

# Regulace BLDC pohonů pro asistivní technologie

Miroslav LOŽEK<sup>1</sup>, Pavel ZAHRADNÍK<sup>2</sup>, Jan HAVLÍK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Katedra teorie obvodů, České vysoké učení technické v Praze, Technická 2, 166 27 Praha, Česká Republika, lozekmir@fel.cvut.cz

<sup>2</sup> Katedra telekomunikační techniky, České vysoké učení technické v Praze, Technická 2, 166 27 Praha, Česká Republika, zahradni@fel.cvut.cz

*Abstrakt.* Technologie BLDC spočívá ve specifické konstrukci elektrických motorových pohonů spjaté se sofistikovaným způsobem řízení. Motor je charakteristický absencí jakýchkoli přenašečů elektrické energie na rotační část pohonu, což vede ke zvýšení spolehlivosti a účinnosti celého systému. Kvalita pohonu je také závislá na způsobu řízení, které je zabezpečeno pulzním regulátorem s mikroprocesorovou jednotkou. Vysoké účinnosti soustavy je dosaženo zavedením zpětné vazby nesoucí informaci o poloze rotoru. Uvedené vlastnosti BLDC pohonů umožňují jejich využití v široké škále aplikací včetně oblasti asistivních technologií. Cílem prezentovaného projektu je návrh a realizace regulačního členu s vysokou výkonovou zatížitelností a malými tepelnými ztrátami. Důraz je kladen na plynulost a přesnost regulace v celém rozsahu otáček, což je hlavním předpokladem pro použití ve zdravotnické technice a asistivních technologiích.

*Keywords.* BLDC, motor, regulátor, pohon.

## I. ÚVOD

Rozvoj technického průmyslu se nerozlučně pojí s automatizací všeho druhu. Jedním z neodmyslitelných prvků automatizovaného systému může být i elektrický pohon. Ve specifických oborech, mezi které patří právě zdravotnická technika, je u elektromechanických prvků kladen velký důraz především na jejich kvalitu a spolehlivost. Velmi nadějně řešené otázky pohonů se naskýtá v technologii BLDC (**B**rush**L**ess **D**irect **C**urrent), jejíž fyzikální princip otevírá dveře možnostem využití velmi kvalitních a spolehlivých konstrukcí motorů.

Je důležité si uvědomit, že výborných vlastností tohoto typu pohonu není dosaženo pouze správnou volbou konstrukce motoru a technologií výroby, ale také přesným způsobem řízení.

Vize tohoto projektu spočívá v návrhu a realizaci regulačního systému, který bude disponovat vysokou výkonovou zatížitelností, nízkými ztrátami a tedy i vysokou účinností, precizností regulace a možnostmi snadné modularity pro různé aplikace nejen v oblasti lékařské techniky, ale obecně v celém biomedicínském inženýrství. Projekt je zaměřen primárně na pohony s vyššími výkonovými nároky, jako jsou například elektrické invalidní vozíky [10]. Navržený regulátor má posloužit k testování a ověření vhodnosti použití v dopravních prostředcích pro invalidní spoluobčany.

## II. KONSTRUKCE MOTORU

BLDC motor je charakteristický svou podobností s běžnými střídavými stroji. Stator je tvořen pólovými nástavci, na kterých je navinuto třífázové vinutí spojené do hvězdy. Obměnu oproti běžnému střídavému motoru je možné nalézt v oblasti rotoru, ten je zde tvořen silnými permanentními magnety [3, 6]. Rotor není třeba zásobovat elektrickou energií a odpadá tak nutnost použití kontaktních přenašečů energie.

Důsledkem tohoto způsobu konstrukce je v první řadě zamezení veškerého jiskření, což vede ke snížení hlučnosti a opotřebení motoru a tím i ke snížení požadavků na pravidelnou údržbu. Motor je tak možné vyrobit ve velmi robustní a odolné podobě. Při použití kvalitního ložiskového upevnění dosahuje BLDC pohon vysoké účinnosti, v praxi i více jak 95% [4].

