

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 634

ISSN 1213-4198

thesis
?
IS

Ing. Vladimír Hubík

Elektrické servopohony pro kritické aplikace

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

ING. VLADIMÍR HUBÍK

ELEKTRICKÉ SERVOPOHONY PRO KRITICKÉ APLIKACE

ELECTRICAL SERVO DRIVES FOR CRITICAL APPLICATIONS

ZKRÁCENÁ VERZE PH.D. THESIS

OBOR	Konstrukční a procesní inženýrství
VEDOUCÍ PRÁCE	DOC. ING. VLADISLAV SINGULE, CSC.
OPONENTI	Prof. Ing. Otakar Kurka, CSc. Doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc. RNDr. Vladimír Opluštil
DATUM OBHAJOBY	30.6.2011

Klíčová slova

Elektronicky komutovaný motor, modelování, simulace, Model Based Design, kritické aplikace, letecký průmysl

Keywords

Electronically commutated motor, modeling, simulation, Model Based Design, critical application, aerospace industry

Místo uložení

Fakulta strojního inženýrství
Ústav výrobních strojů, systému a robotiky

OBSAH

Klíčová slova.....	2
Keywords.....	2
OBSAH	3
1 ÚVOD.....	5
2 MOTIVACE A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
2.1 Motivace k dané problematice.....	7
2.1.1 Kritické aplikace v letectví.....	7
2.1.2 Použití elektroniky v kritických úlohách v letectví.....	8
2.2 Cíle disertační práce	9
3 SHRNU TÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ V OBORU.....	11
4 PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	12
5 HLAVNÍ VÝSLEDKY A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE	13
5.1 Hlavní výsledky.....	13
5.1.1 Model EC motoru.....	13
5.1.2 Simulace regulátoru.....	15
5.1.3 Výsledky na reálném standu	16
5.2 Přínos disertační práce.....	18
6 ZÁVĚR.....	20
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	22
ŽIVOTOPIS	24
Abstrakt	26
Abstract.....	26

1 ÚVOD

V současné době jsou elektrické servopohony nedílnou součástí výrobních strojů, robotů, mobilních prostředků, zdravotnické techniky a dalších náročných aplikací. Jsou používány v podstatě ve všech oblastech průmyslu a služeb, kde je vyžadováno jakékoliv řízení mechanického pohybu, ať už lineárního nebo otáčivého. Z pohledu spolehlivosti můžeme servopohony rozdělit do více kategorií, které vyžadují odlišný přístup řešení během vývojové fáze. Kategorie kritických aplikací, pro které je spolehlivá a bezporuchová činnost základním předpokladem, vyžaduje přístup nejodpovědnější. Doktorská práce na téma „Elektrické servopohony pro kritické aplikace“ se zabývá právě touto oblastí, především s ohledem na řešení výkonové a řídicí elektroniky včetně vnitřních řídicích algoritmů.

Oblast elektrických pohonů prošla v posledních několika letech, současně s vývojem elektrotechniky a technologií, značnou revolucí. Během ní vznikly nové typy elektrických pohonů a nové způsoby řízení, které vyžadují komplexní řešení řídicí i výkonové elektroniky. Tyristorová můstková zapojení s diskrétní řídicí logikou byla nahrazena moderními spínacími tranzistory typu MOSFET a IGBT, řízenými speciálně uzpůsobenými typy signálových procesorů DSP pro řízení elektromotorů. Modernizovány byly také systémy ochrany, měření a další podpůrné obvody, zvyšující provozní spolehlivost.

Existence rychlých řídicích čipů a sofistikovaných algoritmů nepřináší pouze snadnou integraci elektrického servopohonu do nadřazených celků a systémů, ale přináší také nové trendy v oblasti elektrických pohonů. Vznikají nové typy stejnosměrných i střídavých elektrických motorů, které postupně vytlačují stávající, dobře prozkoumané a popsané komutátorové stroje, používané již několik desítek let. Mezi velmi populární patří v poslední době stále častěji diskutovaný elektronicky komutovaný stejnosměrný motor – EC motor, z anglosaské literatury známý jako BLDC motor. Vzhledem k příznivým vlastnostem, především z pohledu spolehlivosti, jsou EC motory vhodnými kandidáty pro aplikace vykazující kritické parametry, a tudíž i pro dlouhodobý a bezporuchový provoz.

Následující práce pojednává o dosavadním vývoji a řešení doktorské práce, která se zabývá především problematikou návrhu elektrického servopohonu pro oblast letecké techniky. Důraz je kladen na implementaci nového způsobu sensorového i bezsensorového řízení EC motorů, a to jak při rozběhu, tak

i v normálním provozu. Předložená doktorská práce obsahuje matematické modelování daného problému v prostředí softwaru MATLAB/Simulink s následným ověřením výsledků ve zkušebním hardware dSPACE. Tento postup, označován jako Model Based Design, tvoří již dnes nedílnou součást moderního vědeckého přístupu.

Výstupem doktorské disertační práce je i fyzická realizace řídicí a výkonové elektroniky pro pohony založené na elektronicky komutovaném stejnosměrném motoru. Lze očekávat praktické nasazení a ověření výsledků práce na komerčních projektech externí společnosti.

2 MOTIVACE A CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z hlediska bezpečnosti je rozhodující, jakou škodu (především na lidském zdraví a životech) může chybná funkce (případně nefunkce) řídicího systému způsobit. S tím úzce souvisí četnost takových událostí. Zatímco prakticky každodenně dochází k úmrtím v silniční dopravě, a tato skutečnost je společností tolerována, letecké či železniční katastrofy jsou společensky vnímány daleko citlivěji. O událostech v jaderných elektrárnách raději ani nemluvě. Tento fakt souvisí s rozsahem katastrofy, kterou může daná chyba způsobit (kolik lidí může zabít). Je zajímavým psychologickým jevem [1], že v některých případech jsme ochotni svou osobu automaticky považovat za potencionální oběť katastrofy (letecká doprava), zatímco v jiných případech nikoli (silniční doprava). To zřejmě úzce souvisí s pocitem vlastní kontroly procesu, resp. nemožnosti v případě letecké dopravy vlastními silami daný proces ovlivnit.

