

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za elektrotehniko

Jure Peternel

SISTEM ZA MERJENJE OVALNOSTI IN EKSCENTRIČNOSTI
MOTORJA

DIPLOMSKO DELO UNIVERZITETNEGA ŠTUDIJA

Mentor: doc. dr. Boštjan Murovec

Ljubljana, 2011

Zahvala

Na prvem mestu se želim zahvaliti mentorju doc. dr. Boštjanu Murovcu za strokovno vodstvo in pregled diplomskega dela.

Zahvaljujem se sodelavcem v podjetju Iskra Mehanizmi d.d..

Zahvaljujem se Darji, Gaji in Zoji za izkazano podporo v času pisanja diplomske naloge.

Povzetek

Pri razvoju novega izdelka se vedno srečamo z zahtevami kupca in številnimi standardi, ki veljajo za določeno področje uporabe izdelka. Avtomobilska industrija spada med področja z najstrožjimi in najbolj ozko definiranimi predpisi, ki natančno določajo tako nazivne vrednosti in dovoljena odstopanja parametrov samega izdelka, kot tudi nekatere metode za merjenje in preverjanje teh parametrov. S strogimi zahtevami se srečamo tudi pri uvajanju izdelka v serijsko proizvodnjo. Vsa serijska orodja in merilni sistemi morajo ustrezati še ožjim tolerancam kot sam izdelek, da zagotovijo ustrezno kakovost izdelka. Prav tako sta pri serijski proizvodnji pomembna sledljivost in ustrezno shranjevanje podatkov za kasnejšo analizo odstopanj parametrov in napak.

Diplomsko delo obravnava izvedbo in uporabo merilnega sistema za merjenje ovalnosti in opletanja brezkrtačnega motorja z zunanjim rotorjem, kot sestavnim delom radarskega senzorja bližine v vozilih, ki je razvit v podjetju Iskra Mehanizmi d.d. Meritve opletanja motorja se izvajajo na treh mestih aksialno in dvajsetkrat na obrat z linearnimi merilnimi letvami, pri čemer za obračanje merjenega motorja skrbi zunanji koračni motor. Uporabniški vmesnik, razvit v okolju LabView, služi za prikaz in shranjevanje rezultatov meritev ter komunikacijo z merilniki in krmilnikom koračnega motorja. Merilni sistem se uporablja na avtomatski liniji za 100 % izhodno kontrolo parametrov motorja.

Ključne besede: ovalnost rotorja, opletanje rotorja, merjenje ovalnosti, merjenje opletanja, izhodna kontrola, LabView

Abstract

Development of new product always requires compliance with customer needs and numerous standards valid for product application. Products in automotive industry has to meet one of most strict and rigorous regulations and standards, wich precisely defines parameter nominal values, acceptable parameter deviations and parameter measuring and evaluation methods. Even tighter tolerances are required for machine tools and measuring systems on serial production line. Traceability and production data storage are two important elements of mass production line, needed for later parameter deviation and fault analysis.

In thesis we represent realisation and application of eccentricity and ovalness measurement system for brushless motor with external rotor. Motor was developed in Iskra Mehanizmi d.d. as a part of proximity sensor in vehicles. Motor is measured twenty times per rotation on three points axially with linear gages connected to counters. User interface, based on LabView environment, serves for measurement data display and storage, stepper motor control and communication with counters. Measuring system is used on serial production line for 100 % end of line tests.

Keywords: rotor ovalness, rotor eccentricity, ovalness measurement, eccentricity measurement, end of line testing, LabView

Kazalo

1	Uvod	1
1.1	Brezkrtalni motor z zunanjim rotorjem	1
1.2	Zahteve za izvedbo merilnega sistema	4
1.3	Tematika diplomske naloge	5
2	Celotni sistem za končno testiranje motorjev	7
2.1	Komunikacija PLK – merilna naprava	9
2.2	Paleta za postavitve motorja v procesu končne kontrole	10
2.3	Dvodimenzionalna podatkovna matrična koda	11
2.4	Procesorska enota za branje in pisanje na nosilec podatkov	11
2.5	Shranjevanje rezultatov meritev v bazo	13
2.6	Delovni nalog	14
2.7	Status meritve	14
2.8	Branje nosilca podatkov in tiskanje nalepke	14
3	Strojna oprema	17
3.1	Vpetje motorja	18
3.2	Linearni merilniki položaja	19
3.3	Koračni motor	21
3.4	Nastavitev začetnega kota merjenja pri merjenju	21
3.5	Umerjanje	22
3.6	Krmilje koračnega motorja	23
3.6.1	Pretvorba USB ↔ UART	24
3.6.2	Komunikacija s programabilnimi logičnimi krmilniki	25
3.6.3	Izhodna močnostna stopnja	25
3.6.4	Mikrokrmilnik	28
4	Uporabniški vmesnik	31
4.1	Inicializacija strojne opreme	33
4.1.1	Inicializacija procesne enote Balluff	33
4.1.2	Inicializacija linearnih merilnikov položaja	33
4.1.3	Inicializacija krmilnika koračnega motorja	35

4.2	Zahtevani vnosi merilca	35
4.3	Komunikacija s krmilnikom koračnega motorja	36
4.4	Izpis serijske številke in delovnega naloga	38
4.5	Prikaz rezultatov meritev	41
4.6	Indikator poteka meritve	42
5	Meritve in rezultati	45
5.1	Analiza merilnega sistema po metodi GRR	45
5.1.1	Lokacijsko odstopanje porazdelitve meritev	46
5.1.2	Širinsko odstopanje porazdelitve meritev	48
5.2	Prve meritve	53
5.3	Rezultati analize merilnega sistema po metodi GRR	58
6	Zaključek	59
7	Priloge	61
	Literatura	65
	Izjava	67

Kazalo slik

Slika 1: Sestav motorja a) rotor, b) stator, c) ploščica z vezjem in osjo	2
Slika 2: Radarski senzor bližine (preslikano iz [4])	3
Slika 3: Površina rotorja motorja (preslikano iz [4])	3
Slika 4: Zahtevani položaj merilnih letev	4
Slika 5: Celoten sistem za 100 % končno kontrolo	7
Slika 6: Komunikacija PLK – merilna naprava (povzeto iz [8])	9
Slika 7: Paleta z vstavljenim motorjem	10
Slika 8: 2D matrična koda in numerični zapis na ploščici za kontaktiranje.....	11
Slika 9: Sistem Balluff; a) procesorska enota, b) bralno/pisalna glava in c) nosilci podatkov	12
Slika 10: Strojna oprema sistema za merjenje ovalnosti – a) priprava za vpetje, b) krmilnik koračnega motorja in c) števca za priklop linearnih merilnikov	17
Slika 11: Potek vpenjanja motorja v merilno napravo	18
Slika 12: Princip delovanja fotoelektričnega linearnega enkoderja (povzeto iz [12]).....	19
Slika 13: Izhodi fotodiod in linearnega merilnika (povzeto iz [2]).....	20
Slika 14: Glava na linearnem merilniku položaja	20
Slika 15: Položaj utorov na rotorju in začetna pozicija merjenja	21
Slika 16: Aluminijski kaliber	22
Slika 17: Optični prekinjalnik na stojalu koračnega motorja	22
Slika 18: Bločna shema krmilja koračnega motorja	23
Slika 19: Vezava pretvornika FT232R	24
Slika 20: Shema vezave optosklopnikov za komunikacijo s programabilnimi logičnimi krmilniki.....	25
Slika 21: Tok na navitju koračnega motorja (povzeto iz [19]).....	26
Slika 22: Shema vezave UDN2916.....	27
Slika 23: Vezje z mikrokrmilnikom PIC18F4550	28
Slika 24: Uporabniški vmesnik.....	31
Slika 25: Diagram poteka programa	32
Slika 26: Inicializacija serijskih vrat v LabView	34
Slika 27: Vnos statusa meritve.....	35
Slika 28: Indikator serijske številke in delovnega naloga	38

Slika 29: TCP komunikacija v LabView	38
Slika 30: Potek komunikacije s procesorsko enoto Balluff.....	39
Slika 31: Izpis rezultatov meritev	41
Slika 32: Indikator statusa kosa (dober ali slab) po končani meritvi	41
Slika 33: Indikator poteka meritve	42
Slika 34: Predstavitev odstopanja rezultatov meritev (povzeto iz [5])	46
Slika 35: Pristranskost (a) in lezenje (b) odstopanja meritev (povzeto iz [5])	47
Slika 36: Ponovljivost (a), primerljivost (b) in GRR (c) odstopanj meritev (povzeto iz [5]).....	49
Slika 37: Izpis rezultatov metode GRR za merilnik položaja 3 in kot 216°	52
Slika 38: Grafi meritev motorja na vsakih 18° , brez nastavitve začetnega kota umerjanja	53
Slika 39: Grafi umerjanj na vsakih $3,6^{\circ}$, z nastavitvijo začetnega kota umerjanja	56

Kazalo tabel

Tabela 1: Zahtevane spodnje meje odstopanj ovalnosti od umerjenih vrednosti	5
Tabela 2: Funkcionalni pregled sistema za končno testiranje.....	7
Tabela 3: Funkcija digitalnih izhodov in vhoda na merilni napravi	9
Tabela 4: Primer in razlaga dvodimenzionalne matrične kode	11
Tabela 5: Naslovi za vpis na nosilec podatkov	12
Tabela 6: Glava datoteke z rezultati	13
Tabela 7: Primeri natisnjenih znakov na nalepki po končanih meritvah.....	14
Tabela 8: Funkcije vhodov UDN2916 za eno fazo.....	27
Tabela 9: Stanje vhodov UDN2916 za eno periodo korakanja	27
Tabela 10: Uporabljeni ukazi števecov linearnih merilnikov položaja	34
Tabela 11: Zahteve krmilniku koračnega motorja in pripadajoči odgovori	36
Tabela 12: Primer tabele GRR.....	50
Tabela 13: Izračun deleža posameznih komponent odstopanja merilnega sistema	52
Tabela 14: Opletanje kalibra	54
Tabela 15: Ponovljivost vpenjanja čeljusti	54
Tabela 16: Opletanje pogonske sklopke	55
Tabela 17: Povprečje, največje in najmanjše razlike 10 zaporednih umerjanj s kalibrom, z nastavitvijo začetnega kota umerjanja.....	57
Tabela 18: Rezultati analize merilnega sistema po metodi GRR	58

1 Uvod

Nastanek in razvoj avtomobilske industrije že od samega začetka spremljajo prometne nesreče, ki v svetu terjajo 1,2 milijona življenj letno [1]. Vedno večja potreba po mobilnosti prispeva tudi k porastu prometnih nesreč in ocenjeno je, da bo ob nadaljevanju trenda, smrt zaradi prometne nesreče peti najbolj pogost vzrok smrti v svetu do leta 2030 [1].

Države si prizadevajo zmanjšati število prometnih nesreč na več načinov. Voznike želijo prisiliti k počasnejši in varnejši vožnji s strožimi zakoni in z osveščanjem o varnosti v cestnem prometu. Na avtomobilsko industrijo pritiskajo z uvajanjem strogih regulativ in standardov, ki jih je potrebno upoštevati pri razvoju avtomobilskih komponent in vozil. Standardi za avtomobilske komponente predpisujejo nazivne vrednosti in dovoljena odstopanja parametrov ter nekatere metode za merjenje in preverjanje teh parametrov. Predpisani so vzdržljivostni testi, pri katerih mora komponenta delovati predpisan čas pri mejnih pogojih. Vzdržljivost in zanesljivost komponent pripomore k večji zanesljivosti vozila in varnosti voznika.

Varnost voznika je odvisna od pasivne in aktivne varnostne opreme v vozilu. Pasivna varnostna oprema je namenjena zmanjšanju možnosti poškodb oseb v vozilu pri trku; na primer varnostni pas ali zračne blazine. Naprave v vozilu, ki preprečujejo oziroma pomagajo izogibanju trka pa štejemo k aktivni varnostni opremi. Med te naprave spada senzor bližine, katerega del je brezkrtačni motor z zunanjim rotorjem.

