

Merjenje zasuka med Hallovimi signali in faznimi napetostmi

Jernej Mlinarič, Boštjan Pregelj, Janko Petrovčič
Inštitut Jožef Stefan, Jamova c. 39, 1000 Ljubljana, Slovenija
jernejmmlinaric@ijs.si, bostjan.pregelj@ijs.si, janko.petrovcic@ijs.si

Measuring the angular displacement between Hall signals and phase voltages

BLDC motors for demanding applications require a sensor system for electronic commutation to determine the current rotor position. Often, three Hall magnetic sensors, angularly displaced by 60° or 120° , are used for this purpose. Ideally, commutation should be performed precisely at the rotor position where the induced back electromotive force (BEMF) crosses the zero value. However, in reality, the deviation (phase shift between the voltage crossing the zero value and the HALL sensor switching) is different from 0° and depends on the mechanical tolerances of motor manufacturing, sensor soldering position, and rotor magnetization repeatability. To perform comprehensive final testing of motors, a dedicated measuring method had to be developed, as professional measuring instruments (Frequency counters) are not suitable for this purpose, because during normal motor operation, the voltage on the windings is not sinusoidal but pulse-width modulated, it is not possible to rotate the motor during testing with an additional drive and that is why the measurement can only be performed during the coast-down period, when the rotational speed exponentially decreases. In this paper, we present our solution that we applied to the final testing system at production of electric motors at Domel company. It consists of an electronic circuit for signal preparation, a fast USB module for simultaneous acquisition of 6 signals, and software that estimates the crossings of all signals over the zero-value based on linear regression, calculates multiple consecutive phase deviations, and provides the result in less than 300 ms. It also includes a metrological calibration process. The measurement resolution is 0.3° , and the repeatability is in the range of $\pm 0.2^\circ$.

Kratek pregled prispevka

BLDC motorji za zahtevnejše aplikacije potrebujejo za elektronsko komutacijo senzorski sistem za določanje trenutne pozicije rotorja. Pogosto v ta namen služijo trije Hall magnetni senzori, kotno zamaknjeni za 60° ali 120° . Idealno naj bi se komutacija izvajala natanko pri zasuku rotorja, pri katerem inducirana protinapetost (BEMF) prehaja preko ničelne vrednosti. V realnosti je odstopanje (fazni zamik med prehodom napetosti preko ničelne vrednosti in preklopom HALL senzorja) različno od 0° in je odvisno od mehanskih toleranc izdelave motorjev, pozicije spajkanja senzorjev in ponovljivosti magnetenja rotorjev. Za izvedbo celovite končne kontrole motorjev je bilo potrebno razviti namensko merilno metodo, saj za ta namen profesionalni merilni instrumenti (merilni števci) niso primerni, ker med normalnim delovanjem motorja napetost na navitjih ni sinusne oblike, temveč je impulzno-širinsko modulirana, v času testiranja ni mogoče izvajati vrtenja z dodatnim pogonom in se zato lahko meritev opravi le v izteku, ko se hitrost vrtenja eksponentno spreminja. V prispevku želimo predstaviti našo rešitev, ki smo jo aplicirali na sistemu končne kontrole pri proizvodnji elektromotorjev v podjetju Domel. Sestavlja jo elektronsko vezje za ustrezno pripravo signalov, hiter USB modul za sočasni zajem 6 signalov ter programska oprema, ki na osnovi linearne regresije oceni prehode vseh signalov preko ničelnih vrednosti, izračuna več zaporednih faznih odstopanj in poda rezultat v manj kot 300 ms. Vključuje tudi postopek metrološke kalibracije. Merilna razločljivost znaša 0.3° , ponovljivost pa je v razredu $\pm 0.2^\circ$.

1 Uvod

Zaradi cenovne dostopnosti in dobrih tehničnih karakteristik se BLDC (ang. brush-less DC) motorji vedno pogosteje uporabljajo in vgrajujejo v razne stroje in naprave. Ker so nekoliko dražji od DC motorjev s ščetkami ali asinhronskih AC motorjev, BLDC motorje najdemo predvsem v profesionalnih aparatih in napravah, največkrat pa v profesionalnem ročnem baterijskem orodju [1].