Je paradoxem, že tento falešný pocit stále přetrvává, i když dnešní technické řídicí systémy jsou o mnoho řádů bezpečnější a spolehlivější než sebelépe trénovaný člověk. Zatímco pravděpodobnost poruchy dnes nasazovaných řídicích systémů pro bezpečnostně kritické aplikace bývá lepší než 10^{-9} , pravděpodobnost selhání člověka se běžně uvažuje jako 10^{-3} . To znamená, že zatímco jedno z tisíce lidských rozhodnutí bývá špatné, technický systém, který by prováděl jedno bezpečnostně relevantní rozhodnutí za sekundu, udělá jednu chybu za 32 let. Člověk při stejném pracovním tempu selže každých 17 minut.

Řídicí systémy mají jedinou podstatnou slabinu – navrhují je lidé, a ti, jak je uvedeno výše, chybují. I přesto je možné navrhnout systémy, které jsou o šest řádů spolehlivější než jejich tvůrci.

2.1 Motivace k dané problematice

2.1.1 Kritické aplikace v letectví

Vývojový trend v letecké technice [2] v posledních letech směřuje k implementaci výkonově optimalizovaných letounů (*Power Optimized Aircraft*) za využití metod *Fly-By-Wire* a *Power-By-Wire*, přičemž elektrohydraulické (EHA) a elektromechanické (EMA) prvky, inteligentní palivová čerpadla, atp. jsou typickými reprezentanty této moderní techniky.

V současné době je výkon pro hydraulické akční členy dodáván centrální hydraulickou jednotkou, která trvale poskytuje potřebný tlak pro všechny hydraulické okruhy v letadle, přičemž pohyb akčních členů je ovládán prostřednictvím ventilů. Tento způsob má značné množství nevýhod, mezi něž patří především velká celková hmotnost hydraulických okruhů, složitá instalace a náročná údržba. Naopak výhodou tohoto tradičního řešení je jeho spolehlivost a technická nenáročnost.

V případě použití EHA/EMA je do lokálních hydraulických okruhů dodáván tlak pouze podle potřeby a jeho velikost závisí na aktuální velikosti a typu zátěže. Nahrazení centrálního hydraulického okruhu akčními členy EHA a EMA má za následek nejenom výrazné snížení celkové hmotnosti systému, ale i jednodušší zástavbu a údržbu během provozu letadla s možností jednoduše zaměnit jednotlivé prvky. Moderní číslicové řídicí systémy umožňují kromě implementace pokročilých metod řízení také sledovat a diagnostikovat celý systém.

Důležitou částí každého akčního členu EHA/EMA je elektrický pohon s bezkartáčovým motorem (BLDC), jehož vlastnosti významnou měrou ovlivňují výkon a spolehlivost celého akčního členu. Proto musí být výběru motoru, návrhu řídicí a výkonové elektroniky, ovládacích algoritmů a testovacích procedur věnována patřičná pozornost.

2.1.2 Použití elektroniky v kritických úlohách v letectví

Použití EHA/EMA v kritických úlohách s sebou nese značné požadavky jak na samotné motory, tak na řídicí elektroniku i řídicí algoritmy. Akční členy jsou většinou používány ve velmi náročných klimatických podmínkách, při teplotách od -40 do $+80$ °C, s vysokými požadavky na rychlý a spolehlivý rozběh motoru, jeho plynulé řízení i kontrolované zastavení, popř. rychlou reverzaci smyslu otáčení. Tyto požadavky jsou ještě zdůrazněny požadavkem na co nejmenší velikost a nízkou cenu celého zařízení.

Koncová cena systému je výrazně snížena zlepšující se dostupností komerčně vyráběných součástek, tzv. *Commercial-Off-The-Shelf* (COTS), které začínají běžně splňovat požadavky na teplotní odolnost i spolehlivost kritických úloh v letectví. Díky velkému výběru potřebných komponent systému je možné sestavit řídicí systém EC motoru přesně podle požadavků příslušné úlohy.

Vývoj software i hardware pro letecké aplikace dnes probíhá především podle požadavků příslušných norem RTCA/DO-178 [3] , RTCA/DO-254 [4]

a RTCA/DO-160 [5] . Tyto rozlišují 5 kategorií podle stupně selhání příslušného prvku na celkovou činnost letadla. Normy rovněž předepisují celý vývojový cyklus od plánování, vývoje, ověřování, testování až po management kvality a výrobu.

Tabulka uvádí přehlednou formou nároky, jaké jsou kladeny na elektroniku na palubě letadla. Pro nejkritičtější třídu letadel a katastrofickou kategorii poruchy musí splňovat zařízení pravděpodobnost poruchy nižší než 10^{-9} na jednu letovou hodinu. Takové číslo lze dosáhnout za použití mnohonásobného zálohování funkcí a odlišným vývojovým přístupem. Mezi zařízení, která musí splňovat tyto vlastnosti, patří např. hlavní palivová čerpadla, řídicí jednotky hlavních pohonů, akční členy pro řízení směru letu, atd.

Certifikace zařízení, která splňují nejvyšší stupně bezpečnosti, tzn., že patří do kategorie selhání – hazardní a katastrofická, je rovněž velmi nákladný a časově náročný proces vývoje. Je proto snaha tyto náklady snížit na únosnou mez za použití nových vývojových postupů a technologií. Udávaná finanční náročnost certifikace a prokázání bezpečnosti ve třídách „*Nebezpečné/Katastrofické*“ činí až 150% nákladů na vývoj samotného zařízení.

Používání moderních vývojových prostředků v oblastech hardware, software, matematicko-fyzikálních modelovacích programů a dalších podpůrných aplikací efektivně snižuje výsledné náklady. Součástí disertační práce je využití a ověření využitelnosti těchto prostředků při vývoji kritických servopohonů v letecké technice.

2.2 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je návrh řídicího systému elektronicky komutovaného (EC) motoru, s předpokládanou implementací především pro oblast kritických aplikací v letectví. Důraz bude kladen i na rozběhovou fázi, při které není známa aktuální poloha rotoru vůči vektoru magnetického toku statoru motoru. Správná volba sepnutí výkonového polovodičového stupně při startu je klíčová pro zajištění správného a spolehlivého chodu. Vyvinutý algoritmus musí navíc splňovat částečné požadavky na variabilitu připojeného motoru a zátěžného momentu na hřídeli při rozběhu. Součástí disertační práce bude i analýza pracovních charakteristik pohonu.

