

# Дигитално управљање електромоторним погоном са BLDC мотором

Студентски рад

Романела Лајић

Студент другог циклуса студија  
Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет  
Бања Лука, Босна и Херцеговина  
romanela.lajic@etf.unibl.org

*Садржај*—У раду су описани основни принципи управљања BLDC мотором, као и једна практична реализација погона са наведеним мотором, кориштењем дигиталног сигналног процесора F28035. Описана је хардверска реализација система, софтверска реализација алгоритма управљања у базном опсегу брзина и приложени су експериментални резултати.

*Кључне ријечи* - BLDC; дигитални сигнални процесор; каскадна регулација;

## I. УВОД

BLDC (енг. *Brushless Direct Current*) мотор спада у категорију синхроних мотора са перманентним магнетима, који се напајају струјама правоугаоног таласног облика. Значајнија употреба и развој мотора са перманентним магнетима започиње средином 20. вијека када се појављују магнетски материјали са повећаном густином магнетске енергије. Развојем полупроводничких компоненти и енергетске електронике јављају се и електронски комутовани мотори, који се напајају једносмјерним струјама и функционишу без употребе механичког комутатора, при чему се комутација врши уз помоћ претварача енергетске електронике [1]. Управо оваквим принципом врши се напајање BLDC мотора.

Својим принципом рада, комутацијом струје при тачно одређеном положају ротора, овај мотор подсјећа на мотор једносмјерне струје, одакле потиче и његов назив. На тај начин, овај тип мотора остварује добре динамичке особине једносмјерног мотора, али без употребе механичке комутације, која се код њега обавља електричним путем. Као такав BLDC мотор погодан је за велик број специфичних примјена. Посебно је погодан у примјенама гдје је неопходан брз одзив мотора и минимално одржавање.

Сама конструкција овог мотора може се сматрати инверзном у односу на класични мотор једносмјерне струје, односно еквивалентном конструкцији синхронног мотора са перманентним магнетима. Побуда мотора налази се на ротору у виду перманентних магнета, док се статорски намотај напаја струјама правоугаоног таласног облика. Употреба електронске комутације захтијева напајање из претварача енергетске електронике, као и

постојање начина детекције положаја ротора, на основу ког се одређује тренутак у ком је потребно извршити комутацију. У сврху детекције положаја најчешће се користе Холлови сензори, те су они, заједно са претварачем, саставни дио система без којег није могућ рад мотора.

У оквиру овог рада описани су основни принципи дигиталног управљања електромоторним погоном са BLDC мотором као и реализација једног система за управљање у лабораторији. Друго поглавље рада описује математички модел мотора и основне принципе управљања. Наведене су предности каскадне структуре управљања као и проблем шума у сигналу струје и реализација филтра струје. Треће поглавље односи се на практичну реализацију регулисаног електромоторног погона. У овом поглављу описан је кориштени хардвер као и софтвер који садржи алгоритам управљања. У посљедњем, четвртном поглављу, дата је експериментална верификација рада система.

## II. УПРАВЉАЊЕ BLDC МОТОРОМ

### A. Математички модел BLDC мотора

Како би се формирао алгоритам управљања мотором, потребно је прво поставити одговарајући математички модел на основу којег се одређује на који начин је могуће управљати величинама од интереса, у овом случају брзином мотора.

Прва група једначина које описују BLDC мотор су једначине напонске равнотеже. Комплетан систем једначина напонске равнотеже за све три фазе мотора гласи:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

гдје су:  $u_s$  – напон статора,  $i_a, i_b, i_c$  – струје статора,  $R_s$  – отпорност статорског намотаја,  $L_s, L_m$  – сопствена и међусобна индуктивност статорског намотаја,  $e_a, e_b, e_c$  – електромоторне силе фаза a, b и c.