Največja prednost BLDC motorjev je njihov visok izkoristek, možnost nastavljanja hitrosti vrtenja ter nadzorovan navor, ki ga regulira sistem vodenja motorja [1]. BLDC motor je po zgradbi in delovanju podoben sinhronskemu AC motorju; v rotorju so postavljeni permanentni magneti, ki ustvarjajo rotorsko magnetno polje, to pa nato sinhrono sledi statorskemu magnetnemu polju, ki ga generirajo statorska navitja. Tu je pomembno, da je za čim večji izkoristek in čim bolj učinkovito vodenje potrebna znana čim bolj točna lega rotorskega magnetnega polja, ta pa je pogojena z lego rotorja.

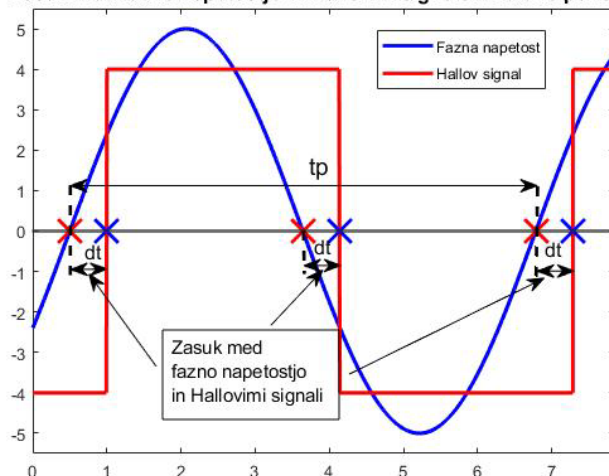
Lego rotorja določamo s senzori zasuka, najpogosteje s Hallovimi magnetnimi senzori. Tipično se na motor v okolici rotorja vgradijo po trije Hallovi senzori, ki so med seboj kotno zamaknjeni za 60° ali 120° [2] [3]. Vendar v praksi pri proizvodnji elektromotorjev vedno pride do manjših odstopanj kotnega zamika. Ta so posledica toleranc izdelave sestavnih delov, nenatančnosti spajkanja Hall senzorjev, pozicije magnetnih osi senzorskega obroča in preklopnih nivojev senzorjev [4]. Ko k temu prištejemo še odstopanja magnetnih osi rotorskih magnetov, ugotovimo, da izmerjena lega rotorja, ki jo zaznamo s Hallovimi sondami, nekoliko odstopa od lege statorskega polja, ki povzroča nastanek faznih napetosti na navitjih statorja. Ta fazni zamik med Hallovimi signali in napetostmi faz se kasneje pri obratovanju motorja odraža kot manjši izkoristek in večje odstopanje regulacije navora.

Podjetja, ki v svoje visoko tehnološke naprave vgrajujejo BLDC motorje želijo vgrajevati

motorje s čim manjšim zasukom med Hallovimi signali in faznimi napetostmi. Ker se ta zamik pojavi zaradi različnih odstopanj pri proizvodnji, je smiselno ta zasuk oz. odstopanje izmeriti na koncu proizvodnega procesa oz. med končno kontrolo kvalitete. Tako potrebo ima tudi podjetje Domel d. o. o. iz Železnikov.

V laboratorijskem okolju je mogoče ta fazni zasuk meriti s standardnimi merilnimi števci, pri tem pa motor vrtimo s pomožnim pogonom. Na merilni števec priključimo signale iz Hallovih senzorjev ter induciranih napetosti na navitjih. Pri tem izmerimo časovno razliko med ničelnimi prehodi fazne napetosti in prehodi naraščanja oz. padanja Hallovega signala, to razliko pa nato v korelaciji s hitrostjo vrtenja oz. periodo signala uporabimo pri računanju zasuka. Kotni zasuk prikazuje slika 1, izračuna pa se po (1).