Jedním z dílčích cílů práce je vývoj hardware řídicího systému, který bude tvořen blokem výkonové elektroniky a odpovídající mikroprocesorovou jednotkou. Jednotlivé části budou vytvořeny samostatně z důvodu snadného

přizpůsobení konkrétním požadavkům cílové aplikace, především mechanického subsystému. Modulární struktura je výhodná i pro nezávislé inovování jednotlivých částí. Limitujícím faktorem je maximální příkon použitého pohonu, jmenovitě do 500 W při stejnosměrném napájecím napětí do 30 V.

Při vývoji řídicího systému bude kladen zvláštní důraz na spolehlivost a bezpečnost daného řešení, jak bylo nastíněno v úvodní části této práce. Veškeré vývojové práce budou probíhat na základě metody *Model Based Design*. To znamená, že před fyzickou realizací jednotlivých modulů bude provedena analýza a modelování v prostředí MATLAB/Simulink.

Neodmyslitelnou součástí řídicí mikroprocesorové desky je vnitřní firmware signálového procesoru, jehož vývoj, ověření a implementace tvoří další dílčí cíl práce. Vytvořený software přesně specifikuje základní parametry celého servopohonu, jeho chování a velkou měrou se podílí i na celkové spolehlivosti zařízení. Vzhledem ke složitosti řízení EC motorů, především v kritických aplikacích, bude vývoj a verifikace řídicích algoritmů podstatnou částí řešení práce. Pro vývoj těchto algoritmů bude opět použito metody *Model Based Designu*, která mimo jiné i podporuje automatické generování strojového kódu pro danou cílovou platformu. To značně urychluje vývoj a hledání optimálního řešení.

3 SHRUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ V OBORU

V disertační práci je pojednáno o základních způsobech řízení elektronicky komutovaných motorů. Jak bylo naznačeno, mezi základní 2 metody z pohledu řízení statorových a rotorových veličin patří skalární a vektorové řízení, přičemž obě metody lze navíc aplikovat sensorově nebo bezsensorově.

Většina produktů renomovaných firem slouží k sensorovému skalárnímu řízení elektronicky komutovaných motorů. Jedná se spíše o řešení „na míru“ podle konkrétních požadavků zákazníka. Nabízené moduly však nesplňují požadavky na sensorové a bezsensorové řízení a nelze je ani použít v oblasti kritických aplikací v letectví z důvodu nedostatečných parametrů (dynamika, přesné polohování, řízení rychlosti) a absence certifikací podle příslušných leteckých norem.

Na druhou stranu, požadavky na vyšší metody řízení (vektorové řízení, DTC, predikce polohy pomocí estimátorů, atd.) jsou implementovány do řízení pohonů s asynchronními a synchronními motory. Jejich použitím při řízení EC motorů se většinou zabývají pouze technické univerzity a výzkumná centra, především v rámci řešení individuálních projektů. Je to z důvodu poměrně vysoké náročnosti těchto metod, především během implementaci připravených algoritmů do současné řídicí elektroniky. Výkonová a rozsahová náročnost většiny metod nedovoluje jejich použití při řízení kritických servopohonů. Prokázání spolehlivosti a bezpečnosti takto rozsáhlých řídicích algoritmů je zpravidla nejobtížnější část celého řešení.

Motivací této disertační práce je proto vývoj elektroniky a řídicího algoritmu pohonu, který bude splňovat definované vlastnosti a kritéria pro nasazení v kritických aplikacích. Je zřejmé, že je potřeba nalézt kombinaci známých metod řízení a najít nejschůdnější řešení z hlediska velikosti kódu, výpočetní náročnosti a výsledné optimalizace regulačních procesů.

Vývojový proces takového zařízení bude probíhat podle nastíněného vývojového „V cyklu“ za použití metod modelování, t.zv. „*Model Based Design*“ a s podporou optimalizačních metod vycházejících z celkového modelu řízeného systému.

4 PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Osnova řešení zahrnuje následující body:

- definice kritických aplikací, moderní trendy v oblasti letecké techniky, požadavky na leteckou techniku,
- popis postup vývoje mechatronických soustav a moderních trendů vývojového cyklu, založených na simulačním modelování technických soustav,
- studium a shrnutí současného stavu v oblasti sensorového a bezsensorového řízení EC motorů při různých rychlostech otáčení,
- posouzení a experimentální ověření jednotlivých možností řešení, porovnání náročnosti jednotlivých metod, kritické vyhodnocení nejvíce použitelných metod řešení,
- experimentální ověření nejvhodnějších metod řízení na funkčních vzorcích elektroniky s příslušným motorem,
- návrh vlastní koncepce řešení, která bude splňovat vytyčené cíle,
- návrh funkčních vzorků jednotlivých hardwarových i softwarových modulů řídicího systému,
- výroba, osazení, oživení a ověření funkčnosti jednotlivých modulů řídicího systému a výkonové elektroniky
- modelování elektronicky komutovaného motoru na PC, modelování řízení a výkonové elektroniky
- optimalizace navrženého řešení, nastavování vnitřních regulátorů modelováním soustavy v prostředí MATLAB/Simulink
- experimentální testování na měřícím *standu* – spolupráce s externí společností, analýza momentové charakteristiky pohonu.

