

ANALÝZA BEZSENZOROVÉHO ŘÍZENÍ BLDC MOTORŮ V LETECKÝCH APLIKACÍCH

V. Hubík, I. Szabó, M. Švéda

UNIS spol. s r.o., Mechatronické systémy

Abstrakt

The recent development of aviation systems is leading to implementation of Power Optimized Aircraft by means of FBW and PBW technologies. Effort is being aimed at replacement of existing hydraulic actuators by intelligent EHA/EMA actuators. Implementation of any new technology in the aerospace industry makes strict requirements on safety and reliability of on-board equipment. Before application onboard the aircraft, many simulations and tests have to be performed to prove reliability and usability of any newly developed equipment. An essential part of the development cycle is computer modeling and simulation, which considerably accelerates development and reduces time-to-market. A fundamental element that drives EHA/EMA actuator is the BLDC motor. In critical applications, it is necessary to ensure correct start-up of the motor. This article is aimed at analysis and simulation of the start-up phase of the BLDC motor and summarises first results obtained during development of control algorithms.

1 Úvod

Vývoj leteckých systémů se v poslední době soustřeďuje k implementaci konceptu *Power Optimized Aircraft* pomocí technologií *Fly-by-Wire* (FBW) a *Powered-by-Wire* (PBW). Snahou je nahradit stávající akční členy, poháněné z centrálního hydraulického systému, inteligentními elektro-hydraulickými (EHA) a elektro-mechanickými (EMA) akčními členy, které jsou schopny dodat potřebnou energii pro pohon aktuátoru dle okamžité potřeby.

Implementace nových technologií v leteckém průmyslu s sebou přináší značné požadavky na bezpečnost a spolehlivost těchto zařízení, což znamená, že před samotným nasazením musí být provedena řada simulací a testů, které prokáží bezpečnost a použitelnost v definovaných podmínkách.

Jádrem každého EHA/EMA akčního členu je stejnosměrný elektrický motor – v současné době se vzhledem k lepším vlastnostem prosazují bezkartáčové elektrické motory, které se řídí v senzorovém nebo bezsenzorovém režimu. Při použití bezsenzorového BLDC motoru odpadá implementace snímací části, čímž se značně zjednoduší konstrukce a sníží celkové náklady na daný aktuátor. Nevýhodou bezsenzorového řízení jsou vyšší nároky na řídicí algoritmus a složitější řídicí elektroniku.

Pro urychlení vývoje nových druhů akčních členů a ověření algoritmů bezsenzorového řízení motorů byla provedena analýza vstupních parametrů a navržen matematický model BLDC motoru, na kterém je prováděn návrh a testování řídicích algoritmů. Následující článek se podrobněji zabývá simulací roztáčení BLDC motoru v bezsenzorovém režimu.

2 BLDC motor

Bezkartáčový stejnosměrný motor (Brushless DC motor – BLDC) se svou podstatou podobá střídavému synchronnímu motoru. Za předpokladu nahrazení mechanického komutátoru komplexním elektrickým systémem je pro jeho modelování možné vycházet z principu klasického stejnosměrného motoru. Fyzickou stavbou jsou však tyto pohony zcela odlišné. Rotorová část BLDC motoru je tvořena permanentními magnety, statorová jednotlivými vinutími. Ta jsou většinou zapojena do hvězdy se vzájemným posunutím o 120° . BLDC motory se konstruují i jako vícepólové systémy, přičemž princip řízení zůstává stejný.

Výhody oproti stejnosměrným motorům jsou zcela evidentní. Absence mechanického komutátoru zvyšuje spolehlivost, účinnost a životnost. Snižuje se produkovaný hluk a odpadá jiskření klasických kartáčových sběračů, čímž se významně redukuje elektromagnetická interference. K nevýhodám patří cena motoru a poměrně složitý řídicí systém.