Zasuk med fazno napetostjo in Hallovim signalom za eno periodo



Slika 1: Zasuk med fazno napetostjo in Hallovim signalom.

$$\varphi = \frac{\Delta t}{t_p} \cdot 360^\circ \quad (1)$$

Kjer je:

φ – kotni zasuk

Δt – časovna razlika med prehodom fazne napetosti in odzivom Hallovega signala

t_p – dolžina periode signala

Žal pa tak način merjenja zasuka ni primeren za uporabo v proizvodnji, saj je ta metoda za avtomatizirano proizvodno linijo preveč zamudna, oziroma bi za ta namen potrebovali posebno testno napravo, ki bi za potrebe merjenja zagotavljala zunanji pogon rotorja. Med normalnim delovanjem BLDC motorja, krmiljenim z BLDC krmilnikom, na navitjih ni sinusne oblike napetosti, ampak je le-ta impulzno-širinsko modelirana. Pri taki obliki napetosti na navitjih motorjev pa faznega zasuka ne moremo točno izmeriti.

Rešitev tega problema je možna izvedba meritev zasuka takoj, ko motor izklopimo in se začne prosto ustavljati. Ustavljanje motorja traja le nekaj sekund, v tem času pa se frekvenca signalov spreminja (eksponencialno pada). Zaradi slednjega merjenje s standardnimi laboratorijskimi števci žal ni mogoče. Zato je bilo za tak način merjenja potrebno razviti novo metodo merjenja zasuka.

V tem prispevku predstavljamo zasnovano in izvedbo postopka ter algoritma merjenja faznih zasukov. Predstavljeno je tudi za ta namen razvito elektronsko vezje, ki omogoča pripravo merilnih signalov, ki jih nato Analogno-digitalni modul pretvarja v digitalno obliko. Na koncu so predstavljeni rezultati realizacije algoritma

2 Motor tipa 720

Zasuk med Hallovimi signali in faznimi napetostmi merimo na končni kontroli motorjev tipa 720. Gre za BLDC motorje podjetja Domel d. o. o., ki so namenjeni za vgradnjo v profesionalno električno vrtno orodje. To so motorji nazivnih električnih moči do 560 W, nazivne napetosti napajanja 26 V in nazivne vrtilne frekvence 26500 RPM (Obratov na minuto). Rotor motorja ima 2 polova para, za določanje lege rotorja pa se uporabljajo standardni Hallovi senzori. Slika 2 prikazuje motor tipa 720.



Slika 2 Motor tipa 720.

3 Predstavitev koncepta in algoritma

Ko motor odklopimo od napajanja, se ta zaradi vztrajnosti rotorja še nekaj trenutkov vrti do popolne zaustavitve. Večja kot je vztrajnost rotorja in manjše trenje v ležajih, dlje časa se motor ustavlja. Med ustavljanjem rotorsko magnetno polje zaradi vrtenja inducira sinusno napetost na statorskih navitjih. Hkrati na Hallovih senzorjih nastajajo pravokotni signali, ki označujejo zasuk rotorja preko določenih kotov. Motor se praviloma ustavlja po naravni eksponentni funkciji. Po njej se tako zmanjšuje amplituda in frekvenca inducirane napetosti oziroma se povečuje perioda signalov. Tej spremembi periode pa sledi tudi sprememba periode signalov iz Hallovih senzorjev.

Za potrebe merjenja faznih zasukov moramo tako ob pravem času posneti signale Hallovih senzorjev in induciranih napetosti. Te signale lahko nato naknadno obdelamo. Pri tem moramo upoštevati časovno omejenost snemanja signalov (motor se ustavi že v 2 sekundah, za obdelavo je uporabnih le nekaj prvih desetink sekunde), kot tudi omejitve pri vzorčenju signala (da zaznamo zasuk pri visokih obratih potrebujemo vzorčenje signala reda nekaj 100 kHz). Poleg omenjenega pa so še tu zahteve po točnosti meritev s strani naročnika: zaželena natančnost je $\pm 0,1^\circ$. Eksperimentalno in računsko smo tako ugotovili, da je za dan primer ustrezno zajemanje signalov napetosti in Hallovih senzorjev okoli 1,2 s po odklopu motorja (oz. pri hitrosti 10000 RPM), da

pa dosežemo želeno natančnost meritve zasuka, je potrebno simultano vzorčenje signalov vsaj s frekvenco 500 kHz.