5 HLAVNÍ VÝSLEDKY A PŘÍNOS DISERTAČNÍ PRÁCE

5.1 Hlavní výsledky

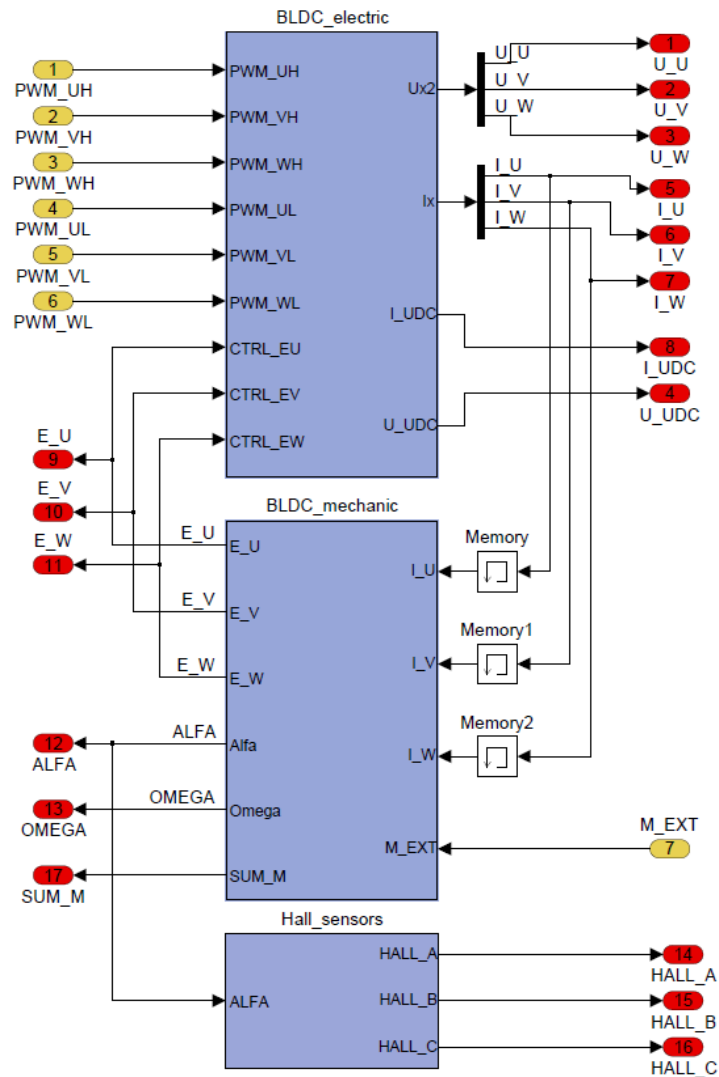
Model Based Design je metoda rychlého a efektivního návrhu libovolného dynamického systému. Základem návrhového procesu je matematicko-fyzikální model systému v prostředí MATLAB/Simulink, který je během vývoje průběžně zpřesňován a jeho kvalita je testována při simulacích na reálném hardware. Disertační práce ukazuje možnosti MBD při návrhu řídicích algoritmů bezkartáčových stejnosměrných motorů (EC motorů) při sensorovém řízení. Výstupy simulací jsou přímo aplikovány v reálném hardware systému dSPACE, ke kterému je připojena uživatelská elektronika. MBD nabízí automatické generování kódu z modelu v Simulinku. Tato metoda nejen zásadně zkracuje vývojový cyklus, ale také odstraňuje obvyklé a časté chyby vznikající při manuálním psaní řídicího firmwaru.

5.1.1 Model EC motoru

Na níže uvedeném Obr. 1 je znázorněn výpočtový model vytvořený v prostředí MATLAB/Simulink.

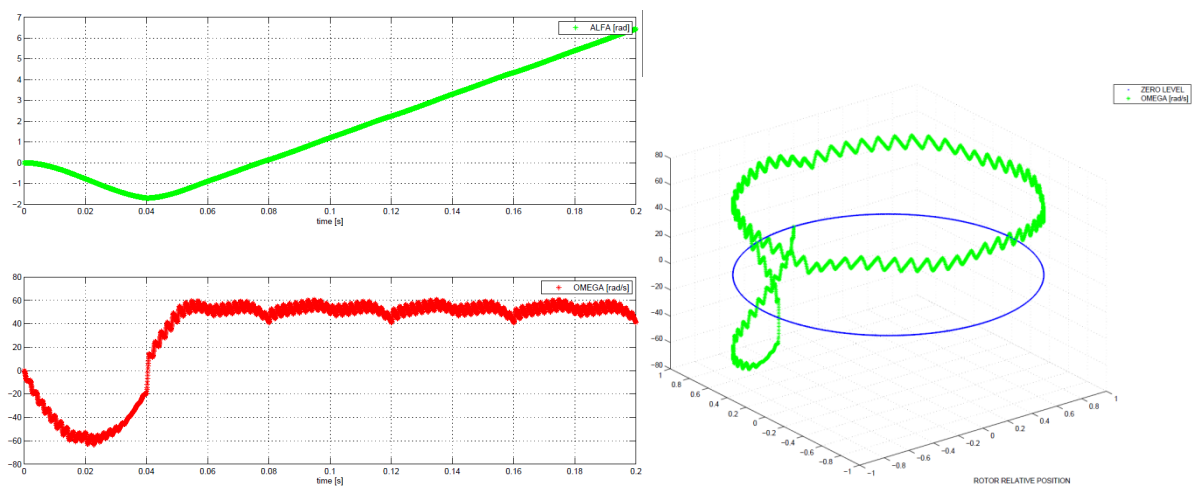
Skládá se z několika samostatných bloků popisujících reálné chování EC motoru. Pro snazší orientaci ho lze rozdělit na tři základní části – elektrickou, mechanickou a sensorickou. Takto členěný pohled usnadňuje libovolnou aplikaci modelu do řídicích obvodů a složitějších systémů.

Tento model byl navržen na základě katalogových parametrů jednotlivých výrobců motorů a s dostatečnou přesností popisuje jejich reálné chování. Přes grafické uživatelské rozhraní je možné specifikovat až 20 různých parametrů popisujících elektrickou a mechanickou část stroje. Takto vytvořený model lze dále zapouzdřit do jednoho funkčního bloku a využít v libovolných dalších simulacích.



Obr. 1: Výpočtový model EC motoru v Simulinku.

Pokud jsou známy výchozí podmínky, tzn. moment připojené zátěž na rotoru, její moment setrvačnosti a moment tření, lze pomocí modelu motoru najít správné zvyšování kmitočtu komutace a optimalizovat momentovou a rozběhovou charakteristiku. Při simulacích byly použity katalogové údaje motoru fy Maxon (EC45). Optimalizovaný rozběhový průběh je uveden na Obr. 2. Na obou průbězích je viditelný i prvotní přechod rotoru do nejbližší rovnovážné polohy.