Pro potřeby řízení (tedy elektronickou komutaci) je vždy nutná znalost okamžitého natočení rotoru a statoru. Tu lze zjistit několika způsoby. BLDC motory osazené magnetickými Hallovými snímači, selsyny, resolvery nebo jinými rotačními enkodéry jsou označovány jako senzorové. Mají však vyšší pořizovací cenu a pro mnohé cost-effective aplikace jsou příliš drahé.

Při bezsenzorovém řízení motoru je snímáno indukované napětí na volném (nepřipojeném) vinutí během pohybu motoru. Způsob určování polohy rotoru na základě průběhu indukovaného napětí se nazývá *back EMF sensing*. Nevýhodou při bezsenzorovém řízení je to, že při startu není poloha rotoru přesně známa. Proto je nutné použít složitější elektroniku a řídicí algoritmus rozběhu. Pro urychlení vývojového cyklu a usnadnění testování a ladění řídicích algoritmů byl vytvořen níže popsáný matematický model BLDC motoru a řídicí elektroniky.

3 Matematický model BLDC motoru

Matematický model, vytvořený v prostředí MATLAB/Simulink, se skládá z několika samostatných bloků popisujících jeho reálné chování. Pro snazší orientaci ho lze rozdělit na dvě základní části - *elektrickou* a *mechanickou*, jak je ukázáno na obrázku 1. Takto členěný pohled usnadňuje libovolnou aplikaci modelu do řídicích obvodů a složitějších systémů.

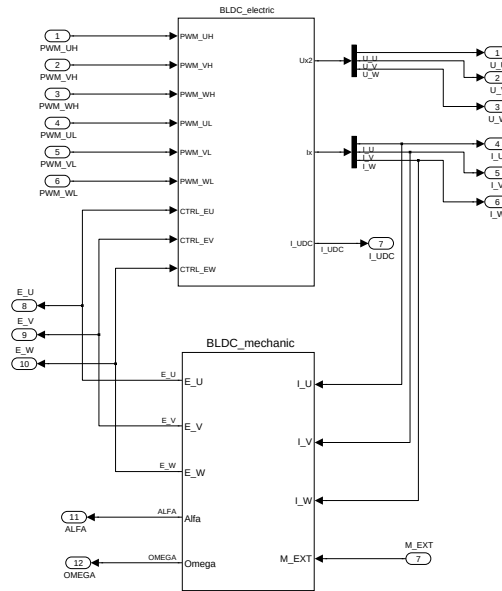
Elektrická část modeluje vnitřní složení a zapojení stejnosměrného BLDC motoru. Poskytuje na svých výstupech základní elektrické parametry jako jsou proudy a napětí jednotlivých vinutí. Jako vstupní parametry jsou vyžadovány konstrukční parametry prvků a příslušné budicí veličiny od nadřazených bloků. Při návrhu matematického modelu byl brán zřetel na použití co nejvyššího počtu parametrů poskytovaných výrobcem tak, aby tento model co nejvěrněji odpovídal reálnému motoru.

Elektrická část modelu je tvořena prvky integrovaného prostředí SimPower a lze na ni pohlížet jako na elektrické schéma motoru, viz obrázek 2.

Mechanická část modelu je založena na pohybové rovnici 1 a tvoří interakci mezi mechanickými a elektrickými veličinami systému. Podle vstupních proudů z elektrické části jsou určeny aktuální pohybové momenty jednotlivých vinutí. V modelu je také počítáno s útlumovými silami, které jsou způsobeny rotačním třením a případným externím brzdícím momentem.

Platí, že

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{M_U + M_V + M_W - M_{EXT} - B \cdot \omega}{J} \quad (1)$$



Obrázek 1: Matematický model BLDC motoru - elektrická a mechanická část

kde $\frac{\partial \omega}{\partial t}$ – představuje časovou derivaci úhlové rychlosti,
 M_U, M_V, M_W – silové momenty jednotlivých vinutí,
 M_{EXT} – externí brzdicí moment rotoru [Nm],
 B – koeficient tření $\left[\frac{Nm}{rad/s} \right]$,
 ω – úhlová rychlost [rad/s],
 J – moment setrvačnosti rotoru $[kg \cdot m^2]$.