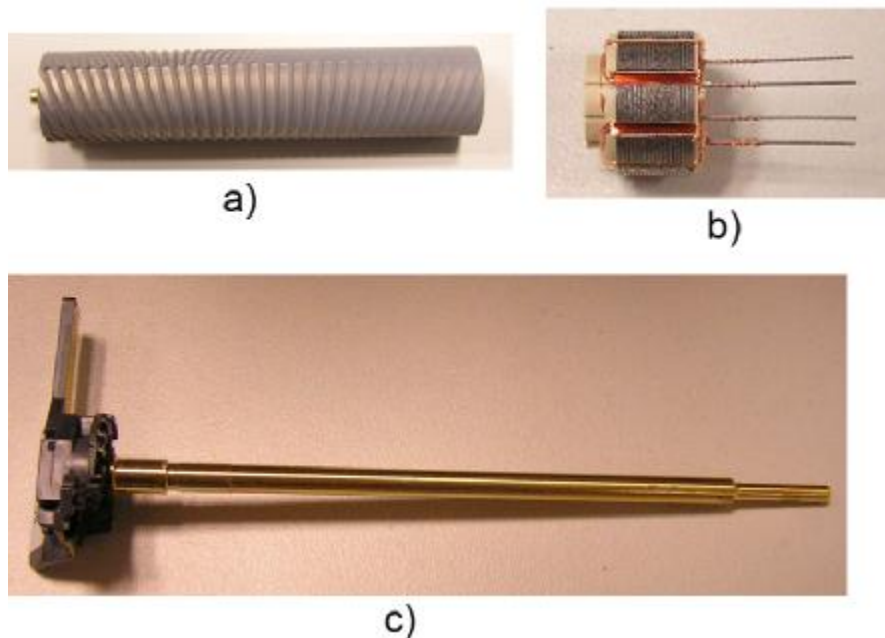
1.1 Brezkrtačni motor z zunanjim rotorjem

Brezkrtačni enosmerni motor (ang.: brushless direct current – BLDC) z zunanjim rotorjem je razvit v podjetju Iskra Mehanizmi d.d. kot sestavni del radarskega senzorja bližine (ang.: adaptive cruise control radar system) tretje generacije za potrebe v avtomobilski industriji.

Brezkrtačni enosmerni motor ima tako kot enosmerni motor s trajnim magnetom (ang.: permanent magnet direct current – PMDC) linearno karakteristiko navora v odvisnosti od hitrosti. Stator PMDC motorja je sestavljen iz magnetov, smer toka na

navitijah rotorja se spreminja skozi proces mehanske komutacije. Pri BLDC motorjih je rotorski del sestavljen iz magnetov, smer toka na navitjih statorja spreminjamo s tranzistorji pri čemer čase prekopov določa povratna zanka pozicije rotorja; najbolj pogosto so uporabljeni Hallovi senzorji ali enkoder [2].

Motor je v grobem sestavljen iz treh delov, prikazanih na sliki 1. Ploščica z vezjem je narejena v tehnologiji 3D-MID (ang.: 3-dimensional molded interconnect devices). Z MID tehnologijo sta združeni električna (tiskano vezje, kontakti) in mehanska funkcija (pritrditev osi, statorja in rotorja motorja ter pritrditev sestavljenega motorja v radarski senzor bližine); s tem se zmanjša kompleksnost izdelave ter poraba prostora. Na plastično ploščico poljubne oblike so z laserjem vrisane vezi, ki s postopkom metalizacije postanejo prevodne [3]. Na 3D-MID so prilotani trije Hallovi senzorji za določanje časov vklopov tranzistorjev in optični prekinjalnik za določanje pozicije rotorja ter zakovana os motorja (slika 1c).



Slika 1: Sestav motorja a) rotor, b) stator, c) ploščica z vezjem in osjo

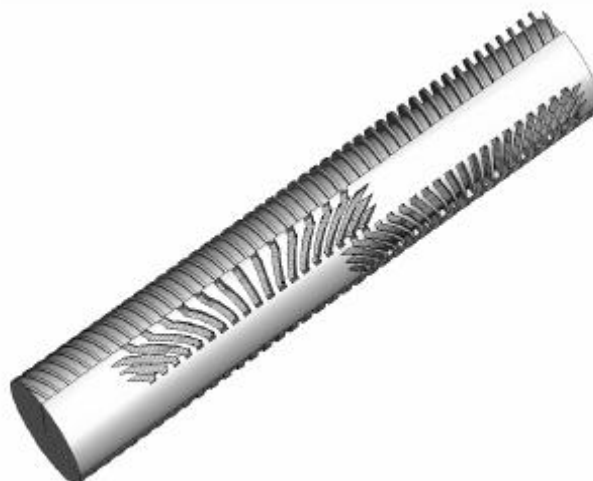
Stator (slika 1b) iz mehkomagnetnega materiala s tremi navitji na fazo in tremi fazami, povezanimi v zvezdo, je pritrjen na ploščico z vezjem z zakovanjem, izvodi statorja so prilotani na 3D-MID. V notranjosti rotorja (slika 1a) je prilepljen magnet s šestimi polovimi pari in pritrjena dva ležaja na vsaki strani rotorja. V končnem sestavu motorja sta ležaja zakovana na os.

Radarski senzor bližine, prikazan na sliki 2, temelji na 77 GHz radarskem senzorju z mehansko anteno z dvema obsegoma delovanja; oddaljeno zaznavanje z območjem delovanja na oddaljenosti od 0,25 m do 200 m pri kotu $\pm 9^\circ$ horizontalno in bližnje zaznavanje z območjem delovanja na oddaljenosti od 0,25 m do 60 m pri kotu $\pm 28^\circ$ horizontalno.



Slika 2: Radarski senzor bližine (preslikano iz [4])

Antena sestoji iz dveh delov. Radarsko valovanje, usmerjeno neposredno na rotor motorja, se razprši na brazdah na površini rotorja (slika 3). Rotor z vrtenjem horizontalno porazdeli radarsko valovanje po kotu in amplitudi, določenima s površino rotorja. Brazde na rotorju so zasnovane na način, ki omogoča izmenično zaznavanje obeh območij delovanja radarskega senzorja. Na rotorju na sliki 3 je v ospredju porazdelitev brazd za bližinsko zaznavanje.



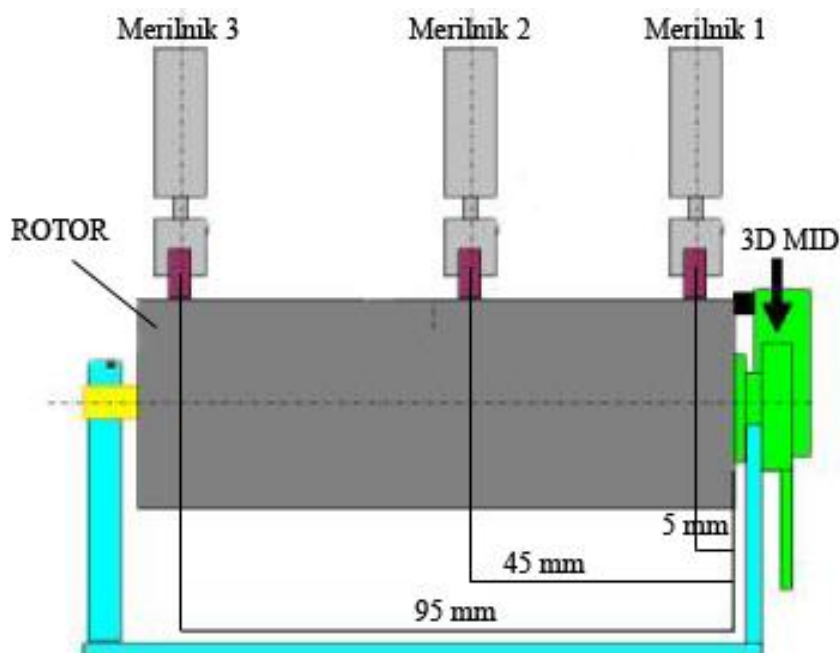
Slika 3: Površina rotorja motorja (preslikano iz [4])

Drugi del antene sestoji iz dveh odbojnih plošč, preko katerih se odbija razpršeno radarsko valovanje. Ena odbojna plošča je premična in s spremembo naklona s koračnim motorjem spremeni območje oddajanja radarskega valovanja v navpični smeri.

Za doseganje natančnosti radarskega sistema je potrebno oddajnik radarskega valovanja namestiti čim bližje motorju. Ukrivljenost ali prevelik premer rotorja bi povzročila blokado vrtenja, premajhen premer pa nenatančno delovanje radarskega senzorja.

1.2 Zahteve za izvedbo merilnega sistema

Osnovna zahteva za izvedbo sistema je merjenje odstopanja ovalnosti motorja na treh mestih vzdolžno (slika 4), vsakih $18^\circ \pm 2^\circ$ znotraj obrata. Sistem se umeri z aluminijastim kalibrom, dovoljeno pozitivno odstopanje merjenja od umerjenih vrednosti na vseh merilnikih po vseh kotih je 0,1 mm, dovoljena negativna odstopanja po merilnikih in kotih so prikazana v tabeli 1.



Slika 4: Zahtevani položaj merilnih letev

KOT [°]	Merilnik 1 spodnja meja [mm]	KOT [°]	Merilnik 2 spodnja meja [mm]	KOT [°]	Merilnik 3 spodnja meja [mm]
0 - 72	−0,3	0 - 36	−0,15	0 - 36	−0,3
90 - 288	−0,2	54 - 90	−0,2	54 - 342	−0,2
306 - 342	−0,3	108 - 342	−0,15		

Tabela 1: Zahtevane spodnje meje odstopanj ovalnosti od umerjenih vrednosti

Sistem mora biti vsaj pogojno dober po opravljeni analizi po metodi GRR (ang.: gage repeatability and reproducibility) [5]. Čas ene meritve, vključno z manipulacijo motorja, mora biti krajši od 40 s, kar pogojuje število proizvedenih izdelkov na leto (200.000). Sistem ima en digitalni vhod za indikacijo, kdaj se meritev lahko začne (motor vpet) in dva digitalna izhoda za indikacijo izvajanja meritve ter napake. Omogočena je TCP/IP komunikacija s procesorsko enoto podjetja Balluff [6], preko katere se bere in piše na nosilec podatkov.