Z hlediska řízení lze motor provozovat bez-senzorově, přičemž je zpětná informace o poloze hřídele získávána přímo z vinutí statoru a to za pomoci principu BEMF (**B**ack **E**lectro**M**otive **F**orce) [2, 5]. Lepších výsledků je pak dosaženo implementací polohových senzorů v různé podobě. Velmi rozšířený způsob zavedení pevné zpětné vazby je pomocí vhodně rozmístěných magnetických čidel po obvodu statoru. Sensory tak monitorují magnetické pole pohybujícího se rotoru [1].

## III. PRINCIP ŘÍZENÍ

Regulace BLDC pohonů je založena na pulzním režimu řízení. Výkonový stupeň řídicí jednotky je tvořen šesticí elektronických spínačů sestavených v můstkovém zapojení, na výstupních svorkách se může objevit jeden ze tří povolených stavů (kladný potenciál, nulový potenciál nebo vysoká impedance). Spinání je řízeno mikroprocesorovou jednotkou definující, která ze tří fází má být v daném okamžiku vybuzena.

### A. Tvorba točivého magnetického pole

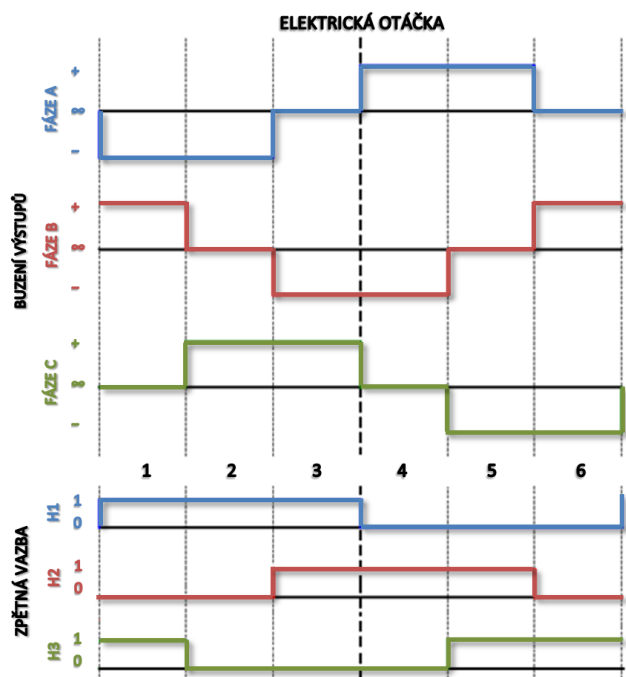
Točivé magnetické pole, které unáší rotor, je tvořeno přesně daným cyklickým buzením fází. Teorie algoritmu řízení říká, že ve stejný čas musí být sepnuty právě dvě fáze, každá s opačným potenciálem. Vodičem vinutí začne procházet elektrický proud v daném směru, což má za

následek magnetizaci příslušných pólových nástavců. Třetí fáze zůstává odpojena. Proces tvorby točivého magnetického pole se skládá ze šestice vhodně sestavených variant sepnutí, které se cyklicky opakují. Sled těchto sekvencí segmentů je nastíněn vrchní částí obr. 1.

### B. Zpětná vazba

Zpětná vazba je implementována pomocí tří magnetických senzorů s binárním výstupem, jejichž logická kombinace nese informaci o poloze rotoru s rozlišením  $60^\circ$ , což je pro správný chod motoru dostačující.

Každému ze šestice budících segmentů odpovídá právě jedna logická kombinace binární zpětné vazby. Algoritmus řídicího procesu budí aktuální fáze do té doby, než dojde ke změně informace o natočení hřídele. Změna jednoho ze tří signálů soustavy senzorů vede ke komutaci buzení. Přesný sled signálů zpětné vazby a následné výstupní odezvy je vyobrazen na obr. 1.