Fazni zasuk merimo za vsako fazo posebej- ob vsakem prehodu fazne napetosti skozi 0 za cel obrat rotorja. Ker ima rotor 2 polova para, se pri enem polnem obratu na statorskih navitjih pri enem obratu inducirata 2 periodi fazne napetosti, kar skupno nanese 4 prehode skozi 0 (torej, 2 prehoda pri naraščanju napetosti in 2 prehoda pri padanju napetosti). Tem prehodom sledijo tudi 4 prehodi Hallovih signalov, in sicer 2 prehoda pri naraščanju signala in 2 prehoda padanja signala. Pri štirih prehodih signala in treh fazah skupno dobimo 12 meritev zasuka za en obrat motorja.

4 Realizacija

Prej predstavljen koncept smo nato realizirali na proizvodnji liniji ML 15, ki se nahaja v podjetju Domel v Železnikih. Na omenjeni liniji se proizvajajo različne izvedenke BLDC motorjev tipa 720. Rešitev, predstavljena v tem prispevku, predstavlja nadgradnjo diagnostičnega sistema. Za nadgradnjo sistema smo potrebovali hitri modul za sinhrono vzorčenje in A/D pretvorbo analognih signalov (z USB povezavo z računalnikom), pred njim pa namestiti elektronsko vezje za pripravo analognih signalov. Zaradi predstavljenih zahtev (visoka frekvenca zajemanja, simultano vzorčenje več vhodnih signalov) smo izbrali USB modul NI 6343 podjetja National Instruments, ki omogoča sočasno zajemanje 12 kanalov do frekvence 500 kHz, elektronsko vezje s filtri pa smo pripravili sami. Za potrebe razvoja in priprave algoritma smo najprej v programskem okolju LabView pripravili program za zajemanje signalov iz navedenega USB modula, nato pa smo v Matlabu razvili in pripravili algoritem za izračun zamikov. Na koncu smo razvili algoritem preprogramirali v programski jezik C++ in rešitev vgradili v programsko podporo diagnostičnega sistema.

4.1 USB modul za zajem analognih signalov

Za potrebe zajemanja signalov smo uporabili A/D pretvorniški modul z USB izhodom USB-6343 podjetja National Instruments (slika 3, [5]). Gre za visoko zmogljivo multifunkcionalno I/O napravo s 16 diferencialnimi analognimi vhodi, sočasnim vzorčenjem in 16 bitno analogno-digitalno pretvorbo signala. Dosega največjo frekvenco zajemanja signala 500 kVzorcev/s (oz. 500 kHz), ki smo jo v tem primeru tudi v polnosti izkoristili [5]. Z omenjeno kartico smo zajemali 6 signalov: tri napetosti statorskih navitij in tri signale Hallovih senzorjev.



Slika 3 USB modul NI 6343 [6].

4.2 Elektronsko vezje

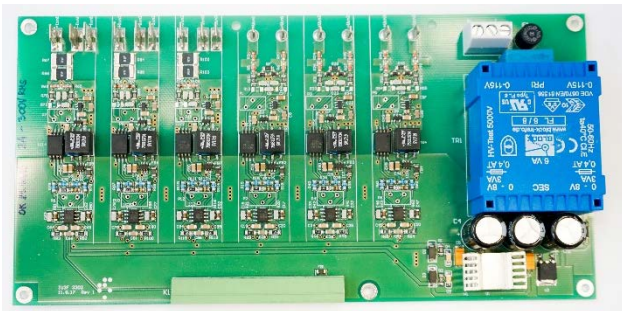
Elektronsko vezje (slika 4) je potrebno za ustrezno pripravo merjenih signalov. Signali induciranih napetosti so sinusne oblike amplitud 30 V ali več, signali Hallovih senzorjev pa so pravokotni z amplitudo 3,3 V. Njihova frekvenca se giblje od 0 Hz (DC) do 1 kHz.