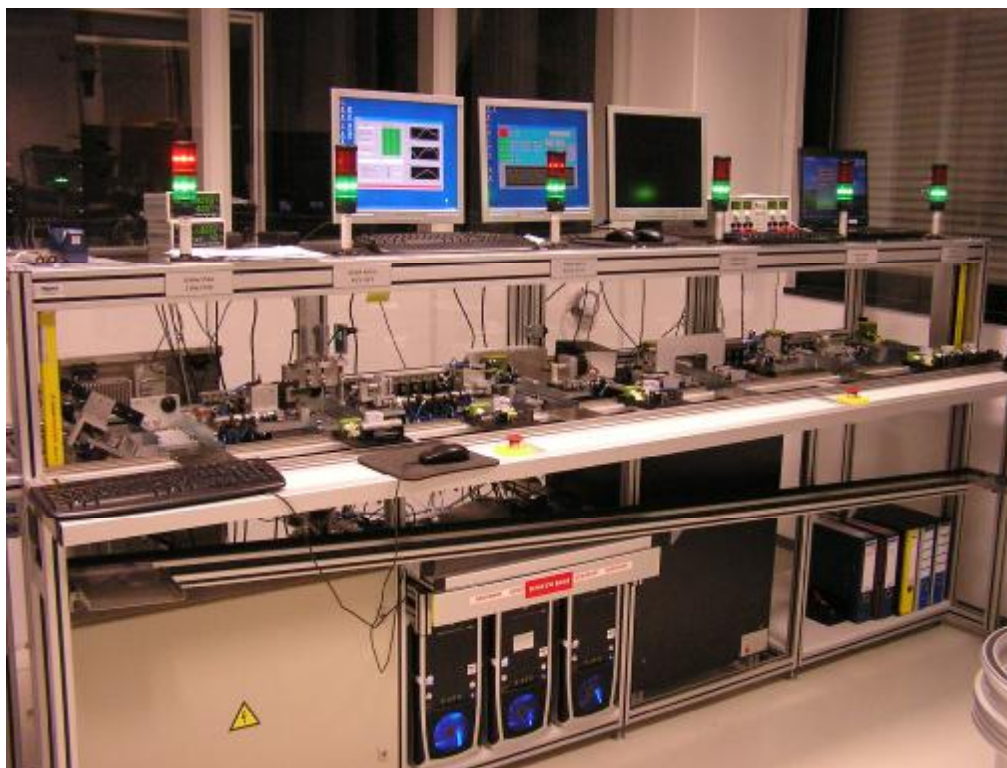
1.3 Tematika diplomske naloge

Diplomska naloga obravnava izvedbo sistema za merjenje ovalnosti in ekscentričnosti motorja za 100 % končno kontrolo. Naši cilji so:

- izdelava stabilnega sistema za merjenje,
- zagotoviti vsaj pogojno dober sistem po metodi GRR,
- zagotoviti čim manjšo vključenost človeka v proces izvajanja meritev zaradi manjše možnosti napak,
- preprečiti, da bi bil izdelek, ki odstopa od toleranc, označen za dobrega v kakršnem koli primeru (npr. v primeru napake merilnega sistema),
- doseči krajši čas meritve izdelka od predpisanega časa,
- narediti uporabniku prijazen in pregleden uporabniški vmesnik.

2 Celotni sistem za končno testiranje motorjev

Celotni sistem za končno testiranje, prikazan na sliki 5, je sestavljen iz šestih samostojnih postaj.



Slika 5: Celoten sistem za 100 % končno kontrolo

Pregled funkcij vsake postaje prikazuje tabela 2.

Postaja	Funkcija	Oznaka
1.	izbris nosilca podatkov, branje serijske številke motorja in vpis le-te na nosilec podatkov	PAL
2.	25 s test motorja pri napetosti 18 V in 8000 vrtljajih na minuto, merjenje navora pri nazivni hitrosti 900 vrtljajev na minuto	MRI3
3.	merjenje vibracij	VIB4
4.	merjenje časa trajanja in amplitude signalov optičnega senzorja ter Hallovih sond, merjenje faktorja amplitudnega popačenja povratne elektromotorne sile (ang.: back electromotive force)	HBF5
5.	merjenje ovalnosti in ekscentričnosti	RNO6
6.	označevanje nalepke s serijsko številko na motorju in izbris nosilca podatkov	INKJ

Tabela 2: Funkcionalni pregled sistema za končno testiranje

Na postaji z oznako MRI3 se merjeni motor vrti 30 s z 8000 vrtljaji na minuto pri napajalni napetosti 15 V. Namen testa je preveriti delovanje motorja pri mejni predpisani napetosti in utek ležajev. Navor pri nazivni hitrosti 900 vrtljajev na minuto se pomeri s histerezo zavore, priključeno na os motorja. S povečevanjem toka v navitju zavore se povečuje breme na merjencu. Merilni sistem odčita tok na zavori v trenutku, ko delovni cikel (ang.: duty cycle) pulzno širinsko modulirane (PŠM) napetosti na navitju motorja doseže 100 % končne vrednosti napetosti. Navor določimo preko toka na zavori.

Vibracije motorja se merijo na obeh straneh osi motorja z dvema silomeroma Kistler 9317B [7]. Naprava pomeri sile na os motorja med obratovanjem ter ustavljanjem motorja. Izračunajo se statistični podatki in spektralna analiza sil, harmonske orbite sil in debalans motorja. Napravo so izdelali na Fakulteti za strojništvo v Ljubljani.

Na postaji z oznako HBF5 koračni motor vrti merjeni motor z 900 vrtljaji na minuto. Merilni sistem meri čas trajanja ter amplitudo nizkega ter visokega nivoja signalov treh Hallovih sond in optičnega prekinjevalnika na merjencu. Istočasno se pomeri faktor popačenja povratne elektromotorne sile (ang.: back electromotive force). Vse meritve se izvajajo v obsegu treh polnih obratov motorja.

Med vpenjanjem ali izpenjanjem motorja lahko pride do poškodbe operaterja. Zaščito pred posegi operaterja nudi svetlobna zavesa, montirana na sprednji strani linije. V primeru prekinitve žarka se proces vpenjanja ali izpenjanja ustavi na vseh postajah. Za dodatno varnost sta dodani dve stop tipki. Na zadnji strani linije so po vsej dolžini vgrajena servisna vrata za dostop do zadnje strani merilnih sistemov. Vgrajena so induktivna stikala, ki ustavijo proces vpenjanja, če so vrata odprta. Ti zaščitni sistemi nimajo funkcije, ko je motor vpet oziroma med meritvami.

Prvo in zadnjo postajo ter vpenjanje in izpenjanje motorja na vseh postajah krmili programabilni logični krmilnik (PLK), ki obenem skrbi za komunikacijo s posameznimi merilnimi napravami na liniji. Pnevmatika vpenjanja motorja, program na PLK in ogrodje za postavitve ter instalacijo merilnih naprav je izdelalo podjetje Hypex d.o.o.

2.1 Komunikacija PLK – merilna naprava

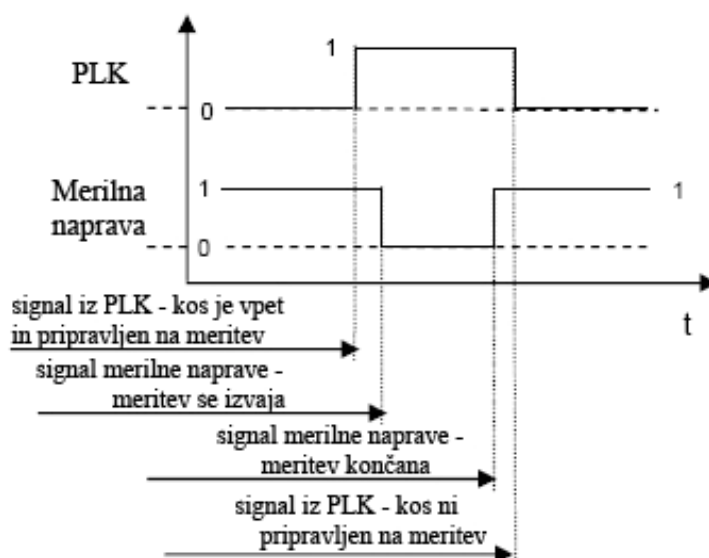
Vsaka merilna naprava ima dva digitalna izhoda (DI) in en digitalni vhod (DV) za komunikacijo s PLK, katerih funkcijo podaja tabela 3.

	LOGIČNO STANJE	
	0	1
digitalni vhod (DV)	kos ni vpet	kos vpet, pripravljen za meritev
digitalni izhod 1 (DI1)	meritev se izvaja, manipulacija ni dovoljena	meritev končana oz. manipulacija dovoljena
digitalni izhod 2 (DI2)	napaka na merilnem sistemu	na merilnem sistemu ni napake

Tabela 3: Funkcija digitalnih izhodov in vhoda na merilni napravi

PLK postavi digitalni vhod DV na logično 1, ko je merjenec vpet. Merilna naprava potrdi zaznano visoko stanje na tem vhodu s postavitvijo digitalnega izhoda DI1 v stanje logične 0; nato se meritev prične. S tem se prepreči manipulacija in poškodba merjenca med samo meritvijo.

Po končani meritvi merilna naprava postavi digitalni izhod DI1 v stanje logične 1. V primeru kakršnekoli napake pri meritvi se hkrati postavi digitalni izhod DI2 v stanje logične 0. Komunikacija, brez signala za napako, je prikazana na sliki 6.

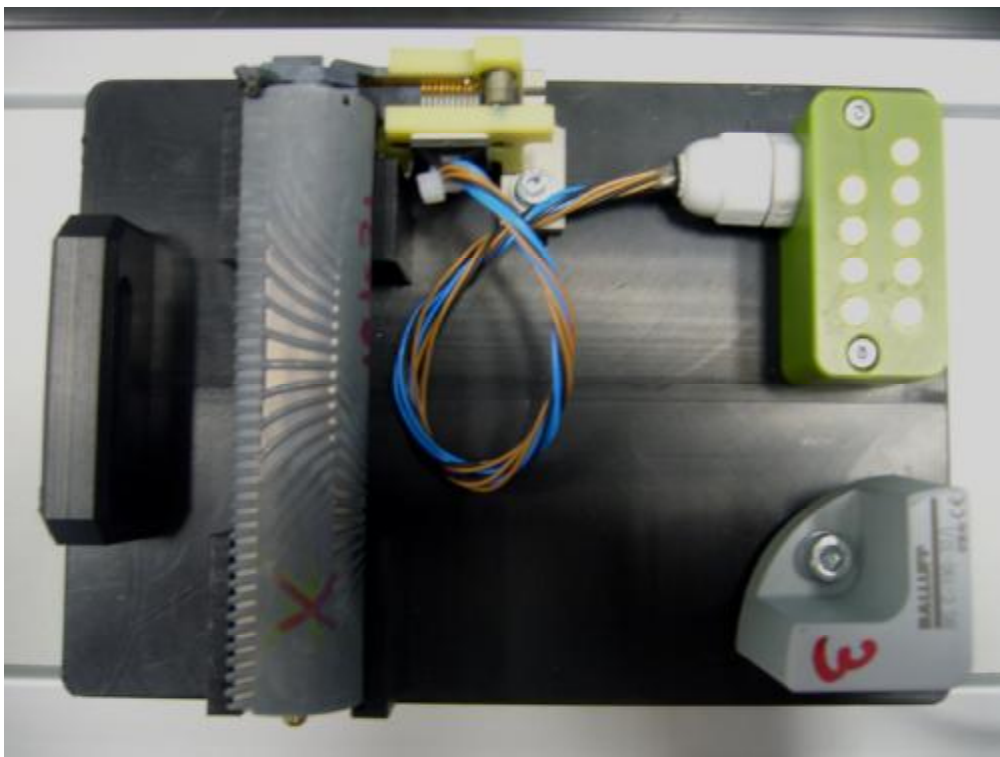


Slika 6: Komunikacija PLK – merilna naprava (povzeto iz [8])

Na vsaki postaji sta montirani zelena in rdeča luč za indikacijo trenutnega statusa naprave. Med meritvijo je prižgana rdeča luč, po končani meritvi pa se prižge zelena luč, če je bila meritev uspešna in kos dober. V primeru napake na meritvi ali slabega kosa izmenično utripata zelena in rdeča luč. Stanje luči po končani meritvi ostane nespremenjeno do nove meritve.

2.2 Paleta za postavitev motorja v procesu končne kontrole

Proces končne kontrole se začne z vstavitvijo motorja na paleto (slika 7). Na ta način se izognemo prijemanju in možni poškodbi površine rotorja na vsaki merilni postaji, saj motor skozi celoten postopek končne kontrole ostaja na paleti.



Slika 7: Paleta z vstavljenim motorjem

Operater po vstavitvi motorja na paleto sklene tudi kontakte na paleti s ploščico za kontaktiranje motorja. Ko je motor vpet, so kontakti motorja dostopni vsaki merilni postaji. S tem zmanjšamo možnost poškodb ploščice za kontaktiranje na motorju. Operater vstavi paleto z motorjem v vsako posamezno postajo, kjer se avtomatsko izvrši določena operacija ali meritev.