Једначина за електромагнетски момент мотора је:

$$m_{el} = \frac{e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c}{\omega_m} \quad (2)$$

Њутнова једначина се своди на облик:

$$m_{el} = J_m \frac{d}{dt}(\omega_m) + k_f \cdot \omega_m + m_m, \quad (3)$$

при чему су:  $m_{el}$  – електромагнетни момент мотора,  $J_m$  – момент инерције мотора,  $\omega_m$  – механичка брзина мотора,  $k_f$  – коефицијент трења,  $m_m$  – момент оптерећења на вратилу мотора.

Индукована електромоторна сила за сваки намотај рачуна се по изразу:

$$E = k_e \cdot \Phi \cdot \omega_m = c_e \cdot \omega_m, \quad (4)$$

гдје је  $k_e$  константа која зависи од броја навојака једне фазе мотора, а  $\Phi$  константан магнетски флукс побуде.

Израз за момент, уз претпоставку да нема губитака трења и вентилације, се према томе може свести на израз:

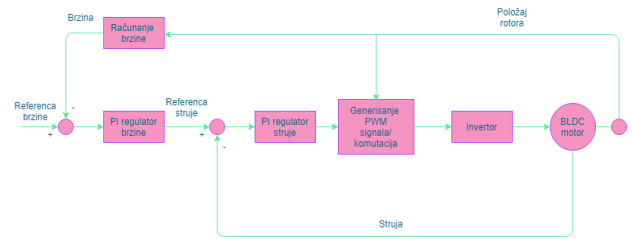
$$M_m = 2 \cdot k_m \cdot \Phi \cdot I = 2 \cdot c_m \cdot I. \quad (5)$$

Промјенљива  $k_m$  представља тзв. константу момента.

У овим релацијама је значајно примјетити да је индукована електромоторна сила мотора директно пропорционална угаоној брзини мотора, те да је момент директно пропорционалан струји кроз намотаје. Ове релације су еквивалентне онима које описују класични мотор једносмјерне струје. То даље имплицира да је BLDC мотором могуће управљати кориштењем каскадне управљачке структуре која се користи при управљању моторима једносмјерне струје, те да није неопходно кориштење векторског управљања као што је то случај код нпр. синхроних мотора са перманентним магнетима који се напајају струјама синусиодалног таласног облика. Ово важи за управљање у базном опсегу брзина. Слабљење поља није могуће остварити на исти начин као при управљању мотором једносмјерне струје због константног побудног флукса, те би се морали користити алтернативни начини реализације који подразумијевају модификацију процеса комутације [2].

### В. Каскадна структура управљања

Каскадна структура управљања подразумијева постојање више регулационих петљи у систему, односно управљање уз помоћ више регулатора везаних на ред. На слици 1. приказан је блок-дијаграм система за управљање погоном са BLDC мотором који садржи регулатор струје и регулатор брзине. Ова структура је готово идентична систему за управљање погоном са мотором једносмјерне струје, уз разлику да се при управљању BLDC мотором памти информација о тренутном положају ротора која је релевантна за остварење правилне комутације.



Слика 1. Дијелови регулисаног електромоторног погона са BLDC мотором

Главни дио погона представља сам мотор ког напаја трофазни инвертор. Задатак инвертора је да врши комутацију, као и струјну и брзинску регулацију на основу сигнала добијених из регулатора. Комутација, односно одлука о томе кроз које фазе мотора у датом тренутку протиче струја, врши се на основу информације о тренутном положају ротора, која се добија на основу сигнала на излазу Холових сензора. Регулатор струје на свом излазу даје вриједност фактора испуне, који се такође води на блок за генерисање управљачких сигнала претварача. Улаз регулатора струје је сигнал грешке који се добија као разлика референце струје и њене стварне вриједности, добијене мјерењем. На основу задатог фактора испуне и информације о потребном комутационом циклусу, генеришу се управљачки сигнали који се воде на прекидачке елементе претварача. Референцу струје генерише брзински регулатор, на чији се улаз доводи грешка брзине, односно разлика између референце брзине, коју задаје корисник, и измјерене брзине мотора.