Zaradi prisotnosti različnih motilnih signalov iz okolice in zaradi možnosti različnih nepredvidenih napak pri manipulaciji še nepreizkušenih novih izdelkov (nestabilno kontaktiranje, slabo varjeni priključki navitij, napačne nastavitve delovnih napetosti ipd.) elektronsko vezje zagotavlja ustrezno filtriranje vseh signalov ter galvansko izolacijo med posameznimi kanali.

Pri načrtovanju vezja je bila posebna pozornost posvečena izenačitvi faznih zasukov filtrskih verig za pripravo signalov induciranih

napetosti in Hallovih senzorjev. Ti zasuki, ki jih povzročajo elektronski filtri, se namreč prištevajo h ključnim vrednostim tega merilnega sistema. Dosegli smo, da je fazna neuskklajenost med kanali, ki pripravljajo signale induciranih napetosti, in kanali, ki pripravljajo signale Hallovih senzorjev, manjša od 1° in da se le-ta med delovanjem ne spreminja toliko, da bi škodila merilnim rezultatom. Preostanek fazne neuskklajenosti odpravimo s postopkom kalibracije, kjer izmerjena odstopanja izmerimo, shranimo in jih nato računalnik upošteva pri izračunu končnih rezultatov.

Ker je pri merjenju faznih zasukov zelo pomembna točka prehoda induciranih napetosti statorja preko ničle, elektronsko vezje pri zajemu te signale nelinearno preoblikuje tako, da je ta prehod namenoma ojačan, preostali del signala pa ustrezno omejen.



Slika 4 Elektronsko vezje.

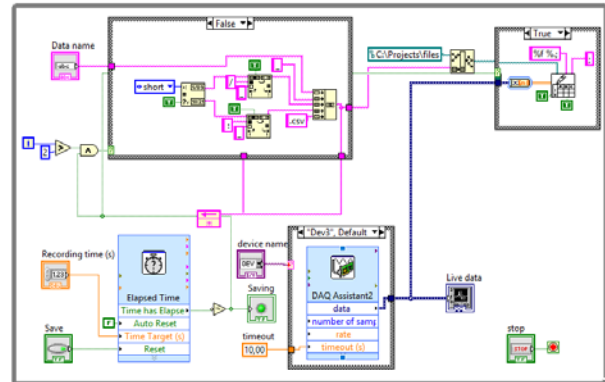
4.3 Razvoj algoritma

4.3.1 Razvoj v okolju LabView

V času razvoja smo zaradi časovnih omejitev in eksperimentalne primernosti orodja zajemanje signalov in osnutke algoritma najprej izvedli v okolju LabView. Za to programsko orodje smo se odločili, ker omogoča preprosto in hitro priključitev in delovanje A/D pretvorniškega modula, saj je izbrani modul kot program LabView izdelek istega podjetja, National Instruments.

Pripravljeni program je omogočal sočasno zajemanje analognih signalov pri frekvenci vzorčenja 500 kHz. Zajemal je signale vseh treh faz statorskih navitij in Hallovih senzorjev v

trenutku, ko smo krmilnik motorja preklpili v režim prostega teka (Angl. Coast). Te signale je nato pretvoril v digitalno obliko in jih shranil v binarno datoteko (BIN), ki smo jo nato uporabili pri računanju faznih zasukov. Izsek tega programa prikazuje slika 5.



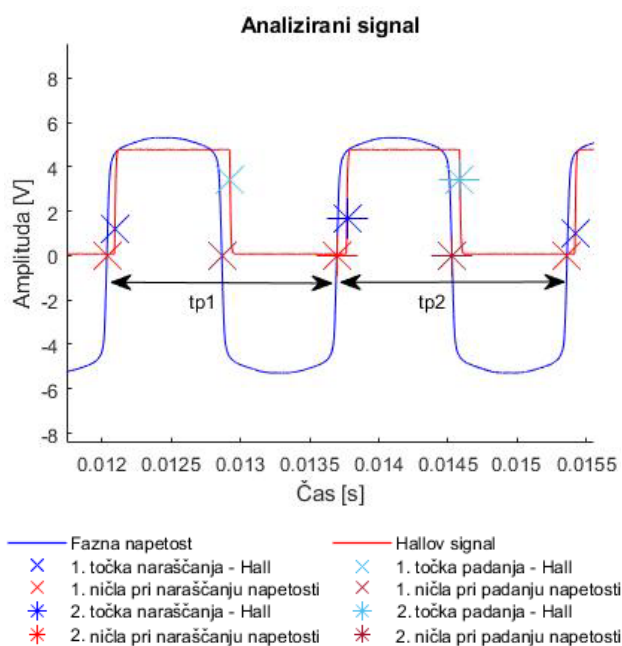
Slika 5 Izsek programa iz LabView-a.