2.3 Dvodimenzionalna podatkovna matrična koda

Prva enota je namenjena branju dvodimenzionalne podatkovne matrične kode (ang.: 2D data matrix code), v kateri je napisana 19 mestna serijska številka motorja. Koda je strojno berljiva, pri čemer je za branje uporabljen čitalnik DataMan100 podjetja Cognex [9]. Koda se nahaja na ploščici s kontakti motorja (slika 8) in je za vsak motor različna. Primer in razlago kode vidimo v tabeli 4.



Slika 8: 2D matrična koda in numerični zapis na ploščici za kontaktiranje

Na ploščici za kontaktiranje je poleg 2D matrične kode še numerični zapis serijske številke kosa, teden in leto izdelave motorja.

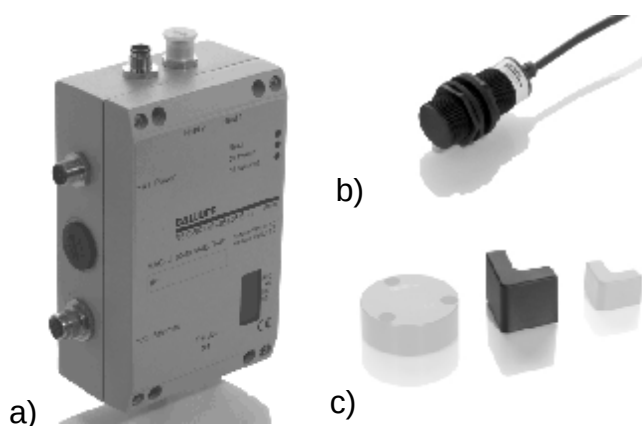
					
00292451A2020212008					
00	292451	A2	02021	20	08
prazno polje	kupčeva koda izdelka	indeks spremembe	serijska številka kosa	teden izdelave v letu	leto izdelave

Tabela 4: Primer in razlaga dvodimenzionalne matrične kode

2.4 Procesorska enota za branje in pisanje na nosilec podatkov

Na vsaki paleti je montiran nosilec podatkov podjetja Balluff [10] (slika 7), na katerega se na prvi postaji brezkontaktno preko radio-frekvenčnih valov (ang.: radio-frequency identification system - RFID) vpiše serijska številka motorja preko bralno/pisalne glave [11].

Pisanje in branje opravlja procesorska enota BIS C-6027 podjetja Balluff [6], na katero sta lahko povezani dve bralno/pisalni glavi. Enota je povezana v Ethernet mrežo s komunikacijskim protokolom TCP/IP. Na liniji je montirana po ena procesorska enota za vsak merilni sistem. Nosilec podatkov ima 8 kilozlogov FRAM pomnilnika, podatki pa so zapisani v ASCII kodi. Procesorsko enoto, bralno/pisalno glavo in nosilec podatkov Balluff prikazuje slika 9.



Slika 9: Sistem Balluff; a) procesorska enota, b) bralno/pisalna glava in c) nosilci podatkov

Po vpetju motorja in palete pride nosilec podatkov v doseg bralno pisalne glave. Vsaka merilna postaja pred začetkom meritve prebere z nosilca podatkov serijsko številko motorja. Po končani meritvi se vpiše na določen naslov na nosilcu podatkov status meritve (meritev izvršena ali napaka na meritvi) ter status kosa (dober ali slab). Vpis ASCII »1« velja v primeru, če je kos dober oziroma meritev izvršena, medtem ko katerikoli drug ASCII znak pomeni napako. Naslove za vpis statusa na vsaki postaji prikazuje tabela 5.

Naslovi na nosilcu podatkov (zlogi)	Postaja	Vsebina
0 - 19	PAL	serijska številka motorja
100	MRI3	meritev opravljena/napaka na meritvi
110	MRI3	kos dober/slab
200	VIB4	meritev opravljena/napaka na meritvi
210	VIB4	kos dober/slab
300	HBF5	meritev opravljena/napaka na meritvi
310	HBF5	kos dober/slab
400	RNO6	meritev opravljena/napaka na meritvi
410	RNO6	kos dober/slab

Tabela 5: Naslovi za vpis na nosilec podatkov

S časom se kontakti na paleti za postavitve motorja obrabijo in nekateri dobri motorji so po končanih meritvah prepoznani kot slabi. Za odkrivanje teh napak ima vsaka paleta za postavitve motorja svojo številko vpisano na nosilcu podatkov na naslovu 4000. Z analizo rezultatov meritev v povezavi s številko palete se v primeru napak paleta zamenja in slabi kosi še enkrat pomerijo.

Na prvi postaji se poleg vpisa serijske številke motorja tudi izbriše nosilec podatkov (vpiše ASCII » «) na naslovih od 100 do 500. Vsaka merilna postaja mora pred začetkom meritve preveriti, ali je nosilec podatkov na naslovih, predvidenih za to merilno postajo, prazen. S tem zmanjšamo možnost napake, saj bi operater lahko preskočil prvo postajo, na nosilcu podatkov pa bi ostala serijska številka že pomerjenega motorja. V tem primeru bi rezultati meritev za različne motorje vsebovali eno in isto serijsko številko.

2.5 Shranjevanje rezultatov meritev v bazo

Za shranjevanje in razvrščanje rezultatov meritev v bazo skrbi program podjetja Inda. Vsak merilni sistem ima na svojem lokalnem disku direktorij, namenjen skupni rabi, do katerega ima program IndaPrenos omogočen dostop preko računalniške mreže in v katerega se shranjujejo rezultati meritev. Za vsak pomerjeni motor se ustvari nova tekstovna datoteka, v katero so vpisani rezultati meritev, številka palete in glava datoteke. Program IndaPrenos vsako novo datoteko preko računalniške mreže prebere in izbriše iz direktorija.

Delovni nalog	Status meritve	Datum in čas meritve	Serijska številka motorja	Delovna postaja	Šifra merilca	Status motorja
564328	0	26.5.2008 16:28:13	00292451A1000644707	RNO6	4732	NOK

Tabela 6: Glava datoteke z rezultati

Glava tekstovne datoteke je za vse merilne sisteme enaka (primer v tabeli 6). Sledijo rezultati meritev (ločeni s podpičji), številka palete in dvajset praznih mest za rezervo. Število rezultatov meritev je odvisno od merilne postaje, vendar je vnaprej predpisano. V primeru, da število vnosov vključno s praznimi mesti ni enako predpisanim, se rezultati ne shranijo v bazo in program IndaPrenos javi napako.

2.6 Delovni nalog

Delovni nalog vpiše vodja proizvodnje v tekstovno datoteko na strežniku, do katere imajo dostop preko računalniške mreže vsi merilni sistemi na liniji (postaje od 2 do 5). Vsak merilni sistem pred začetkom meritve prebere delovni nalog in ga vpiše v glavo datoteke z rezultati meritev.

2.7 Status meritve

Kupec lahko za določen motor ali serijo zahteva ponovno meritev določenih parametrov. V ta namen ima vsak merilni sistem možnost izbire statusa meritve; status 0 za serijsko meritev ali status 1 za testno meritev. Rezultati testnih meritev so shranjeni na strežniku, a se ne vpišejo v bazo za analizo podatkov z rezultati serijskih meritev.

2.8 Branje nosilca podatkov in tiskanje nalepke

Zadnja postaja je namenjena branju in izbrisu nosilca podatkov. Prebere se, če so bile meritve izvedene in ali je kos glede na posamezno meritev dober ali slab. Glede na status meritev se z brizgalnim (ang.: inkjet) tiskalnikom natisne ustrezen znak na nalepko s serijsko številko na ploščici za kontaktiranje. V tabeli 7 so prikazani natisnjeni znaki na nalepki po končanih meritvah za dober kos in ob napakah.

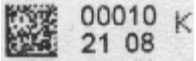
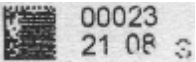
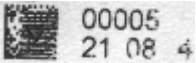
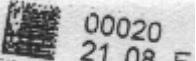
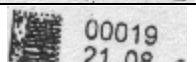
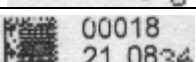
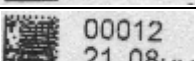
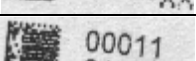
Status	Znak na nalepki	Slika
vse meritve izvedene in na vseh postajah kos dober	K	
napaka na meritvi ali kos slab MRI3	3	
napaka na meritvi ali kos slab VIB4	4	
napaka na meritvi ali kos slab HBF5	5	
napaka na meritvi ali kos slab RNO6	6	
napaka na meritvi ali kos slab na MRI3 in VIB4	34	
napaka na meritvah ali kos slab na treh merilnih mestih	XX	
napaka na meritvah ali kos slab na vseh merilnih mestih	99	

Tabela 7: Primeri natisnjenih znakov na nalepki po končanih meritvah

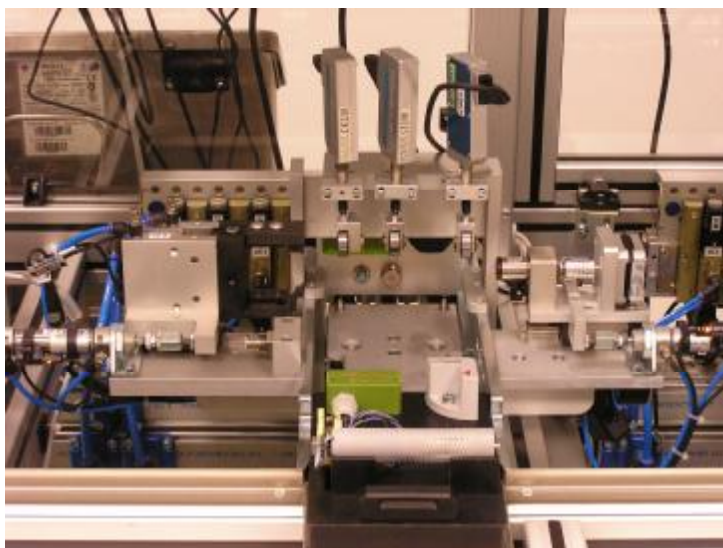
Znak **K** označuje dober kos in izvedene meritve na vseh merilnih mestih. V primeru napake ali slabega kosa na dveh merilnih postajah se pojavi kombinacija dveh števil merilnih mest na katerih je kos slab. Napako na poljubnih treh merilnih mestih določa znak **XX**, napako na vseh merilnih mestih pa znak **99**.

Dobri kosi gredo v paleto za embaliranje, slabi kosi pa se vložijo v poseben predal na liniji (Slika 5). Pri teh kosih se še enkrat ročno izvedejo meritve in analizirajo napake.