### С. Струјна петља и филтрирање струје

Као што је раније напоменуто, брзина BLDC мотора директно је пропорционална индукованој електромоторној сили, те се управљање брзином може постићи и промјеном напона. Код оваквог начина управљања брзином постоји неколико проблема. Овакав начин управљања даје спор одзив брзине. У напонском режиму у намотајима мотора могу се појавити недозвољене вриједности струје које могу да угрозе мотор. Такође, јавља се проблем контроле прелазних процеса.

Из наведених разлога примјењује се управљање брзином промјеном струје, што се постиже кориштењем каскадне структуре регулације. Додавањем струјне регулације у систем постижу се значајно боље динамичке карактеристике. Примјеном струјне регулације може се постићи да се струја успоставља скоро тренутно, са минималним временским кашњењем, те је одзив система бржи. При промјени момента оптерећења на вратилу, поремећај се компензује промјеном електромагнетног момента, те брзина остаје стабилна. Директном регулацијом спријечава се појава недозвољених вриједности струје и контролишу прелазни процеси генерисања момента мотора.

Као што је раније објашњено, струја BLDC мотора у идеалном случају има правоугаони облик и у конкретном погону са BLDC мотором, који ће бити описан у наставку рада, мјерена је струја једносмјерног међукола, која је у сваком тренутку једнака струји која протиче кроз двије

фазе мотора. Таласни облик струје у стварном погону има одступања и осцилације из неколико разлога.

Погонски претварач, због свог начина рада, не даје на свом излазу идеалне таласне облике. С обзиром на то да је мотор претежно индуктивно оптерећење, индуктивност намотаја мотора има функцију филтра струје. Уколико је у питању мали мотор, са малом вриједношћу индуктивности у таласном облику струје постоје значајна одступања. Овај проблем се дјелимично рјешава повећањем PWM фреквенције.

Други разлог, чест у дигиталним системима, је присуство шума у сигналу струје.

Уколико се реализује каскадна структура управљања брзином се управља промјеном струје мотора, што значи да се осцилације таласног облика струје изазивају осцилације брзине, те је пожељно софтверским путем филтрирати сигнал струје након A/D конверзије. У ту сврху кориштен је IIR (енг. *Infinite Impulse Response*) филтар. У питању је нископропусни филтар који у свакој периоди одабирања рачуна филтрирану вриједност сигнала на основу тренутне вриједности сигнала и филтриране вриједности из претходне периоде. На овај начин систем постаје робустан на нагле промјене улазног сигнала.

Вриједност филтрираног сигнала струје у  $k$ -тој периоди одабирања се рачуна као:

$$I_{\text{filt}}(k) = (1 - a) \cdot I_{\text{filt}}(k - 1) + a \cdot I(k), \quad (6)$$

гдје су:  $I_{\text{filt}}$ -филтрирани сигнал струје,  $I$ -нефилтрирани сигнал струје,  $a$ -константа.

Константа  $a$  одређује пропусни опсег филтра. Смањењем вриједности константе појачава се дејство филтра, односно у једначини (6) фаворизује се одбиром филтрираног сигнала из претходне итерације, док се повећањем вриједности константе дејство филтра смањује. Повећањем константе долази до слабијег дејства филтра, док се при смањењу вриједности константе  $a$  повећава кашњење филтра што може да утиче на динамику система.

### III. ПРАКТИЧНА РЕАЛИЗАЦИЈА ЕЛЕКТРОМОТОРНОГ ПОГОНА СА BLDC МОТОРОМ

#### A. Хардверска реализација

За реализацију електромоторног погона кориштено је развојно окружење *The High Voltage Motor Control and Power Factor Correction Developers Kit*. Ово је рјешење компаније *Texas instruments* унутар ког су интегрисани сви основни блокови за контролу мотора. Опрема се састоји од: F28035 дигиталног сигналног процесора, плоче за управљање мотором (енг. *DMC-Digital Motor Control*), извора 15 V једносмјерног напона, кабла за наизмјенично напајање, каблова са „банана“ конекторима и USB кабла за комуникацију са рачунаром.