4.3.2 Razvoj v okolju Matlab

Podobno kot orodje LabView, smo tudi programsko orodje Matlab uporabili za potrebe razvoja algoritma. Za orodje Matlab smo se odločili, ker nam omogoča preprosto in hitro implementacijo raznih variant osnutkov algoritma, grafični prikaz rezultatov, statistično obdelavo rezultatov in preverjanje delovanja na različnih izmerjenih nizih rezultatov eksperimentov.

Eksperimentalni algoritem tako na začetku najprej odpre datoteke, ki jih je pri meritvah prej generiral program v LabView-u, ter jih ustrezno razvrsti glede na to, kaj prikazuje (signale smo poimenovali PhaseU, PhaseV, PhaseW, HallU, HallV in HallW). Nato algoritem iz signalov faz (PhaseU, PhaseV in PhaseW) s pomočjo aproksimacije izračuna prehode signalov skozi 0, jih označi, ali pri tem prehodu signal narašča ali pada, ter nato izračuna periodo signala. Iz izračunane periode signala nato izračuna hitrost vrtenja motorja. Ker pa ima motor 2 polova para, za izračun prave hitrosti motorja uporabimo 2 zaporedni periodi signala.

Ko izmerjena padajoča hitrost motorja doseže želeno hitrost, pri kateri pričakujemo ustrezen merilni rezultat (ustrezna razločljivost in primerna natančnost) (to je pri približno 10000 RPM), priležnemu Hallovemu signalu (npr. signalu PhaseU je priležni Hallov signal HallU), poiščemo točke naraščanja oz. padanja. Te točke določimo kot naraščanje oz. padanje vrednosti skozi izbrani prehod (ang. Threshold). Slika 6 prikazuje določanje teh točk za en obrat, izračun posameznih kotnih zasukov pa (2), (3), (4) in (5).



Slika 6 Analiza signala za en obrat.

$$\varphi_{rise1} = \frac{\Delta t_{h1rise-f1pos}}{t_{p1}} \cdot 360^\circ \quad (2)$$

$$\varphi_{fall1} = \frac{\Delta t_{h1fall-f1neg}}{t_{p1}} \cdot 360^\circ \quad (3)$$

$$\varphi_{rise2} = \frac{\Delta t_{h2rise-f2pos}}{t_{p2}} \cdot 360^\circ \quad (4)$$

$$\varphi_{fall2} = \frac{\Delta t_{h2fall-f2neg}}{t_{p2}} \cdot 360^\circ \quad (5)$$

Kjer je:

φ_{rise1} – kotni zasuk pri naraščanju Hallovega signala pri prvi periodi signala

φ_{fall1} – kotni zasuk pri padanju Hallovega signala pri prvi periodi signala

φ_{rise2} – kotni zasuk pri naraščanju Hallovega signala pri drugi periodi signala

φ_{fall2} – kotni zasuk pri padanju Hallovega signala pri drugi periodi signala

$\Delta t_{h1rise-f1pos}$ – časovna razlika med prvo točko naraščanja Hallovega signala in prvega prehoda fazne napetosti pri naraščanju napetosti

$\Delta t_{h1fall-f1neg}$ – časovna razlika med prvo točko padanja Hallovega signala in drugega prehoda fazne napetosti pri padanju napetosti