3 Strojna oprema

Strojna oprema, uporabljena za izvedbo obravnavanega sistema, je prikazana na sliki 10. Sestoji iz:

- sistema za vpenjanje v in izpenjanje motorja iz merilne priprave,
- treh linearnih merilnikov položaja serije LGF podjetja Mitutoyo [12],
- dveh števecv za priklop linearnih merilnikov serije EF podjetja Mitutoyo [12],
- krmilja koračnega motorja in koračnega motorja ST4209X1004 proizvajalca Nanotec [13],
- optičnega prekinjalnika GP1A51HRJ00F podjetja Sharp [14],
- osebnega računalnika,
- procesorja BIS C-6027 [6] in bralno/pisalne glave BIS C-326-05 [11].



a)



b)



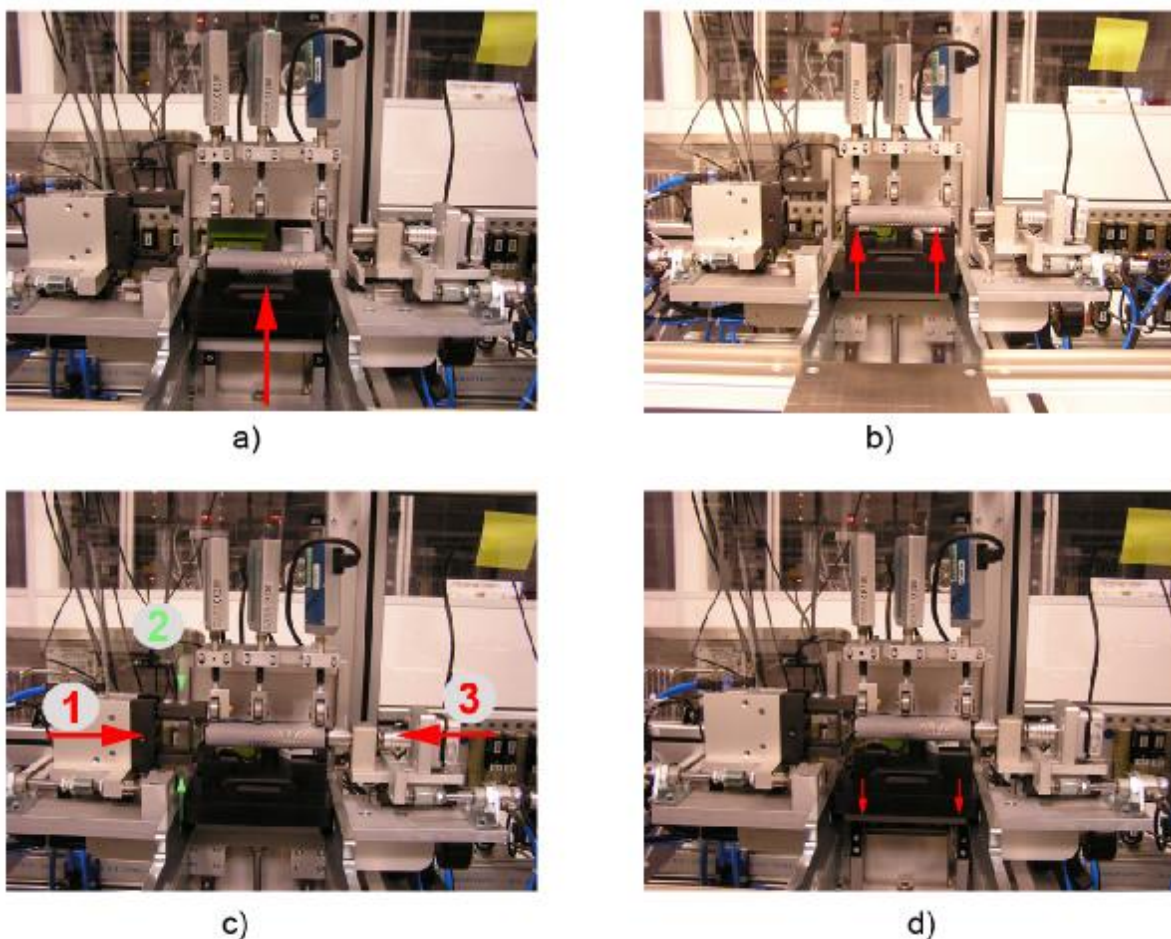
c)

Slika 10: Strojna oprema sistema za merjenje ovalnosti – a) priprava za vpetje, b) krmilnik koračnega motorja in c) števec za priklop linearnih merilnikov

Sistem za vpenjanje in izpenjanje motorja v merilno pripravo, krmilje vpenjanja, koračni motor in vpetje linearnih merilnikov položaja je že montiralo na linijo podjetje Hypex d.o.o. Potrebno je bilo povezati krmilje koračnega motorja s koračnim motorjem in pritrditi optični prekinjalnik za zaznavanje začetnega kota osi vpetja.

3.1 Vpetje motorja

Vpenjanje motorja je realizirano s pnevmatskimi aktuatorji, krmiljenimi s PLC. Potek vpenjanja je prikazan na sliki 11.



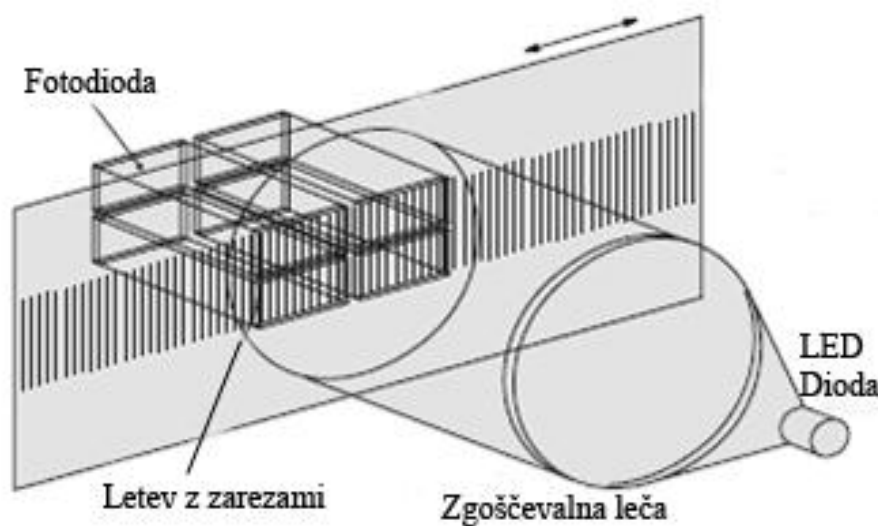
Slika 11: Potek vpenjanja motorja v merilno napravo

Operater potisne paleto z motorjem v napravo za vpenjanje (slika 11a). Pri tem se induktivno stikalo sklence in PLC dobi signal za začetek vpenjanja motorja. Pladenj z dvigom palete sklence kontakte palete s kontakti na merilni pripravi in nosilec podatkov [10] pride v doseg bralno/pisalne glave [11]; vilice dvignejo motor nad paleto (slika 11b). Vpetje na levi strani se pomakne k motorju (slika 11c - 1) in stisne

ploščico za kontaktiranje (slika 11c - 2) nato glava koračnega motorja stisne rotor (slika 11c - 3). Proces vpenjanja je končan, ko se vilice spustijo v prvotno lego (slika 11d).

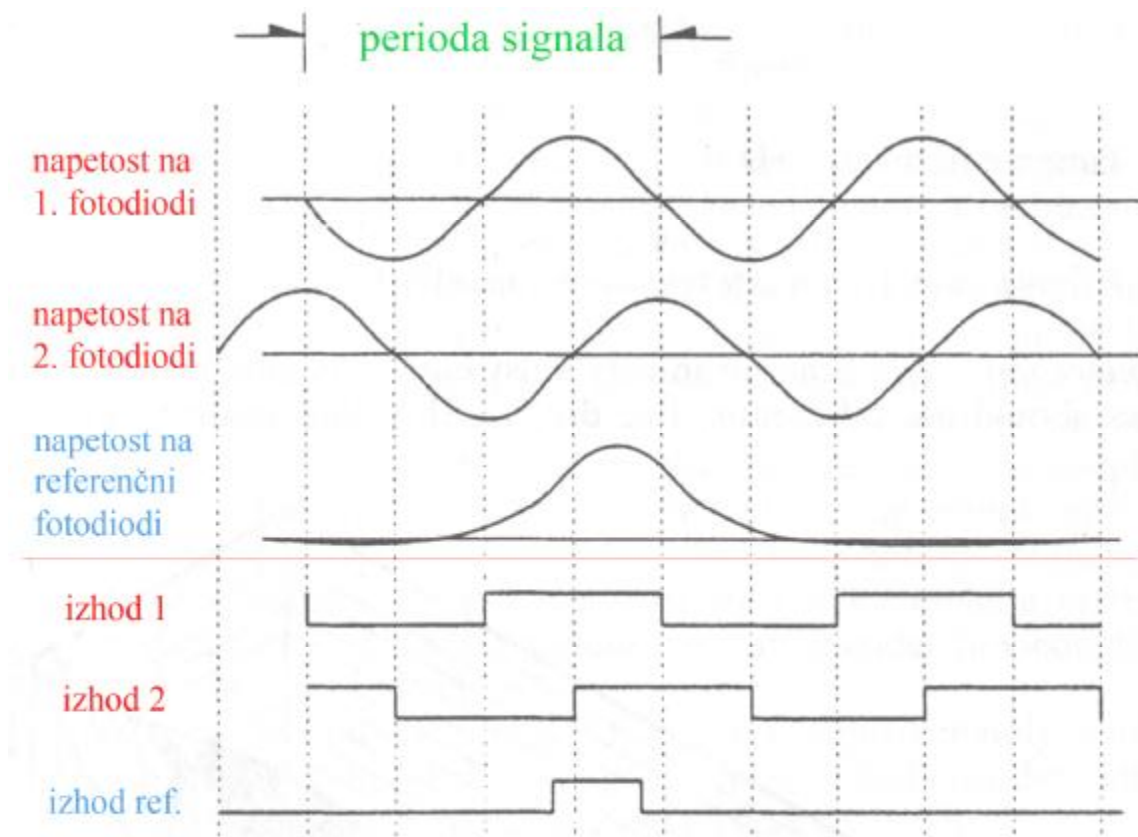
3.2 Linearni merilniki položaja

Linearni merilniki položaja delujejo na principu fotoelektričnega linearnega enkoderja s pravokotnimi napetostnimi pulzi na izhodu. Enkoder je sestavljen iz svetlobnega vira (LED dioda), zgoščevalne leče, fotodiode, letvice z zarezi in vezja za obdelavo izhodnih signalov [2]. Princip delovanja je prikazan na sliki 12.



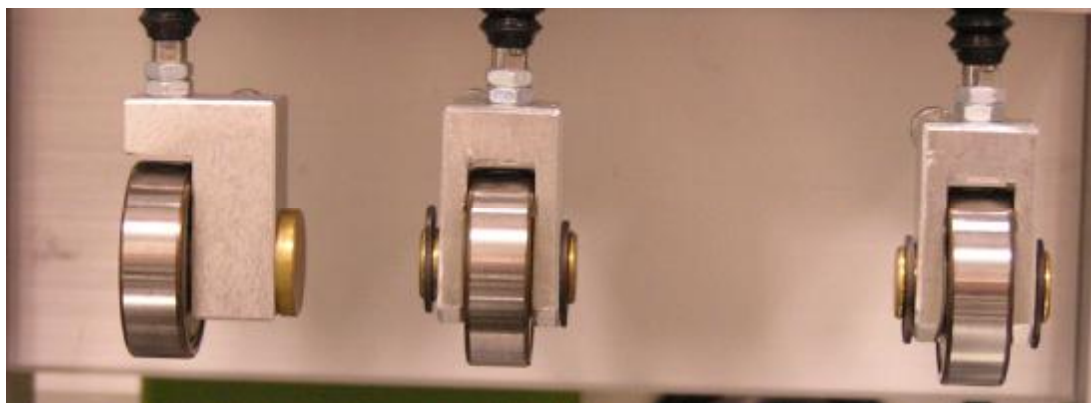
Slika 12: Princip delovanja fotoelektričnega linearnega enkoderja (povzeto iz [12])

Zgoščevalna leča usmeri in zmanjša razpršenost svetlobe LED diode. S premikanjem letve z zarezi in presledki enake širine se sinusno spreminja osvetljenost in posledično napetostni izhod fotodiode. Izhodno vezje sinusni signal pretvori v vlak napetostnih pulzov z delovnim ciklom 50 %. Za zaznavanje smeri pomika letve sta uporabljeni dve fotodiodi, zamaknjeni glede na zareze na letvi za 1/2 širine zareze. Zamik položaja fotodiod povzroči fazni zamik izhodnih signalov za 90° (slika 13), smer pomika letve pa določa prehitevajoči signal. Pogosto je dodan referenčni signal, dodatna fotodioda in zareza na letvi, s katerim določimo absolutno pozicijo merilnika. Pulz referenčnega signala resetira števec pulzov izhodov 1 in 2. Za merilni sistem so uporabljeni trije linearni merilniki LGF 542-124 [12] z natančnostjo 1 μm , delovnim pomikom 10 mm in referenčnim signalom.