Obr. 1. Sled impulzů buzení

### C. Regulace výkonu

Výkon motoru, rychlost otáčení a točivý moment jsou úzce spjaté parametry, jež lze ovlivnit změnou vstupního napájecího napětí. Regulace celého systému se tak redukuje na regulaci napětí zdroje. Vzhledem k pulznímu charakteru buzení je výhodné implementovat změnu napětí přímo do řídicího procesu pomocí PWM (Pulse Wide Modulation). Statorové vinutí je možné chápat jako indukční zátěž, vyhlazovací filtr. Mechanická odezva motoru je za předpokladu správné volby frekvence PWM obdobná jako při lineární změně napětí.

## IV. REALIZACE REGULÁTORU

Pro přehlednější popis elektroniky regulátoru lze tento systém rozdělit z hlediska funkce na dvě rozdílné části. První z nich lze principiálně nazvat blokem výkonovým, druhou částí je pak řídicí nízkopříkonový blok. Základní sestavení funkčních částí regulátoru je nastíněno pomocí blokového schématu na obr. 2.

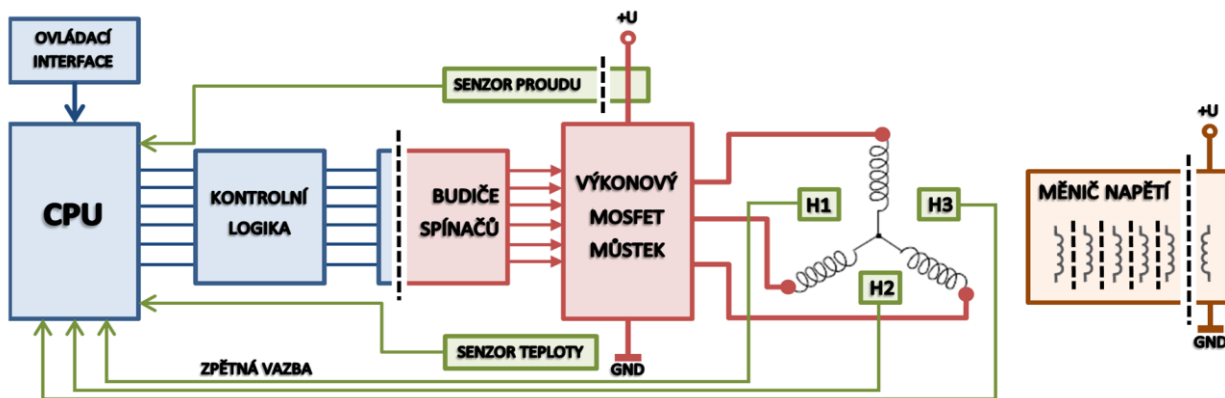
### A. Řídicí blok elektroniky regulátoru

Jádrem celého systému je mikroprocesorová jednotka. Vzhledem k výborným vlastnostem převážně v oblasti paralelních procesů byl zvolen kontrolér Parallax Propeller, díky němuž bylo možné zavést velmi rychlé řízení s přesnou a plynulou implementací hardwarové PWM. V tomto bloku je možné nalézt další podpůrné prvky, jako jsou např. A/D převodník, optické oddělovače, bezpečnostní hradlo a soustava senzorů pro ochranu elektroniky.

### B. Výkonový blok elektroniky regulátoru

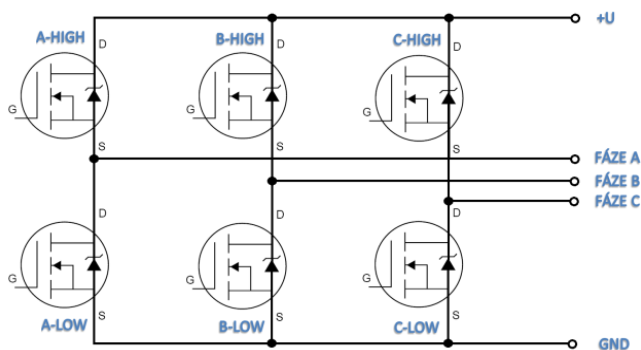
Výkonový můstek je sestaven z tranzistorů typu MOSFET s N-kanálem, jeho schématické zapojení je vyobrazeno na obr. 3. Tento typ elektronických spínačů je obzvláště vhodný pro pulzní aplikace vysokých výkonů [8]. Při výběru této součástky je, mimo jiné velmi důležité dbát na hodnotu parametru  $R_{DS}$  (odpor kanálu v sepnutém stavu), jeho velikost se značnou měrou odrazí na tepelných ztrátách při vyšším zatížení.