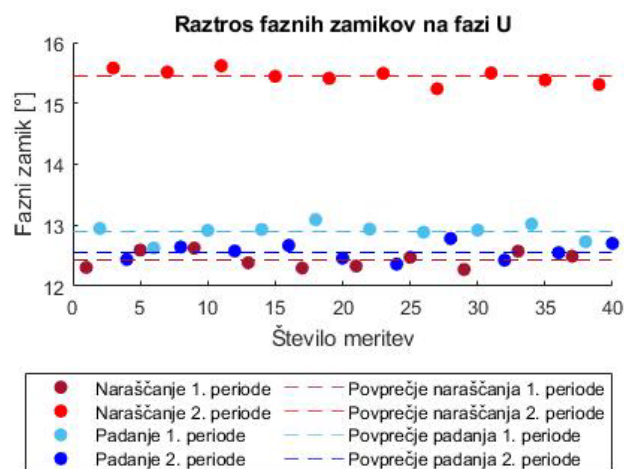
$\Delta t_{h2rise-f2pos}$ – časovna razlika med drugo točko naraščanja Hallovega signala in drugega prehoda fazne napetosti pri naraščanju napetosti

$\Delta t_{h1fall-f1neg}$ – časovna razlika med drugo točko padanja Hallovega signala in drugega prehoda fazne napetosti pri padanju napetosti

t_{p1} – dolžina prve periode signala

t_{p2} – dolžina druge periode signala

Za natančnejši in razločljivejši rezultat izračunamo kotne zasuke za 10 zaporednih obratov motorja, kot rezultat meritve pa podamo povprečje izračunanih zasukov (pri vsakem obratu se vrednosti zasuka ponovijo). Končni rezultat meritev tako prikazujejo (6), (7), (8) in (9), grafični prikaz meritev za eno fazo enega motorja pa prikazuje slika 7.



Slika 7 Primer raztrosa meritev za izbrani motor, faza U.

$$\varphi_{rise_first} = \frac{\sum_{n=1}^{10} \varphi_{rise1n}}{n} \quad (6)$$

$$\varphi_{fall_first} = \frac{\sum_{n=1}^{10} \varphi_{rfall1n}}{n} \quad (7)$$

$$\varphi_{rise_second} = \frac{\sum_{n=1}^{10} \varphi_{rise2n}}{n} \quad (8)$$

$$\varphi_{fall_second} = \frac{\sum_{n=1}^{10} \varphi_{rfall2n}}{n} \quad (9)$$

Kjer je:

φ_{rise_first} – povprečje desetih zaporednih zasukov pri naraščanju prve periode signala

φ_{fall_first} – povprečje desetih zaporednih zasukov pri padanju prve periode signala

φ_{rise_second} – povprečje desetih zaporednih zasukov pri naraščanju druge periode signala

φ_{fall_second} – povprečje desetih zaporednih zasukov pri padanju druge periode signala

Ustreznost delovanja algoritma smo pred izvedbo meritev na motorjih najprej preverili z uporabo funkcijskega generatorja (Tektronix AFG 31051). Njegov izhod je služil kot simulacija napetosti navitij, njegov prožilni izhod pa kot simulacija signala Hall sensorja. Ta generator služi tudi kot kalibrator sistema v končni izvedbi.

Ko smo ugotovili ustreznost algoritma in izračuna, smo izvedli niz meritev na motorjih tipa 720.

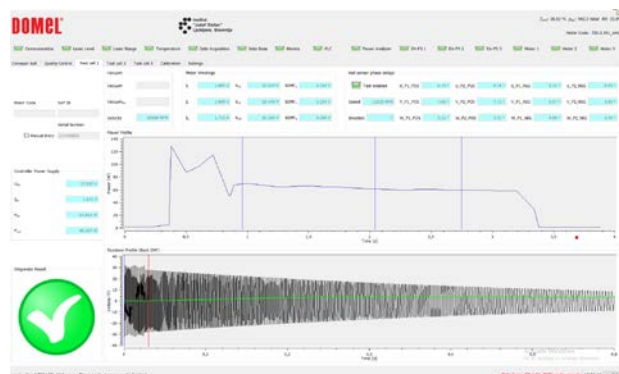
4.3.3 Programiranje algoritma v programskem jeziku C++

Algoritem za zajemanje signalov, ki je bil predstavljen v poglavju 4.3.1 in algoritem za izračun kotnega zasuka, ki je bil predstavljen v poglavju 4.3.2, smo po uspešnem preizkušanju v okolju Matlab (preizkusi normalnega delovanja in delovanja v neobičajnih primerih, kot npr. izpad enega izmed signalov, vrtenje v nasprotno smer, zamenjava priključkov navitij) predelali v

podprogram v programskem jeziku C++, tega pa smo nato dodali k že obstoječemu programu za diagnostiko. Dodani podprogram tako deluje kot funkcija, ki se uporablja samo pri motorjih tipa 720 v izvedbi s Hall senzorji zasuka.