Slika 13: Izhodi fotodiod in linearnega merilnika (povzeto iz [2])

Kroglični ležaj na kontaktni glavi linearnega merilnika položaja s premerom 3 mm je preozek za meritve ovalnosti neravne površine rotorja – na nekaterih delih bi bile merjene brazde na površini, ne pa celoten premer rotorja. V ta namen so bile izdelane tri glave širine 7 mm z ležaji (slika 14) za montažo na linearne merilnike položaja.



Slika 14: Glava na linearnem merilniku položaja

Za obdelavo signalov linearnih merilnikov sta uporabljena dva števca serije EF proizvajalca Mitutoyo [12], vsak z možnostjo priključitve dveh linearnih merilnikov položaja. Števca sta med seboj zaporedno povezana preko RS povezave [12], z osebnim računalnikom pa je preko serijskega (RS-232) vodila povezan le en števec. RS povezava omogoča enostavno pridobivanje meritev merilnih letev, saj se na zunaj oba števca obnašata kot ena naprava s štirimi vhodi za linearne merilnike položaja.

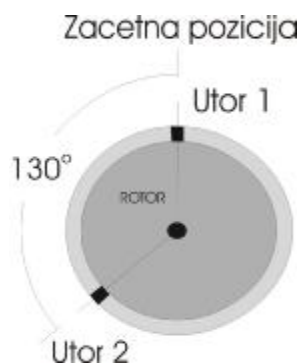
3.3 Koračni motor

Koračni motor električni pulz na vhodu pretvori v premik osi za kot, določen z zgradbo motorja. Za premik osi za določen kot ni potrebna povratna povezava; izvedba sistema je cenejša, ker ne zahteva zaznavanja kota premika (enkoderja).

Glede na zahteve, ki določajo merjenje rotorja motorja vsakih $18^\circ \pm 2^\circ$ znotraj obrata, je za obračanje merjenega motorja izbran bipolarni koračni motor ST4209X1004 proizvajalca Nanotec [13]. Motor s 400 koraki na obrat, oziroma kotom $0,9^\circ$ na korak, nudi zadostno natančnost nastavitve kota glede na zahteve.

3.4 Nastavitev začetnega kota merjenja pri merjenju

Pred merjenjem se nastavitev začetnega kota merjenja zagotovi z optičnim prekinjalnikom GP1S092HCPI proizvajalca Sharp [15] na samem motorju, kar nam olajša izvedbo merilnega sistema. Položaj utorov na rotorju in začetni kot merjenja prikazuje slika 15.



Slika 15: Položaj utorov na rotorju in začetna pozicija merjenja

Koračni motor z opravljenimi dvajsetimi koraki premakne rotor za 18° v nov položaj za merjenje.

3.5 Umerjanje

Merilni sistem se umerja z aluminijastim kalibrom (slika 16) s premerom $22\text{ mm} \pm 0,005\text{ mm}$. Kaliber je sestavljen iz identičnih ležajev kot merjeni motorji.

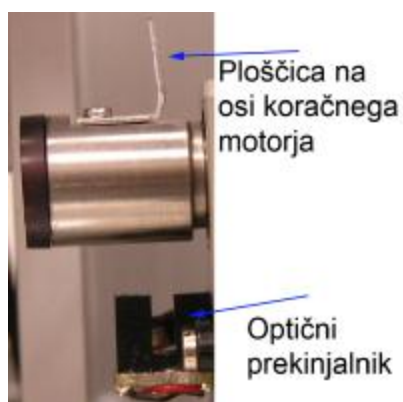


Slika 16: Aluminijasti kaliber

Sprva je bilo umerjanje neodvisno od kota zasuka koračnega motorja, vendar se je izkazalo, da je ponovljivost umerjanja izven območja 10 % predpisanega odstopanja ovalnosti motorja. Razlog za preveliko odstopanje napak ponovljivosti je opletanje osi vpetja zaradi zračnosti ležajev.

Ugotovljeno je, da je opletanje osi vpetja pri enakih kotih ponovljivo. Zato se za korekcijo te napake rezultat meritve motorja primerja z rezultatom umerjanja kalibra pri istem kotu in vpliv opletanja osi vpetja se izniči.

Za določanje absolutnega položaja osi vpetja potrebujemo referenčno točko znotraj enega obrata, kar realiziramo z optičnim prekinjalnikom GP1A51HRJ00F podjetja Sharp [14], montiranim na stojalo koračnega motorja (slika 17). Kovinska ploščica, montirana na osi motorja, prekine optični prekinjalnik enkrat na obrat motorja.

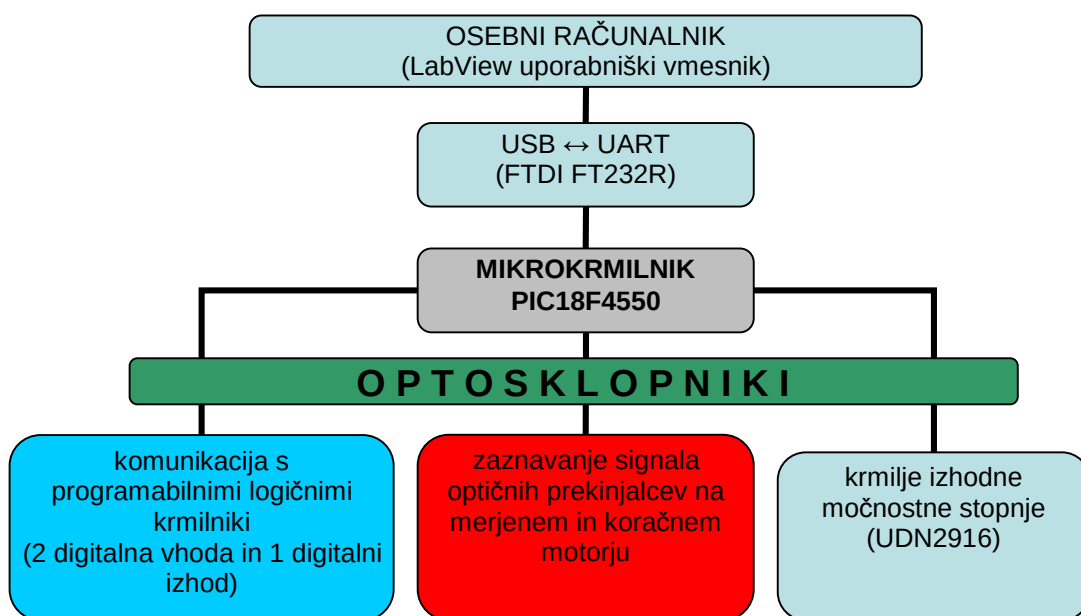


Slika 17: Optični prekinjalnik na stojalu koračnega motorja

3.6 Krmilje koračnega motorja

Krmilje koračnega motorja opravlja več funkcij, bločna shema krmilja koračnega motorja je prikazana na sliki 18:

- komunikacija z osebnim računalnikom,
- komunikacija s programabilnimi logičnimi krmilniki,
- zaznavanje signalov optičnih prekinjalnikov na merjenem in koračnem motorju,
- vodenje koračnega motorja.



Slika 18: Bločna shema krmilja koračnega motorja

Krmilje zahteva dva nivoja napajalne napetosti; 12 V za koračni motor in komunikacijo s PLC ter 5 V za mikrokrmilnik, optična prekinjala ter logične vhode močnostne stopnje.

Mikrokrmilnik je napajan z USB napetostnim virom (5 V). Višji napetostni nivo (12 V) močnostne izhodne stopnje in komunikacije s programabilnimi logičnimi krmilniki ter možnost napetostnih nihanj pri vodenju koračnega motorja lahko privede do reinicializacije [16] ali celo okvare mikrokrmilnika ali osebnega računalnika. Kratek stik na optičnem prekinjalniku merjenega motorja bi preobremenil USB napajalni vir in povzročil napako v delovanju krmilja. Zaradi zaščite so vse povezave

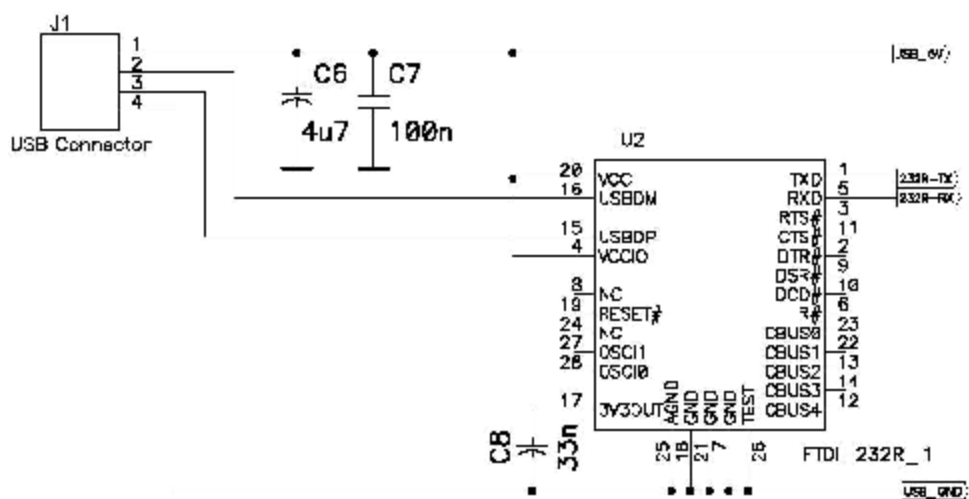
mikrokrmilnika s PLK, optičnima prekinjalnikoma in izhodno močnostno stopnjo galvansko ločene z optičnimi sklopniki.

3.6.1 Pretvorba USB ↔ UART

Serijska komunikacija v današnjih splošno namenskih osebnih računalnikih izginja. Mikrokrmilnik PIC18F4550 ima možnost USB priklopa, vendar je bil zaradi enostavnejšega programiranja tako mikrokrmilnika kot tudi uporabniškega vmesnika na osebnem računalniku izbran USB <-> UART pretvornik FT232R proizvajalca FTDI [17].

Pri uporabi mikrokrmilnikovih USB vrat je potrebno poglobljeno znanje USB protokola, saj gonilniki za USB komunikacijo z mikrokrmilniki v okolju LabView ne obstajajo. Poleg tega je na mikrokrmilniški strani izvedba s serijsko komunikacijo enostavnejša. Gonilnik in knjižnica z ukazi za različna programska okolja (C++, LabView, Delphi, ...) za pretvornik FT232R sta prosto dostopna na proizvajalčevi spletni strani.

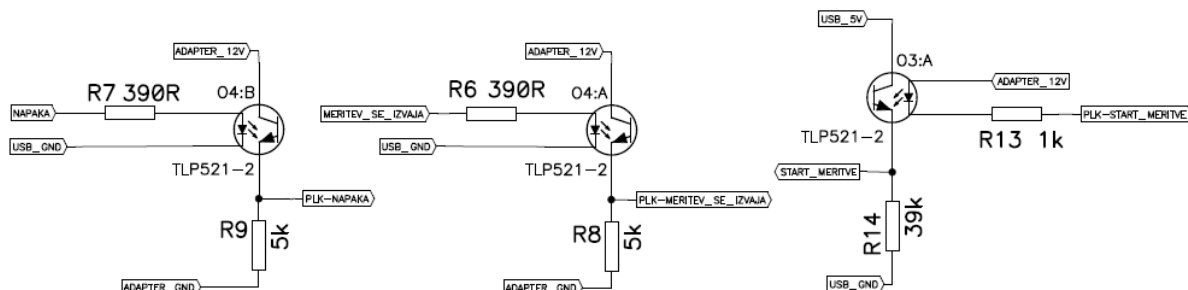
Uporaba integriranega vezja FT232R je enostavna in ne zahteva veliko dodatnih elementov, kar nam prikazuje slika 19.



Slika 19: Vezava pretvornika FT232R

3.6.2 Komunikacija s programabilnimi logičnimi krmilniki

Merilni sistem je del celotne linije za izhodno kontrolo in ne krmili vpenjanja/izpenjanja, zato je potrebna komunikacija s programabilnimi logičnimi krmilniki.