Dalším důležitým parametrem určující efektivnost pulzní regulace je doba sepnutí jednotlivých tranzistorů. Minimální hodnota tohoto parametru je dána konstrukcí



Obr. 2. Blokové schéma regulátoru

součástky, avšak je možné ji negativně ovlivnit nesprávným buzením hradla tranzistoru. Hlavním požadavkem na budiče spínacích prvků je jejich schopnost dodat dostatečný náboj do hradla řízeného tranzistoru v co nejkratším čase. V praxi to znamená použít budič s nízkoztrátovým výstupním spínačem v kombinaci s tvrdým napěťovým zdrojem.



Obr. 3. Funkční schéma třífázového výkonového můstku

### C. Napěťový zdroj

Z principiálních důvodů výše zmíněného způsobu buzení spínačů je nutné použít specifický měnič napětí. Jedná se o 5 nezávislých, galvanicky oddělených napájecích zdrojů. Návrh měniče je realizován použitím transformátoru s vyšším počtem sekundárních vinutí, řízení transformace energie je zabezpečeno pomocí technologie TOPSwitch [7].

Díky galvanickému oddělení je možné plně oddělit silovou a řídicí část elektroniky, což výrazně přispívá k eliminaci nežádoucího rušení vzniklého spínáním velkých proudů.

### D. Softwarové vybavení regulátoru

Program regulátoru je díky již zmíněné možnosti paralelních procesů přehledně rozdělen do několika sekcí. Je zde přítomen samostatný algoritmus, který zabezpečuje komutaci fází na základě odezvy zpětné vazby (viz obr. 1). Pulzně-šířková modulace je implementována nezávisle a aplikuje se automaticky na aktivovaném výstupu.

Řízení střídy PWM je obsaženo v procesu zpracování vstupního ovládacího rozhraní. Vzhledem k segmentaci algoritmu je zde možnost modularity jednoduchou úpravou kódu podle požadavků na konkrétní použití regulátoru.

Vysoká výkonová zatížitelnost s sebou nese nutnost zvýšeného monitorování správnosti chodu. Softwarové zabezpečení je realizováno ve třech úrovních (napětí, proud, teplota). Napěťová ochrana spočívá v omezení aktivace regulátoru pouze v určitém rozsahu hodnot napájecího napětí, což je výhodné převážně v kombinaci s použitím akumulátorových článků. Proudový senzor monitoruje kontinuální i špičkový proud procházející silovou částí regulátoru. Při velmi vysokých špičkových či dlouhodobějších nadproudových odběrech v kombinaci se zvýšenou teplotou spínacích prvků dojde k deaktivaci chodu a tím snížení rizika destrukce elektroniky [1].

## V. VYUŽITÍ BLDC POHONU V ASISTIVNÍCH TECHNOLOGIÍCH

Většina komerčně vyráběných invalidních vozíků používá ke svému pohonu vhodně převodovaný stejnosměrný motor. Nejběžnější typy vozíků dosahují průměrných dojezdových vzdáleností okolo 30 km při účinnosti motoru okolo 70 %. V případě použití BLDC pohonu je ale možné dosáhnout účinnosti až 95 %, tj. o 25 % více oproti běžnému stejnosměrnému pohonu. Při zachování stejné hmotnosti a kapacity baterie je tak možné dosáhnout dojezdu téměř 50 km.

Implementace motorů přímo do kol vozíku, což právě BLDC motory umožňují, navíc podstatně snižuje míru opotřebení a pravděpodobnost mechanických poruch. Veškeré řízení tak může být řešeno plně elektronicky s velkou přesností pohybu v prostoru. Všechny elektronické prvky vozíku lze integrovat do jednoho regulátoru opatřeného sofistikovaným softwarem.