Mezi důležité výstupní hodnoty patří velikost indukovaných napětí v jednotlivých vinutích, které jsou dále využívány k detekci komutace při bezsenzorovém řízení. Integrací rovnice 1 dostaneme informaci o aktuální poloze a rychlosti rotoru. Tato část je vytvořena v prostředí Simulink pomocí základních integrovaných bloků, viz obrázek 3.

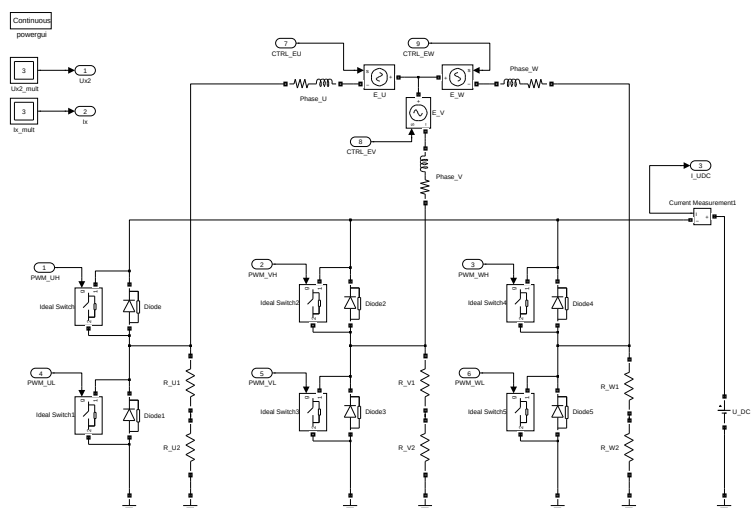
4 Modelování rozběhu bezsenzorového BLDC motoru

Rozběh BLDC motoru v bezsenzorovém režimu probíhá v zásadě ve dvou fázích. V první fázi je motor roztáčen v tzv. frekvenčním režimu, kdy jsou otáčky motoru postupně zvyšovány v otevřené regulační smyčce. Během frekvenčního roztáčení rotoru je snímána velikost zpětného elektromotorického napětí (back EMF sensing – BEMF) na jednotlivých vinutích. Na zpětnovazební řízení se přejde po spolehlivé detekci průchodů tohoto napětí nulou.

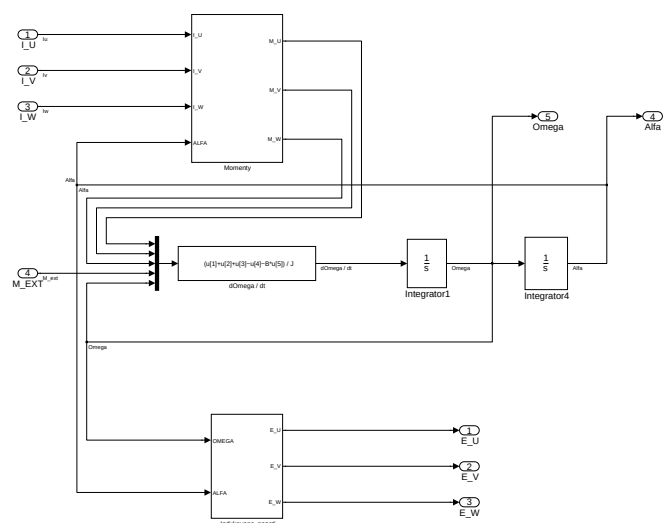
Hlavním problémem frekvenčního rozběhu BLDC motoru je volba správné rychlosti komutace. Vzhledem k tomu, že poloha rotoru není známa, může docházet k předbíhání rotoru a magnetického pole. Rozběh motoru pak není plynulý. Ke spolehlivé detekci průchodů nulou navíc dojde až při vyšší rychlosti rotoru. Během buzení dvou cívek je totiž při nízkých otáčkách BEMF napětí téměř neměřitelné a dochází tak k nesprávné detekci průchodů nulou.