Slika 20: Shema vezave optosklopnikov za komunikacijo s programabilnimi logičnimi krmilniki

Uporabljeni optosklopniki TLP521 [18] proizvajalca Toshiba imajo tokovno ojačenje (ang.: current transfer ratio – CTR) do 600 % in čas preklopa 25 μ s. Izhodni NPN tranzistorji optosklopnikov delujejo v načinu emitorski sledilnik [16]. V primeru izključenega USB vodila sta stanji izhodov za napako in statusa izvajanja meritve nizka; začetek vpenjanja motorja v tem primeru ni možen.

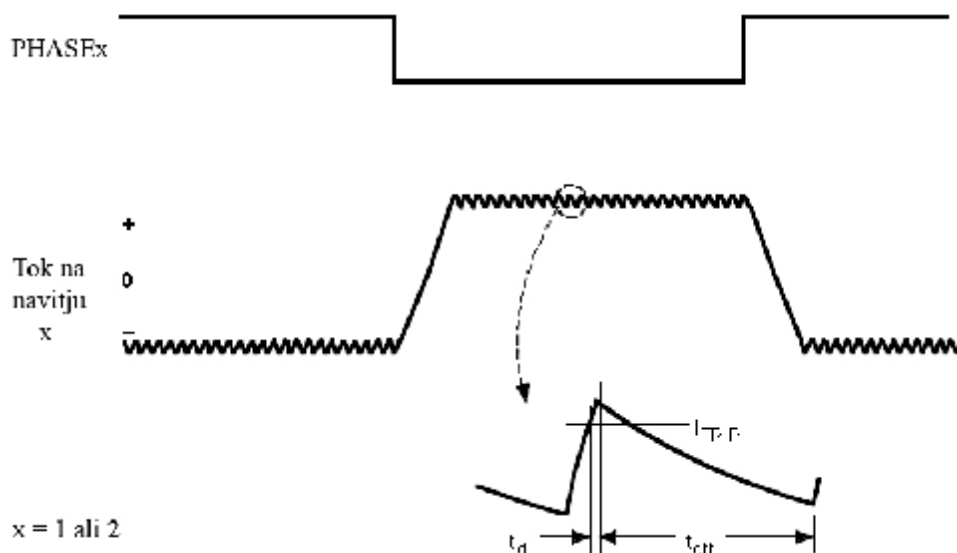
3.6.3 Izhodna močnostna stopnja

Za izhodno močnostno stopnjo je izbrano integrirano vezje UDN2916 proizvajalca Allegro, ki omogoča poganjanje bipolarnih koračnih motorjev s pulzno širinsko modulacijo toka na navitjih (ang.: chopper drive). Integrirano vezje ima integrirana 2 tranzistorska H-mostička z zmogljivostjo 750 mA pri napetosti 45 V.

Slika 22 prikazuje potek pulzno širinsko moduliranega toka na enem navitju koračnega motorja. Tok I_{trip} izračunamo z enačbo 1.

$$I_{trip} = \frac{V_{ref}}{10R_s} \quad (1)$$

R_s upor določimo pri načrtovanju vezja; v našem primeru ga predstavljata R18 za prvo fazo in R19 za drugo fazo (slika 22). Ta upor je vstavljen med maso in spodnjo vejo H-mostička. Napetost na uporih je odvisna od toka na navitju motorja in se s primerjalnikom primerja z referenčno napetostjo, ki je v vezju na sliki 22 nastavljiva s trimmerjem TRIM1 od 0 V do 5 V. Pri upornosti $R_s = 2,7 \Omega$ je tokovno območje, izračunano s pomočjo enačbe 1, nastavljivo od 0 mA do 185 mA.

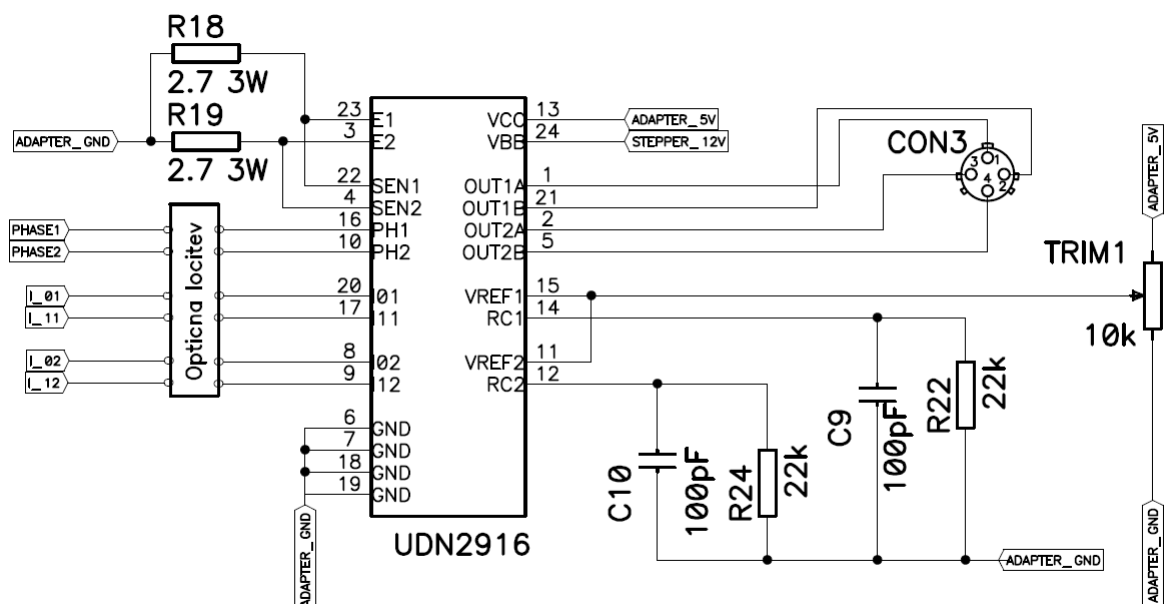


Slika 21: Tok na navitju koračnega motorja (povzeto iz [19])

H-mostiček, po zakasnitvi t_d (tipično $2 \mu s$ [19]) prekine vzbujanje navitja, ko napetost na upor R_s preseže referenčno napetost. Tok na navitju začne upadati, pri čemer čas upadanja toka t_{off} nastavimo z uporom R_{off} (R22 in R24) ter kondenzatorjem C_{off} (C9 in C10) glede na enačbo 2.

$$t_{off} = R_{off} C_{off} \quad (2)$$

Po preteku časa t_{off} je navitje spet vzbuja in cikel se ponovi. Glede na izbrane komponente in enačbo 2 je čas izklopa nastavljen na $2,2 \mu s$.



Slika 22: Shema vezave UDN2916

Za krmiljenje motorja ima UDN2916 po tri vhode za vsako fazo motorja, funkcije vhodov za fazo x (x = 1 ali 2) prikazuje tabela 8.

PHx	OUTxA	OUTxB
visok	visok	nizek
nizek	nizek	visok

I_{0x}	I_{1x}	Izhodni tok
nizek	nizek	I_{trip}
visok	nizek	$2/3 I_{trip}$
nizek	visok	$1/3 I_{trip}$
visok	visok	0

Tabela 8: Funkcije vhodov UDN2916 za eno fazo

Z vhodom PHx krmilimo smer toka na navitju in z I_{0x} in I_{1x} določimo nivo toka na navitju. Ta lastnost nam omogoča krmiljenje koračnega motorja s polnim, polovičnim ali četrtinskim korakom.

	PH1	I_{01}	I_{11}	PH2	I_{02}	I_{12}
1. korak	0	0	0	0	0	0
2. korak	1	0	0	0	0	0
3. korak	1	0	0	1	0	0
4. korak	0	0	0	1	0	0

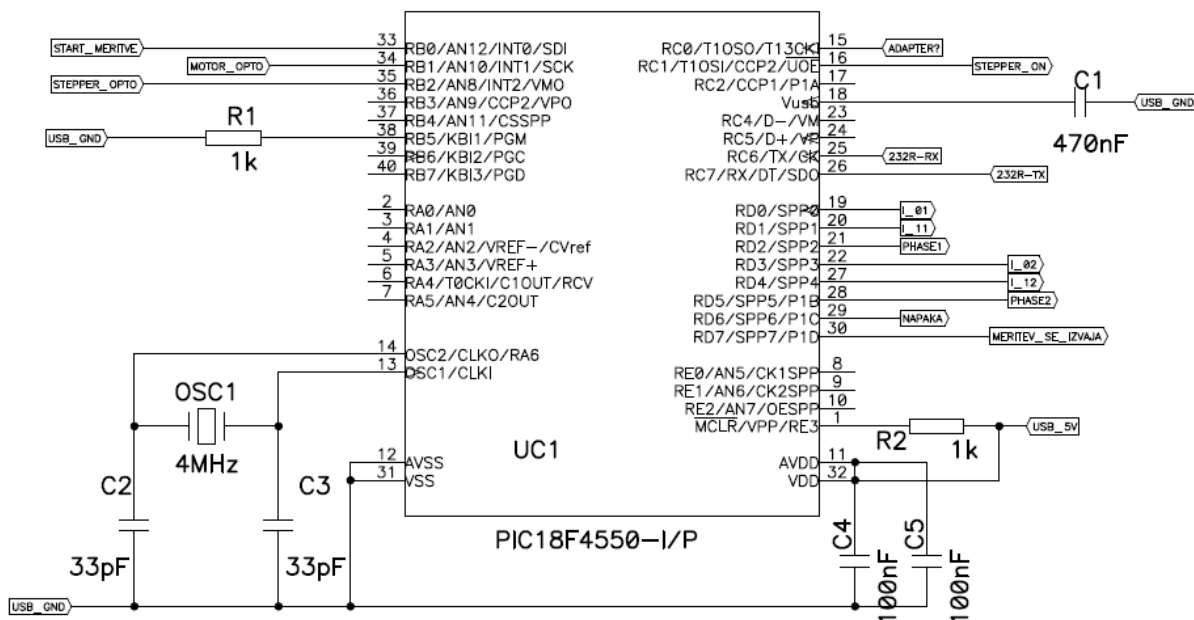
Tabela 9: Stanje vhodov UDN2916 za eno periodo korakanja

Za potrebe merilnega sistema je dovolj polni korak, saj s 400 polnimi koraki na obrat že dosežemo predpisano natančnost nastavitve kota. Nastavitev vhodov UDN2916 za eno periodo korakanja prikazuje tabela 9.

3.6.4 Mikrokrmilnik

Srce krmilja koračnega motorja predstavlja mikrokrmilnik PIC18F4550 [20] proizvajalca Microchip. Le-ta je 8 bitni mikrokrmilnik z 32k zlogi FLASH pomnilnika, 2k zlogi SRAM pomnilnika, 256 zlogi EEPROM pomnilnika in z delovnim taktom do 48 MHz. Pomembnejše funkcije mikrokrmilnika, prikazanega na sliki 23, so:

- USB vrata,
- 35 vhodno / izhodnih priključkov,
- 13 analogno / digitalnih kanalov,
- 2 napetostna primerjalnika,
- univerzalni asinhroni / sinhroni sprejemnik in oddajnik (USART),
- 1 zajemalni / primerjalni modul,
- časovniki,
- trije zunanji prekinitveni priključki.



Slika 23: Vezje z mikrokrmilnikom PIC18F4550

PIC18F4550 je izbran, ker je sprva krmilje temeljilo na sistemu eProDas [21], ki omogoča enostaven dostop do funkcij mikrokrmilnika preko USB vrat. Slabost sistema je, da funkcijo krmilja opravlja osebni računalnik; za vsak korak koračnega motorja ali preverjanje stanja optičnih prekinjalnikov je potrebno poslati ukaz mikrokrmilniku, zato zaradi nedoločljivih zakasnitev pri delovanju uporabniškega vmesnika in pošiljanju USB paketov, delovanje ni možno v realnem času. Najkrajši, z osciloskopom izmerjeni čas med dvema zaporednima ukazoma, je 20 ms, kar postane problem pri velikem številu ukazov, potrebnih za eno meritve.