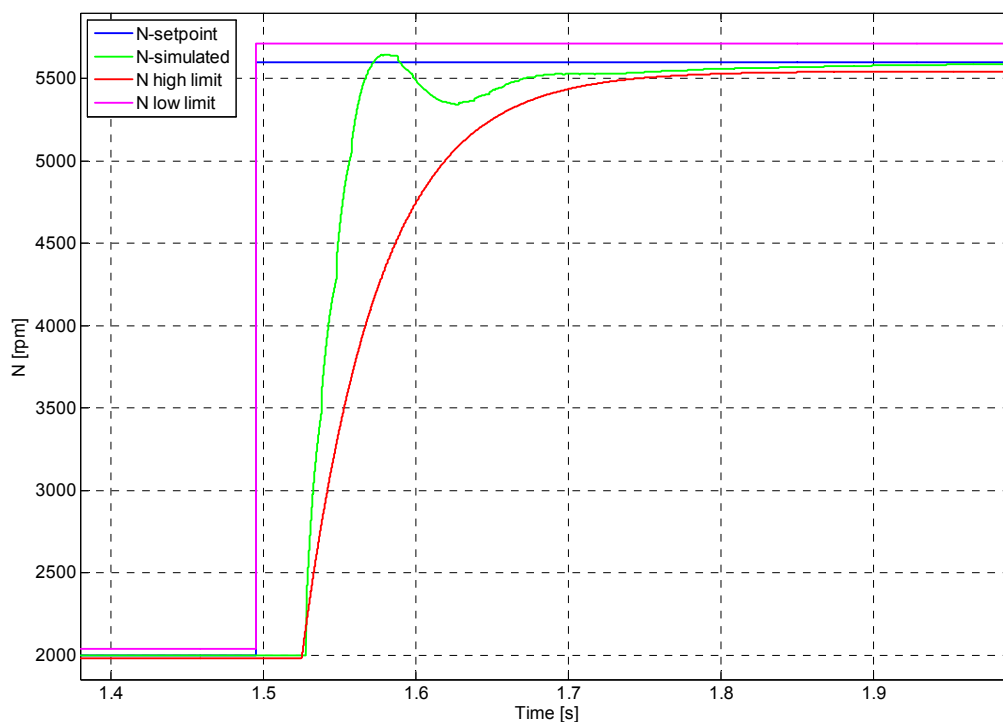


Obr. 2: Optimalizovaný rozběh motoru.

5.1.2 Simulace regulátoru

Na Obr. 3 je znázorněna výsledná odezva regulační smyčky s optimálně nastaveným regulátorem. V grafu jsou růžovou a červenou barvou znázorněny horní a spodní limity, které nesmí být při skokové změně otáček překročeny. Tyto limity vychází z technického zadání, kde bývá většinou definován povolený překmit a maximální čas dosažení požadované hodnoty. Hodnoty jsou většinou určeny z dynamiky celého hydraulického okruhu a pohonné jednotky. Modrou barvou je dále znázorněna požadovaná hodnota otáček. Zelenou barvou pak výsledek simulace a skutečná odezva regulátoru.

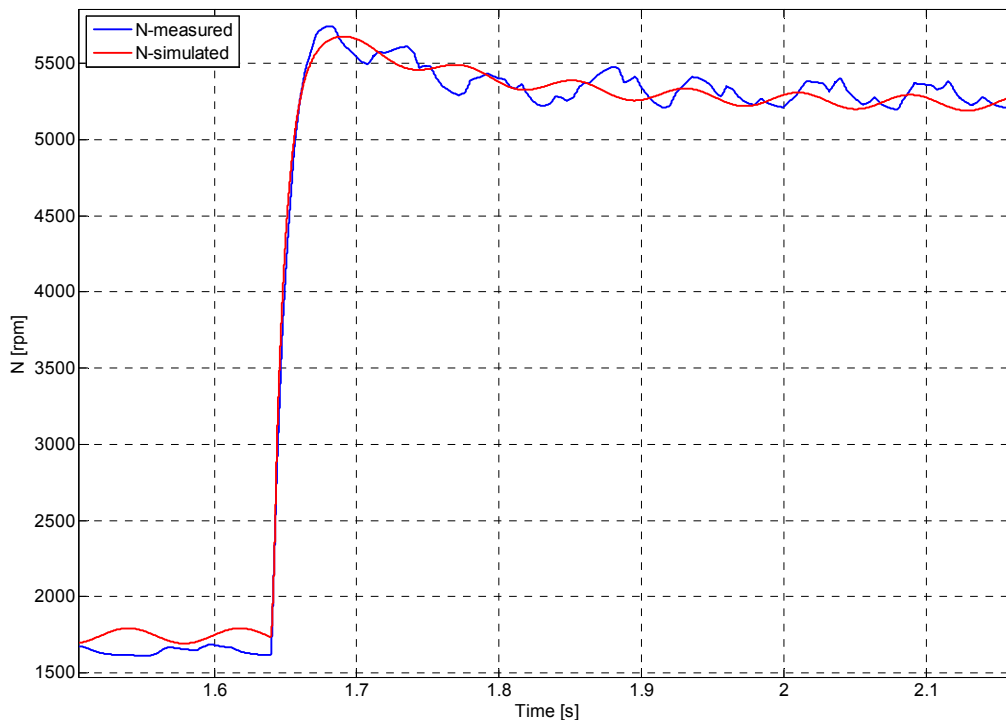
Z výsledku lze konstatovat, že navržený regulátor splňuje požadavky na kvalitu regulace podle technické specifikace a lze jej použít pro reálný systém. Celá metodika se ukazuje jako vhodná pro optimální návrh řídicích algoritmů. Použitím této metody byl i snížen celkový vývojový čas a náklady na přípravu řídicího algoritmu.



Obr. 3: Výsledek simulace optimalizovaných regulátorů.

