is described the history of electrical drives and power electronics as a modern discipline raised by development of electronics, semiconductor technology and microelectronics. There is emphasized the system-approach of electrical drives.

The contemporary state of the technology is characterized by review of electrical machines, power semiconductor devices and structures of power converters, by review of electrical servodrives most used for industrial applications and lastly by review of the most applied control structures and control algorithms. At the end of this part there are mentioned some problems to be solved in the near future and there are denoted trends which seem to be prospective in further development of electrical drives and power electronics.

Next part of the lecture briefly evaluates the author's contribution to the development of this branch partly by realized engineering works - servodrives for numeric controlled machines and robots, partly by results of research projects published in proceedings of conferences.

The conclusion of the lecture is devoted to perspectives of electrical drives and power electronics as a subject of teaching in the Brno University of Technology.