Výsledky simulace rozběhu BLDC motoru touto metodou jsou zobrazeny na obrázku 4.

Princip této klasické metody je popsán v mnoha publikacích. Její nevýhodou je trhaný rozběh, který je zapříčiněn právě těžce odhadnutelnou frekvencí komutace. Na obrázku 4a je



Obrázek 2: Elektrická část BLDC motoru se spínači

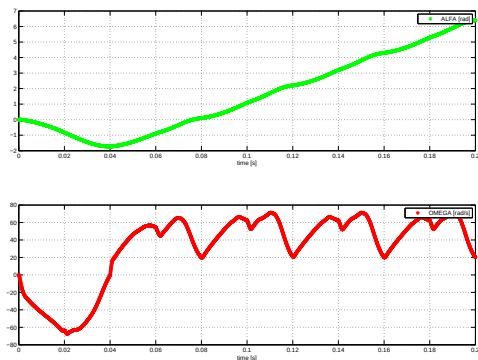


Obrázek 3: Mechanická část BLDC motoru.

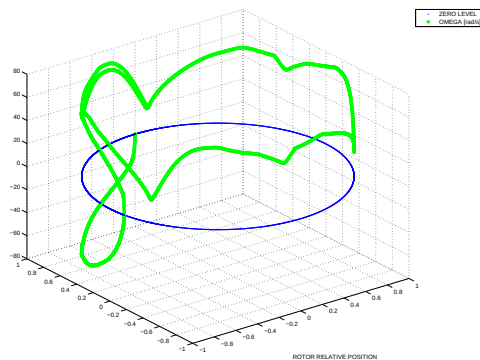
vidět průběh úhlového natočení rotoru při rozběhu, včetně počátečního zapolohování rotoru. Na obrázku 4b je tento rozběh ukázán pomocí 3D projekce v níž je trhaný rozběh motoru zobrazen mnohem názorněji.

Během simulací a testování nových řídicích algoritmů pro rozběh BLDC motoru v bezsenzorovém režimu byla vyvinuta metoda, která umožní plynulý rozběh motoru, navíc s možností zjišťování polohy rotoru již při velmi nízkých otáčkách. Výsledky této metody jsou zobrazeny na obrázku 5.

Z obrázků 5a a 5b je zřejmé, že pomocí této metody je dosaženo mnohem lepších výsledků. Rozběh je podstatně plynulejší a polohu rotoru je možno snadno detekovat již během rozběhové fáze.