5.1.3 Výsledky na reálném standu

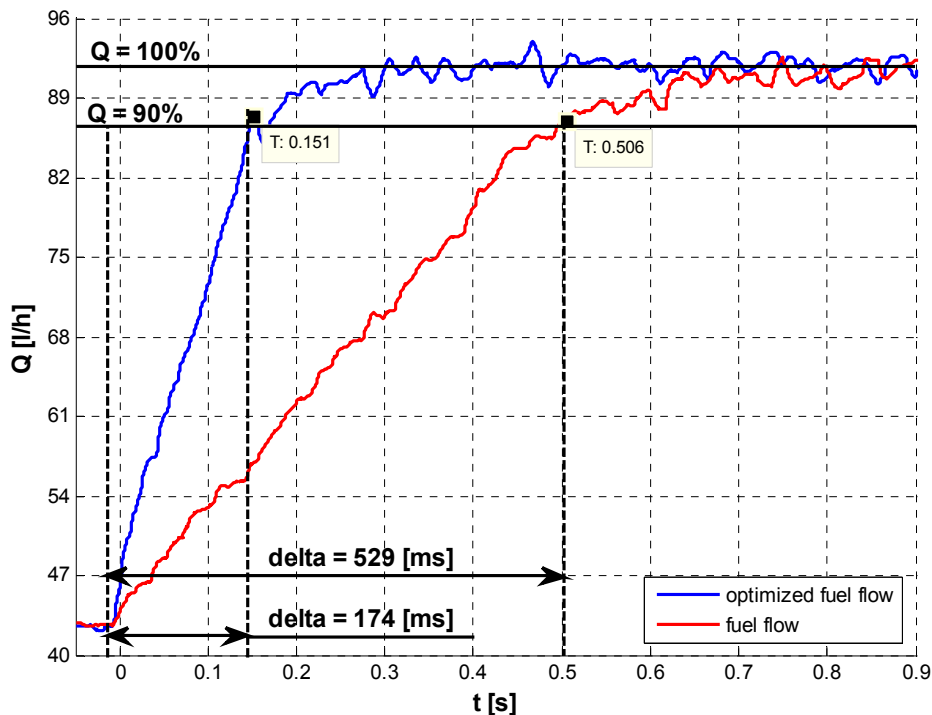
Porovnání odezvy modelu a reálného hydraulického systému s čerpadlem obsahující BLDC motor je uvedeno na Obr. 4. Odezva byla pozorována na jednotkovém skoku otáček čerpadla z hodnoty 1700 min^{-1} na cca 5200 min^{-1} . Modrou barvou je vykreslena přechodová charakteristika modelu a červeně přechodová charakteristika reálného čerpadla. Z grafu je patrné, že simulací získaná přenosová funkce dostatečně odpovídá chování reálného systému čerpadla. S modelem lze tedy pracovat při tvorbě řídicího algoritmu a při nastavování vnitřních regulačních smyček.



Obr. 4: Odezva modelu a reálného systému na jednotkový skok.

Výsledky získané simulací byly implementovány do nastavení regulačních smyček reálného zařízení. Na měřicím standu s hydraulickým okruhem byly provedeny zkoušky dynamiky systému, simulující skokovou změnu průtoku paliva palivovým čerpadlem. Skoková změna byla z výchozího průtoku 43 l/h, což odpovídá otáčkám BLDC motoru 3250 min^{-1} . Nová požadovaná hodnota průtoku je 92 l/h (otáčky cca 7300 min^{-1}). Obr. 5 ukazuje porovnání nastavení optimalizovaného a neoptimalizovaného regulátoru.

Modrou barvou v grafu, Obr. 5, je znázorněn optimalizovaný průběh průtoku paliva čerpadlem. Červená barva znázorňuje neoptimalizovaný regulátor. Optimalizací bylo tedy dosaženo zrychlení dynamiky systému z 530 ms na cca 180 ms.



Obr. 5: Výsledky měření – skoková změna průtoku paliva.

5.2 Přínos disertační práce

Celková motivace vývoje a výzkumu v oblasti EC motorů je inspirována stále se zvyšujícím podílem tohoto typu pohonů v průmyslových, leteckých a automobilových aplikacích. Tyto typy motorů, které se rovněž uplatňují a budou uplatňovat i ve výrobních strojích, jejichž výzkumem, vývojem a ověřováním se školicí pracoviště dlouhodobě zabývá. Získané poznatky tak jsou důležitou oporou pro sledování současného technologického trendu ve světě. Vývojem a výrobou řídicích systémů pro elektricky komutované motory se zabývá, mnoho světových firem a univerzitních pracovišť.

V komerčním sektoru se můžeme setkat většinou s produkty, které jsou přizpůsobeny na míru konkrétnímu mechanickému systému s konkrétním elektropohonem, vyráběným stejnou společností. Převážná část slouží k jednoduchému řízení, které pro svoji činnost vyžaduje motor osazený absolutním snímačem rotačního pohybu. Pro potřeby senzorového řízení v širokém rozmezí otáček a bezsenzorového řízení jsou tyto systémy téměř nepoužitelné.

Druhou stranu mince tvoří řešení různých univerzitních projektů. Většinou se jedná o velmi pokrokové a inovativní způsoby řízení, především různé modifikace vektorových metod a metod přímého řízení momentu. Pro svoji složitost se zcela vymykají omezeným možnostem komerčních elektronických modulů. Výpočtová náročnost aplikovaných matematických modelů použitých při řízení je značnou zátěží i pro velmi výkonný stolní počítač. Z tohoto důvodu jsou opět tato řešení nevhodná pro nasazení v letecké technice, především při prokazování jejich spolehlivosti a bezporuchovosti.

Hlavní teoretické přínosy disertační práce je možno shrnout do následujících bodů:

- vývoj, ověření a implementace vhodných metod senzorových a bezsenzorových řízení EC motorů v rozběhové fázi a při normálním provozu,
- vývoj, ověření a implementace vhodných moderních technologií a trendů v oblasti elektrických servopohonů pro kritické aplikace, spojené s řízením EC motorů,
- vypracování metodiky získání průběhu provozních charakteristik měřeného EC motoru jako důležité vstupní informace pro řízení v kritických aplikacích; tyto informace jsou velmi často nedostupné.

Přínosy disertační práce pro technickou praxi byly ověřeny ve spolupráci s externí společností UNIS, a.s., sekci Mechatronických systémů, spočívají v oblasti elektrických servopohonů a je možno je shrnout do následujících bodů:

- získání „*know-how*“ pro podporu dalšího výzkumu a vývoje metodou *Model Based Design*,
- získání „*know-how*“ v oblasti kritických aplikací a jeho ověření pro letectví na vývojových projektech externí firmy.