Takováto konstrukce navíc umožňuje i další snížení spotřeby energie. Další úsporu lze totiž dosáhnout snížením hmotnosti a to především díky absenci převodů a ostatních přenašečů mechanické energie. Nižší hmotnost celého vozíku pak může vést buď k použití baterie s menší kapacitou a tedy i nižší hmotností při zachování stejné dojezdové vzdálenosti, nebo případně při použití stejné baterie k dalšímu zvýšení dojezdu.

Uvedené vlastnosti BLDC pohonů tak vytváří velký prostor pro provedení poměrně zásadních změn v konstrukci invalidních vozíků, které lze v brzké době očekávat.

## VI. ZÁVĚR

Popsaný regulátor byl realizován a upraven pro použití v jednostopém dopravním prostředku. Bylo použito vestavného 60-pólového motoru o příkonu 4 kW v zadním kole vozidla. Testování na elektrickém skútru lze považovat za úspěšné, pohon vykazoval dlouhodobě stabilní vlastnosti, vysokou účinnost a dobré jízdní vlastnosti. Opodstatněnost použitého přístupu k testování tkví především ve zvýšeném náročnostním profilu zkušebních testů, než by tomu bylo v případě využití k pohonu invalidního vozíku. Lze proto oprávněně předpokládat, že užití v oblasti lékařské techniky nebo asistivních technologií by vedlo k nejhůře stejným nebo případně i lepším výsledkům.

Regulátor vykazuje plynulou regulaci v celém rozsahu otáček i zatížení s možností velmi pohotové akcelerace. Tepelné ztráty jsou při běžném provozu minimální, což je výhodné jak z hlediska životnosti celého zařízení, tak i z hlediska minimalizace spotřeby energie a tím zvýšení dojezdové vzdálenosti při zachování stejného zdroje energie.

## PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena v rámci projektu Vývoj perspektivních informačních a komunikačních technologií č. MSM 6840770014. Účast na konferenci je podporována z prostředků výzkumného záměru č. MSM 6840770012 (udělen Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky).

## REFERENCE

- [1] LOŽEK, M. *Regulátor otáček*. Praha, 2011. 60 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [2] DEEPA, M.U., JAISON, M. Sensorless Control of Brushless DC Motor Drive Using Line-Line Voltage Detection. In *10<sup>th</sup> National Conference on Technological Trends*, Kerala, 2009.
- [3] AZIZUR, M.,ZHOU, P. Analysis of Brushless Permanent Magnet Synchronous Motors. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1996.
- [4] ZHU, Z.Q., XIA, Z.P., SHI, Y.F., HOWE, D., PRIDE, A., CHEN, X.J. Performance of Halbach Magnetized Brushless AC Motors. In *IEEE Transactions on Magnetics*, 2003.
- [5] SHAO, J. *Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC Motor Drives*. Blacksburg, 2003. 91 p. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute.
- [6] KOSTARIDIS, A.; SORAS, C.; MAKIOS, V. *Magnetostatic Analysis of a Brushless DC Motor Using a Two-Dimensional Partial Differential Equation Solver*. Greece: University of Patras, 2001
- [7] KREJČÍŘÍK, A. *Spinané napájecí zdroje s obvody TOPSwitch*. Praha: BEN, 2002. 397 s. ISBN 80-7300-031-8.
- [8] JAVŮREK, J. *Regulace moderních elektrických pohonů*. Praha: Grada Publishing, a.s., 2003. 264 s. ISBN 80-247-0507-9.
- [9] ROUBÍČEK, O. *Elektrické motory a pohony*. Praha: BEN, 2004. 179 s. ISBN 80-7300-092-X.
- [10] CHU, J., MOON, I., CHOI, G., RYU, J., MUN, M. *Design of BLDC motor Controller for Electric Power Wheelchair*. Korea Orthopedics and Rehabilitation Engineering Center. Incheon, Korea.