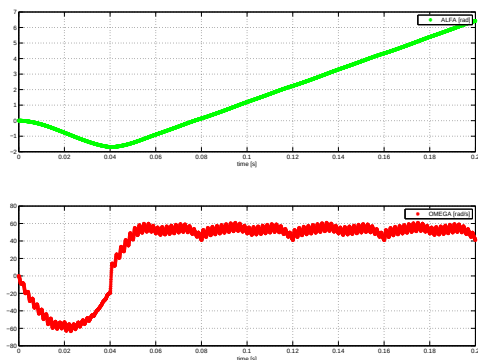


(a) Časový průběh natočení rotoru a úhlové rychlosti motoru

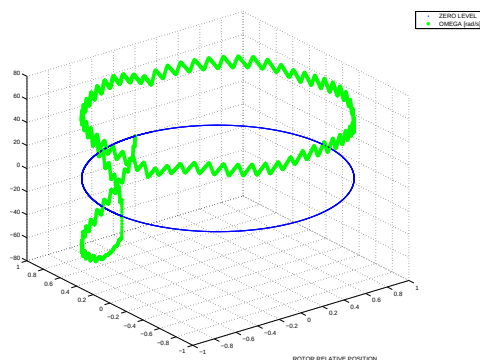


(b) Rychlostní závislost polohového vektoru při roztáčení BLDC motoru

Obrázek 4: Klasický algoritmus bezsenzorového řízení rozběhu BLDC motoru



(a) Časový průběh natočení rotoru a úhlové rychlosti motoru



(b) Rychlostní závislost polohového vektoru při roztáčení BLDC motoru

Obrázek 5: Inovovaný algoritmus bezsenzorového řízení rozběhu BLDC motoru

5 Závěr

Vývoj elektroniky a řídicích algoritmů je řešen v rámci projektu nasazení BLDC motorů pro řízení EHA/EMA akčních členů v kritických aplikacích, kde je rozběh a co možná nejrychlejší zpětnovazební řízení podstatnou součástí správné funkce zařízení.

Výsledky simulací budou v následujících krocích testovány na reálném zařízení a pokud se teoretické předpoklady potvrdí, bude tato nová metoda rozběhu bezsenzorového BLDC motoru použita v nové generaci EHA/EMA akčních členů. Tyto akční členy budou postaveny na technologii COTS, která využívá běžně dostupné (Commercial Off-The-Shelf) komponenty a programové vybavení, čímž umožňuje výrazné snížení celkových nákladů.

Během vývoje řídicích algoritmů bude brán zřetel na možnosti cílové platformy mikroprocesoru. Vzhledem k nutnosti velmi rychlých odezev systému nebudou uvažovány možnosti nasazení vyšších forem řízení (fuzzy, umělá inteligence), protože implementace takto založených řídicích algoritmů je pro daný typ mikroprocesoru nevhodná. Proto vývoji budeme uvažovat pouze klasické diskretní PI nebo PID regulátory a zaměříme se spíše na nové metody bezsen-

zorového řízení otáček a snímání polohy rotoru při nízkých rychlostech.

6 Poděkování

Publikované výsledky byly získány v rámci výzkumného projektu „CESAR — Cost Effective Small Aircraft“. Tento projekt, podporovaný EU, je zaměřen na vývoj nízkonákladového malého letadla. Analýza nasazení a implementace řídicího SW a HW bylo podpořeno z projektu MPO číslo FI-IM/084, „Výzkum a vývoj komerční datové (COTS) sběrnice pro pokročilé systémy avioniky a aplikace v letectví (AIR-COTS)“.

Modelování, simulace a vývoj hardware i software byl realizován společností UNIS, spol. s r.o.

Reference

- [1] LEONHART, W. *Control of Electrical Drives*. Third Edition. Springer: Berlin, 2001. ISBN 3-540-41280-2.
- [2] SKALICKÝ, J. *Elektrické servopohony*. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. VUT v Brně: Brno, 1999.
- [3] VAS, P. *Electrical Machines and Drivers*. Department of Engineering at the University of Aberdeen, UK. Oxford University Press: UK, 1992. ISBN 0-19-659397-X.
- [4] KAMM, L. J. *Understanding Electro-Mechanical Engineering: An Introduction to Mechatronics IEEE Press Understanding Science & Technology Series*. Wiley-IEEE Press: New York, August 1995) ISBN 0-78-031031-4
- [5] KARBAN, P. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink*. První vydání. Computer Press: Praha, 2007 ISBN 978-80-251-1448-3
- [6] ELLIOTT, CH., BOWLING, S. *Using the dsPIC for Sensorless BLDC Control*. AN901 Microchip Technology Inc. application notes. First Edition. Microchip: USA, 2004.

Ing. Vladimír Hubík
vhubik@unis.cz

Ing. István Szabó, PhD.
iszabo@unis.cz

Ing. Martin Švéda
msveda@unis.cz