4.4 Rezultati

Izdelani algoritem za merjenje zasuka poda merilne rezultate za vse 4 prehode napetosti za vsako fazo posebej (skupno torej 12 meritev). Meritev se izvede med ustavljanjem motorja v manj kot 300 ms z natančnostjo 0.3° in ponovljivostjo meritev $\pm 0.2^\circ$. Algoritem omogoča tudi določevanje smeri vrtenja motorja, rezultati meritev pa se na koncu shranijo v podatkovno bazo podjetja. Slika 8 prikazuje prikaz rezultatov v programu za diagnostiko podjetja.



Slika 8 Program za diagnostiko.

Razviti algoritem merjenja faznih zasukov zadostuje postavljenim ciljem in sicer:

- Natančnost meritev je boljša od 1° ,
- Meritev ne vpliva na skupni čas diagnostike,
- Meritev se izvaja avtomatizirano brez posredovanja delavca,
- Rezultati meritev se shranjujejo v podatkovno bazo podjetja.

5 Zaključek

V prispevku je obravnavan problem merjenja faznih zasukov med faznimi napetostmi in signali Hallovih senzorjev pri izvajanju končne kontrole kvalitete proizvodnje elektromotorjev tipa BLDC. Predstavili smo razlog, zakaj za tako meritev standardni merilni instrumenti (merilniki frekvence – števcji) niso primerni. Opisana je rešitev, ki s sprejemljivo natančnostjo omogoča merjenje faznih zasukov v času prostega zaustavljanja motorja.

Razvoj metode je učinkovito potekal najprej z uporabo programskega orodja LabView, sledilo je načrtovanje in preizkus algoritma v programskem okolju Matlab, v zaključni fazi pa je bil algoritem predelan v programski jezik C++ in implementiran na diagnostičnem sistemu montažne linije ML15A v Domel-u.

Za izvedbo metode je bil uporabljen A/D pretvorniški modul s sočasnim zajemom merilnih kanalov in posebej razvito elektronsko vezje za predpripravo signalov.

Predstavljena merilna metoda ni zamenjava za standardne merilne instrumente, ki merijo frekvenco, časovne zasuke in štejejo impulze, pač pa rešuje problem merjenja faznih zasukov pri časovno spreminjajočih se signalih, ki nastopajo pri prostem zaustavljanju elektromotorjev.

Razvita metoda uspešno deluje na proizvodni liniji v pravem industrijskem okolju.

Zahvala. Delo je bilo podprto s strani Javne agencije za raziskovalno dejavnost Slovenije skozi Projekt P2-0001.

6 Literatura

- [1] Yedamale, Brushless DC (BLDC) motor fundamentals, Microchip Technology Inc, 2003.
- [2] A. Carolus, S. Manny in M. Mesganaw, Brushless DC Motor Commutation Using, Texas Instruments Inc., 2019.

- [3] K. Kolano, „Determining the Position of the Brushless DC,“ *Energies*, št. 7, p. 1607, 2020.
- [4] L. Yang, C. Qu, B. Jia in e. al., „The design of an affordable fault-tolerant control system of the brushless DC motor for an active waist exoskeleton,“ *Neural Comput & Applic*, št. 35, p. 2027–2037, 2022.
- [5] „National Instruments,“ [Elektronski]. Available: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6343-specs/page/specs.html>. [Poskus dostopa 9 marec 2023].
- [6] „National Instruments,“ [Elektronski]. Available: <https://www.ni.com/sl-si/support/model.usb-6343.html>. [Poskus dostopa 10 marec 2023].