Основни функционални дијелови DMC плоче су: трофазни инвертор, који омогућава управљање мотором и

који садржи модуле за мјерење брзине мотора уз помоћ различитих врста давача; исправљач, који обезбјеђује напон једносмјерног међукола инвертора из наизмјеничног извора напајања; коло за поправку фактора снаге; комуникациони модули; D/A конвертори који омогућавају праћење жељених величина на осцилоскопу и прекострујна заштита која штити првенствено инвертор, али и остале дијелове плоче.

Задатак дигиталног сигналног процесора у систему је да прима информације добијене као резултат мјерења, на основу тих информација извршава управљачки алгоритам, те да генерише управљачке сигнале на основу резултата добијених извршавањем алгоритма. Дигитални сигнални процесор F28035 користи репрезентацију бројева са непокретним зарезом. С обзиром на то да су при регулацији електромоторног погона управљачки сигнали заправо PWM сигнали који се воде на прекидачке елементе претварача, овај дигитални сигнални процесор (специјализован у ту сврху), посједује посебне модуле за генерисање PWM сигнала.

#### B. Софтвер за управљање BLDC мотором

Програм за управљање електромоторним погоном састоји се од три основна дијела: дио за иницијализацију, главни програм и прекидна рутина.

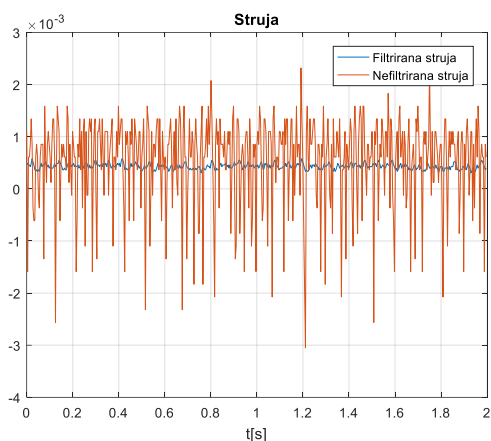
Дио програма за иницијализацију задужен је за иницијализацију глобалних промјенљивих, потребних периферија и инстанцирање објеката кориштених у пројекту.

Унутар главне петље врше се функције које нису временски критичне и обављају се асинхроно. Програм у ову петљу улази након функција које дозвољавају прекиде, а при извршавању програм излази из ове петље само кад добије захтјев за извршење прекида.

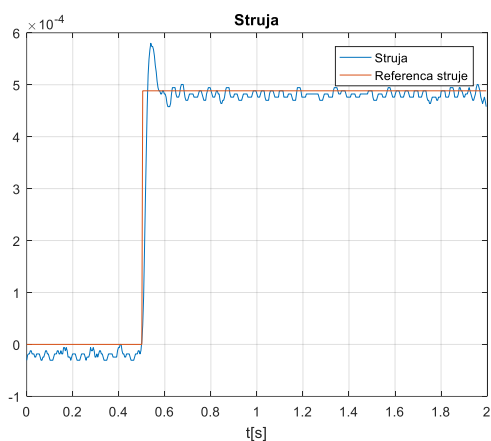
Унутар главне прекидне рутине извршавају се операције које су временски критичне и које је потребно извршавати синхроно, са једнаким временским размаком. У главној прекидној рутини дефинисан је алгоритам управљања погоном, чија је основна функција да чита наредбе, односно референце регулисаних величина, извршава закон управљања и генерише управљачке сигнале који се потом воде на погонски претварач [3].

Рад електромоторног погона тестиран је у три различита режима. Једна од предности каскадне структуре погона је чињеница да се струјна и брзинска петља могу подешавати одвојено, те је прво тестирана и подешена струјна регулација, и снимљени одговарајући одзиви струје. Након тога тестиран је рад брзинске регулације у напонском режиму, односно режиму када се брзином управља промјеном вриједности напона напајања мотора. На овај начин омогућено је поређење резултата са резултатима система који садржи и подређени струјни регулатор. На крају тестиран је систем са каскадном структуром регулације.