V oblasti pedagogické pak výsledky práce představují přínos využitelný ve všech stupních studia konstrukčních studijních oborů vysokých škol technického zaměření, především pak v možnostech implementace nových metod řízení pohyblivých částí výrobních strojů a robotických zařízení.

6 ZÁVĚR

Předložená disertační práce analyzuje současné technické trendy v oblasti elektrických servopohonů středních výkonů v kritických aplikacích leteckého průmyslu. Jsou diskutovány požadavky na kritické aplikace, jejich zařazení podle stupně závažnosti selhání a je krátce nastíněna problematika certifikování hotového výrobku před samotným nasazením do provozu na palubě letadla.

V úvodní části jsou popsána komerčně dostupná řešení řídicích jednotek elektronicky komutovaných motorů, která se však pro uvedené průmyslové odvětví nehodí z důvodu nedostatečných technických parametrů. Jsou dále blíže analyzovány moderní způsoby vektorového řízení a přímého řízení momentu. Tyto metody byly po ověření taktéž shledány jako neuspokojivé, především z důvodu výpočetní náročnosti na soudobé řídicí mikroprocesory.

Byl proto navržen a experimentálně ověřen způsob řízení, který je kombinací několika reálně použitelných metod. Pro potřeby dynamického řízení EC motoru se jeví jako nezbytné motor osadit snímači, alespoň nejjednodušší formou, tzn. třemi Hallovy snímači rozmístěnými po 60°. Je tím zásadně zvýšena spolehlivost řízení rozběhu motoru i řízení otáček v širokém rozsahu provozních mezí. Jako způsob řízení motorů ve velmi nízkých otáčkách se jeví nejlepší aplikovat metody sinusového řízení, tj. buzení všech tří fází EC motoru současně. Rotor motoru poté dosahuje hladké momentové charakteristiky a připojená zátěž nevykazuje trhavý pohyb. Po akceleraci na vyšší otáčky přechází řízení v klasické, tj. jsou současně napájena pouze 2 vinutí.

Byla navržena struktura regulačních obvodů, která se většinou skládá z nadřazené rychlostní a podřízené proudové smyčky. Tyto regulátory byly aplikovány jako diskrétní v signálovém procesoru.

Značnou část disertační práce tvoří aplikování metody „*Model Based Design*“ při vývoji a optimalizaci řídicího algoritmu pohonu. Byl vytvořen model elektronicky komutovaného motoru, na kterém lze poměrně snadno odladit fázi rozběhu motoru. Porovnáním výsledků simulací s výsledkem reálného motoru z měřicího stolu lze konstatovat, že při dodržení správných vstupních hodnot z katalogových listů výrobce se měřené a simulované průběhy a chování téměř shodují. Značně omezující vlastností tohoto modelu je poměrně velká časová a výpočetní náročnost simulace. Pro simulování několika vteřin chování motoru po zapnutí je výpočtový čas v řádu několika minut. Model lze zjednodušit za cenu snížení výsledné přesnosti v porovnání s reálným chováním.

Za velmi efektivní metodu vývoje na bázi modelování lze považovat optimalizační fázi při ladění regulačních obvodů. Bývá častou technickou praxí, že detailní matematicko-fyzikální popis řízeného systému není možné analyticky vytvořit, především z důvodu jeho složitosti. Nabízí se tedy možnost experimentálního testování takového systému. Na příkladu bylo ukázáno, že metodami modelování lze dosáhnout přiblížení k požadovaným přechodovým charakteristikám za cenu výrazného zkrácení času oproti metodám zkoušení „na slepo“. Lze tak i předejít nebezpečným provozním stavům v případě rozsáhlejších a větších systémů. Po aplikaci získaných parametrů a konstant ze simulací jsme obdrželi výsledky, které se téměř shodují s chováním reálného systému.

Nevýhodou simulačního modelování je i přes stále se zdokonalující výpočetní techniku stále vysoká náročnost na výpočetní výkon počítače. I přes maximální zjednodušení modelovaných systémů nelze na soudobém hardware reálně simulovat některé výpočtově náročné algoritmy řízení, mezi něž např. patří bezsensorové vektorové metody. V tomto případě je nutné k problému přistupovat odlišně a modelovat pouze některé části systému odděleně. Poměrně vysoká cena simulačních vývojových prostředků (MATLAB, dSPACE, atd.) patří rovněž mezi nepřehlédnutelné nevýhody.

Při dodržování určitých zásad při tvorbě simulačních modelů, schématických diagramů, řídicích algoritmů, atd. lze však s výhodou používat moderní softwarové vybavení pro automatické generování vývojové dokumentace. Lze tedy konstatovat, že metoda „*Model Based Design*“ je efektivním postupem pro zkrácení životního vývojového cyklu elektrických servopohonů v kritických oblastech. Její masové použití však v nejbližších letech nelze očekávat, obzvláště v leteckém průmyslu, kde jsou veškeré inovace a moderní přístupy aplikovány se značným časovým zpožděním.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BRANDEJSKÝ, T. *Vývoj softwaru pro bezpečnostně kritické aplikace z pohledu kybernetiky*. Časopis Automatizace, ročník 51, číslo 4, duben 2008.
- [2] ŠVÉDA, M., HUBÍK, V. *Elektrické servopohony pro kritické aplikace v letectví*. Časopis Automa, číslo 7, Praha 2008.
- [3] RTCA/DO-178B: *Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification*. RTCA, Inc.: USA, 1992.
- [4] RTCA/DO-254: *Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware*. RTCA, Inc.: USA, April 2000.
- [5] RTCA/DO-160D: *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment*. RTCA, Inc.: USA, July 21, 1998. (Latest revision RTCA/DO-160F)
- [6] ŠVÉDA, M., OPLUŠTIL, V., HUBÍK, V. *Design and development of COTS based engine control system for aerospace applications*. Nепublikovaný článek, 2008.
- [7] SINGULE, V., BŘEZINA, T. *Návrh mechatronické soustavy*. Kapitola v knize *Mechatronika*, str. 193-231, Computer Press, Brno, 2006.
- [8] PAVELKA, J. *Elektrické pohony*. ČVUT v Praze, Fakulta elektrotechnická, Praha, leden 2007.
- [9] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony*. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Brno, 1999.
- [10] SINGULE, V. *Motory s elektronickou komutací (EC motory) pro mechatronické aplikace*. Časopis Technika a trh, číslo 9, Praha 2007.
- [11] BROŽ, V., SINGULE, V. *Motory Maxon – motory vhodné pro vysoké teploty*. Časopis Technika, číslo 3, vydavatel Techpark, Žilina 2009.
- [12] MORETON, P. *Industrial Brushless Servomotors*. Reed Educational and Professional Publishing Ltd, 2000. ISBN 0-7506-3931-8.
- [13] ZAMBADA, J. *Sensorless Field Oriented Control of PMSM Motors*. Microchip Technology Inc., Application Note AN1078, 2007.

- [14] *Brushless DC Motor Field Oriented Control*. Embedded Studio, web page, <http://embeddedstudio.com>, září 2009.
- [15] OZTURK, S.B., TOLIYAT, H.A. *Direct Torque Control of Brushless DC Motor with Non-Sinusoidal Back-EMF*. Paper in Electric Machines & Drives Conference, IEMDC '07, IEE International.
- [16] *Maxon Motor*. Výrobce elektrických pohonů, web page, <http://www.maxonmotor.com>, září 2010.
- [17] *Anaheim Automation*. Výrobce elektrických pohonů, řízení a motorových doplňků, web page, <http://www.anaheimautomation.com>, leden 2010.
- [18] *Allegro MicroSystems, Inc.* Výrobce polovodičových čipů pro elektrické pohony, web page, <http://www.allegromicro.com>, březen 2009.
- [19] *Microchip*. Výrobce mikroprocesorů a DSC pro motorové aplikace, web page, <http://www.microchip.com>, září 2010.
- [20] PROKOP, L., CHALUPA, L. *3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x*. Application Note, AN1914, Freescale Semiconductor, 2005.
- [21] BROWN, W. *Brushless DC Motor Control Made Easy*. Application Note, AN857, Microchip Technology Inc., 2002.
- [22] ELLIOT, CH., BOWLING, S. *Using the dsPIC30F for Sensorless BLDC Control*. Smart Power Solutions, LLP, Microchip Technology Inc., 2004.
- [23] HOLUB, R., VINTR, Z. *Spolehlivost letadlové techniky*. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno 2001.
- [24] ZAMBADA, J. *Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F DSC*. Application Note, AN1017, Microchip Technology Inc., 2005.

ŽIVOTOPIS

Datum a místo narození: 14. ledna 1983, v Přerově

Vzdělání:

- 2007 – současnost Fakulta strojního inženýrství, VUT Brno
Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Doktorské studium, prezenční forma.
- 2005 – 2007 Fakulta elektrotechniky a komun. technologií, VUT
Brno
Ústav radioelektroniky
Navazující magisterské studium. Dokončené
magisterské vzdělání.
- 2002 – 2005 Fakulta elektrotechniky a komun. technologií, VUT
Brno.
Ústav radioelektroniky.
Dokončené bakalářské vzdělání.
- 1994 – 2002 Gymnázium Jana Blahoslava – s rozšířenou výukou
jazyků Generála Štefánika 10, Přerov
Maturitní předměty: angličtina, čeština, matematika,
fyzika

Dosavadní praxe:

- 2006 – současnost UNIS, a.s., Mechatronické systémy
vývoj HW a SW řídicí techniky pro automobilový
a letecký průmysl
- 2005 – 2006 Honeywell spol. s r.o., Global Design Center
test technik, experimentální testování řídicích jednotek
plynových kotlů (EMC a CQ testování)

Jazykové znalosti:

angličtina – slovem i písmem

němčina – základní znalost

Tvůrčí aktivity:

- funkční vzorky řídicí a výkonové elektroniky BLDC motorů
- software pro detekci přechodových jevů – Arvin Meritor
- modul detekce přechodových jevů – Arvin Meritor, Liberec
- metodika analýzy a vyhodnocení přechodových jevů
- podání grantového projektu FRVŠ (EC motory v elektrických servopohonech)
- vedení studentů při bakalářských a magisterských diplomových prací

Vyučované předměty:

2EL Elektrotechnika (laboratoře a ateliéry)

CEL Elektrotechnika a elektronika (laboratoře)

GAR Prostředky automatického řízení výrobních strojů (cvičení)

GIF Informační systémy a počítačové sítě (cvičení)

Dosažená ocenění:

- cena Děkana FEKT VUT za diplomovou práci
- cena Děkana FEKT VUT za bakalářskou práci

Abstrakt

Disertační práce na téma „*Elektrické servopohony pro kritické aplikace*“ ucelenou formou analyzuje požadavky a nové trendy v oblasti elektrických servopohonů v oblasti kritických aplikací v letectví. Práce se především věnuje elektronicky komutovanému motoru středních výkonů, a to od funkčního popisu stroje přes dosud známé řídicí algoritmy a jejich porovnání až po návrh vlastního řešení elektrického pohonu. Jsou nastíněny vývojové práce v oblasti leteckého průmyslu od technického zadání, funkčního vzorku, prototypu až po navázání na sériovou výrobu a následnou certifikaci. Jsou rovněž aplikovány moderní metody vývoje založené na matematicko-fyzikálním modelování řešeného systému, které stále hledá své hlubší uplatnění v tomto odvětví. Na příkladu jsou také ukázány optimalizační postupy řídicích algoritmů. Tato práce si rovněž klade za cíl ověřit zjednodušení certifikačních procedur na základě generovaných dokumentů a výstupů z fáze modelování v prostředí MATLAB.

Abstract

The presented work deals with doctoral thesis named “Electrical drives for critical application”, which is solved in the Institute of Production Machines, Systems and Robotics. The paper tries to subsequently describe the progress during development of electric drive and to introduce the findings reached during project solving. The critical application requirements have been defined at the beginning, especially for the aerospace industry point of view. The work deals with the architecture of the control and power electronic, control software algorithms of the brush and brush-less BLDC motor with respect to the final certification aspects. It is also discussed the effectiveness of the new development methods based on the modeling and simulation. The Model Based Design approach have been proved and verified during aircraft onboard equipment development. The findings of these are discussed at the end of this work.