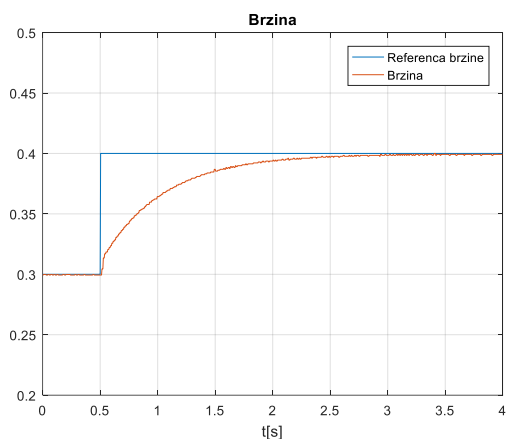




Слика 3. Сигнал струје прије и после филтрирања

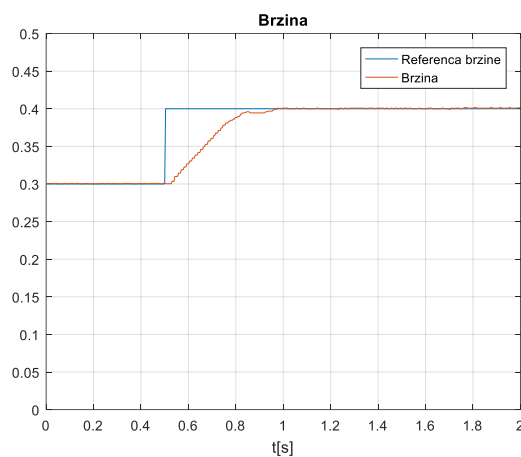


Слика 4. Референца и одзив струје на скоковиту побуду



Слика 5. Референца и одзив брзине у напонском режиму

Уколико је употређљена каскадна структура регулације добијају се резултати приказани на слици 6. Погону је задата иста промјена референце као при раду у напонском режиму, при чему је мотор и у овом случају неоптерећен. У овом случају ново стационарно стање успоставља се у краћем временском периоду што потврђује да се у каскадној структури постижу боље динамичке особине него у напонском режиму рада.



Слика 6. Референца и одзив брзине са употребом каскадне структуре регулације

## V. ЗАКЉУЧАК

У раду су обрађени математички модел и основни принципи управљања електромоторним погоном са BLDC мотором. Описани су дијелови једног таквог погона као и њихове функције при управљању. Описана је једна практична реализација погона у лабораторији примјеном развојног окружења *The High Voltage Motor Control and Power Factor Correction Developers Kit* компаније *Texas instruments*, и приказани су добијени експериментални резултати.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сенад Смака, Шемсудин Машић, „Мали и специјални електрични стројеви“, Универзитет у Сарајеву, Електротехнички факултет, 2017.
- [2] Дарко Марчетић, „Микропроцесорско управљање енергетским претварачима“, Факултет техниких наука у Новом Саду, 2012.
- [3] Дарко Марчетић, Петар Матић, „Дигитално регулисани електромоторни погони“, Електротехнички факултет Бања Лука, Академска Мисао, Београд, 2020.

## НАПОМЕНА

Овај рад садржи најзначајније резултате добијене током израде завршног рада првог циклуса студија на Електротехничком факултету у Бањој Луци, под називом „Дигитално управљање електромоторним погоном са BLDC мотором“ под менторством проф. др. Петра Матића.

## ABSTRACT

This paper describes basic concepts of BLDC motor control and one implementation of such system. An algorithm for control in base speed range is proposed and implemented on a F28035 fixed point digital signal processor. An experimental verification of the algorithm is conducted and presented.

## Digital control of BLDC motor

Romanela Lajić