Sprva je bil za obračanje merjenega motorja uporabljen koračni motor KMP35T-48P podjetja Iskra Mehanizmi d.d. z 48 koraki / obrat. Za en obrat osi je potrebno poslati 48 ukazov in minimalni čas enega obrata osi motorja je 960 ms; ta čas se pri uporabi 400 koračnega motorja podaljša na 8 s. Glede na zahtevani čas trajanja ene meritve (40 s) je to nesprejemljivo.

Krmilju je dodan FT232R in izvorna koda prilagojena funkciji merilnega sistema. V tem primeru je čas izvajanja določen s taktom ure mikrokrmilnika in določljiv. Mikrokrmilnik vodi motor in spremlja stanje optičnih prekinjalnikov, zato je možno z enim ukazom premakniti motor v nov položaj za poljubno število korakov in istočasno preveriti / nastaviti stanje vnaprej določenih vhodnih / izhodnih priključkov. Čas med dvema zaporednima korakoma koračnega motorja je nastavljen na 2 ms (800 ms / obrat). Daljši čas bi pomenil daljše izvajanje meritve, krajši čas oz. večja hitrost osi koračnega motorja pa povzroči zdrsavanje merjenega motorja pri ustavljanju pred vsako meritvijo.

Šest izhodnih priključkov (RD0 – RD5) je uporabljenih za vodenje koračnega motorja. Krmilje na vhodnem priključku RC0 preverja prisotnost napajalne napetosti koračnega motorja in z izhodnim priključkom RC1 pred začetkom testa vključi napajalno napetost preko p-kanalnega MOSFET tranzistorja. Dva izhoda sta uporabljena za indikacijo stanja meritve programabilnemu logičnemu krmilniku; RD6 za napako in RD7 za indikacijo izvajanja meritve. Uporabljeni so vsi trije zunanji prekinitveni priključki - optični prekinjalnik merjenega (INT1) in koračnega (INT2) motorja ter začetek izvajanja meritve (INT0).

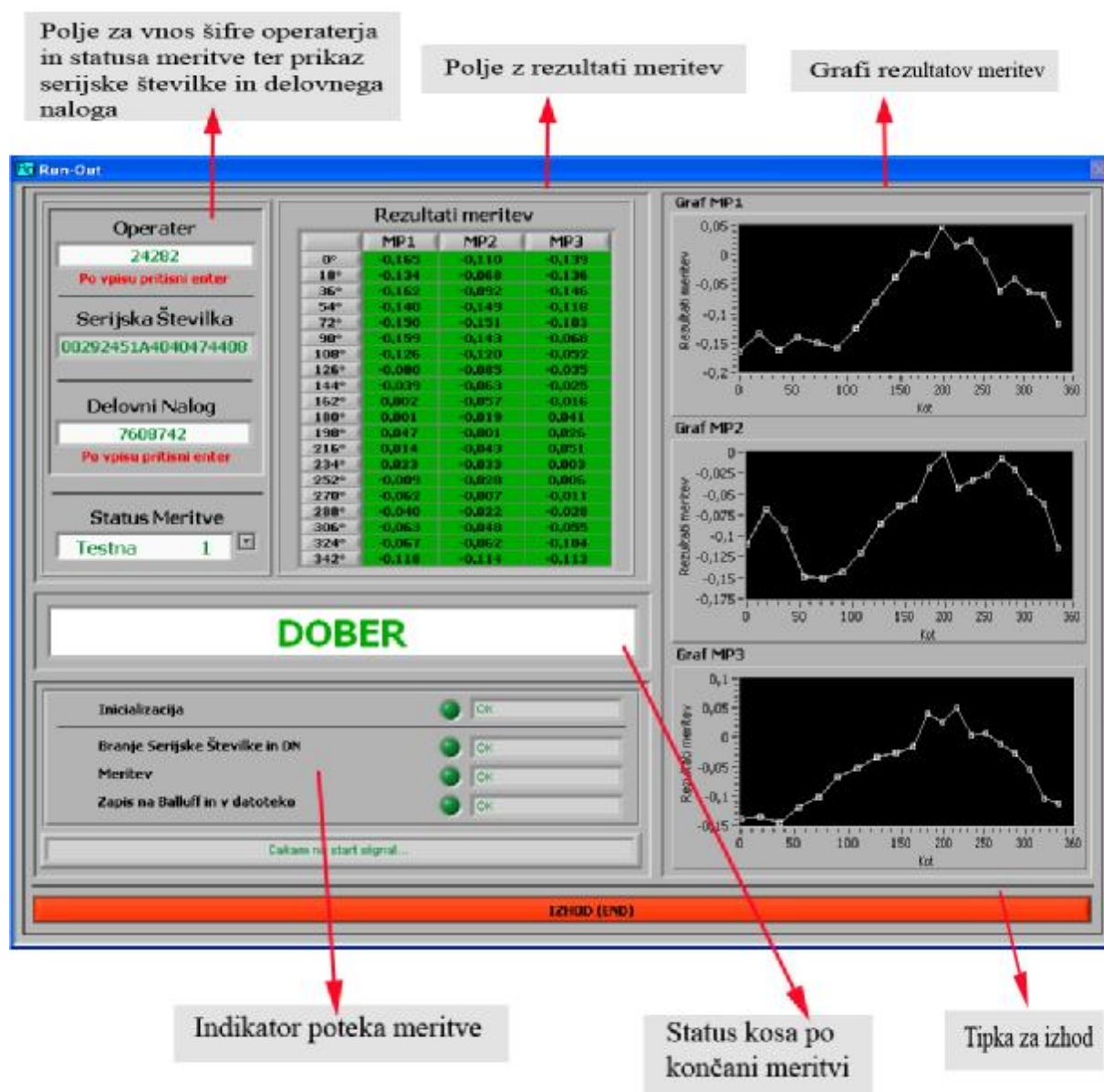
Prekinitiv v primeru preliva registra TMR0 časovnika 0 služi za vodenje koračnega motorja; v prekinitveni rutini se spremeni stanje izhodnih priključkov RD0 – RD5 za en korak glede na Tabelo 9 in os koračnega motorja se zavrti za en korak.

Časovnik 1 je namenjen časovnemu pazniku (ang.: watchdog), ki ga omogočimo pred začetkom vsake meritve. V prekinitvi preliva registra TMR1 vsakih 10 ms se števec prekinitiv poveča za 1 in ko števec preseže vrednost 500 (5 s), se sproži rutina časovnega paznika. Vsaka prejeta zahteva osebnega računalnika reinicializira števec prekinitiv na 0. Časovni paznik je uporabljen za primer napake uporabniškega vmesnika ali operacijskega sistema na osebem računalniku; merjeni motor bi ostal v vpetju. Z uporabo časovnega paznika se temu izognemo; po izteku časa mikrokontroler sporoči programabilnem logičnem krmilniku napako v meritvi in se postavi v stanje pred začetkom meritve.

Za komunikacijo z osebnim računalnikom je uporabljen univerzalni asinhroni / sinhroni sprejemnik in oddajnik.

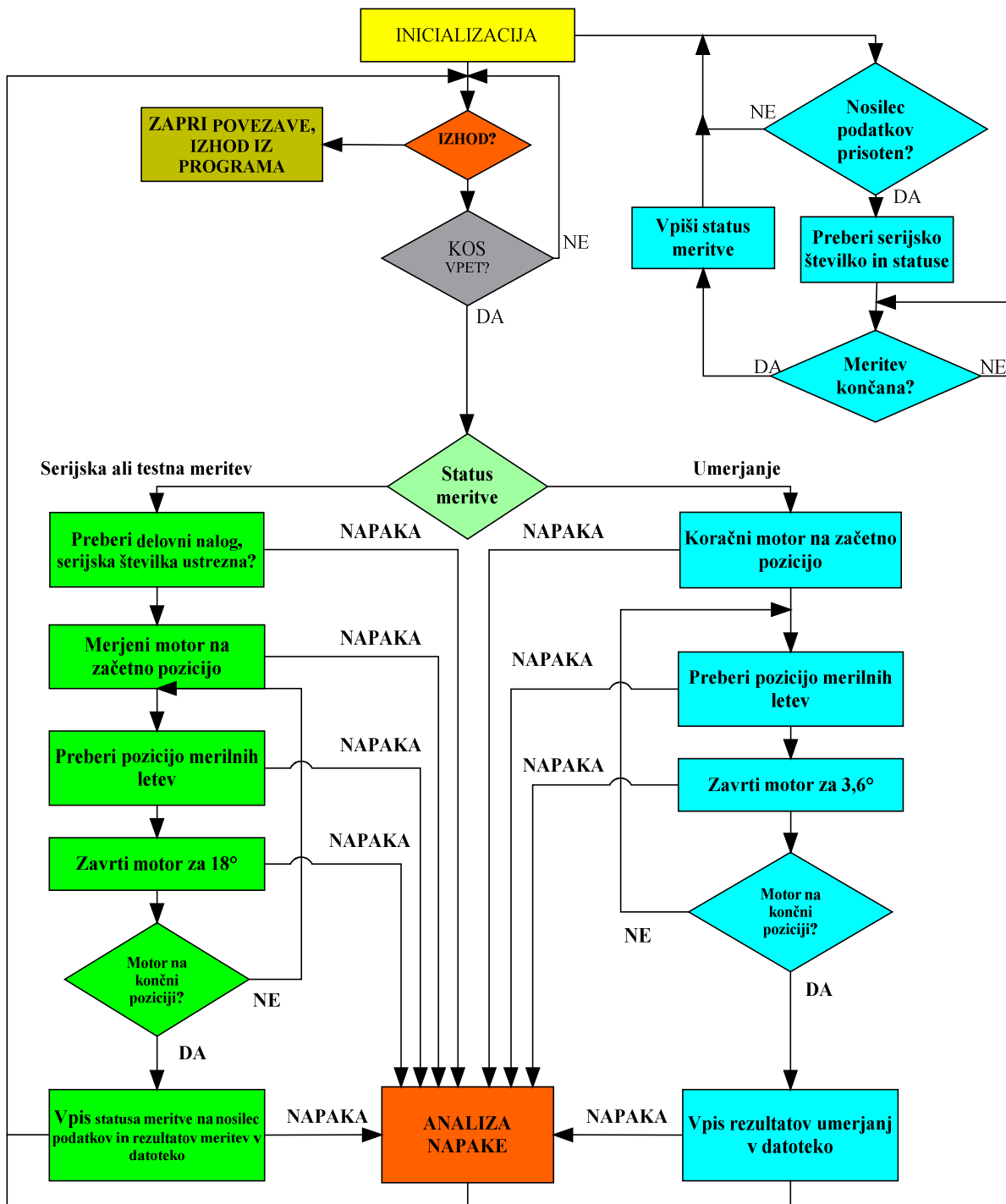
4 Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik, prikazan na sliki 24, temelji na programskem okolju LabView (proizvajalca National Instruments) [22] namenjenem grafičnemu programiranju. Okolje LabView se uporablja pri zajemu podatkov, programski izdelavi virtualnih inštrumentov in industrijski avtomatizaciji.



Slika 24: Uporabniški vmesnik

V grobem je uporabniški vmesnik sestavljen iz treh delov. En del služi za prikaz serijske številke motorja in delovnega naloga ter za vnos statusa meritve in šifre operaterja.



Slika 25: Diagram poteka programa

Drugi del zajema prikaz rezultatov meritev in grafe rezultatov meritev za vse merilnike po vseh kotih (merilni podatki). Tretji del predstavlja indikacijo poteka meritve; pri vsaki meritvi sporoči merilcu v katerem stanju se nahaja merilni sistem in ali je prišlo do napake. Ta del je pomemben za razpoznavanje in hitro odpravljanje napak na merilnem sistemu.

Potek delovanja programa prikazuje diagram poteka na sliki 25.

4.1 Inicializacija strojne opreme

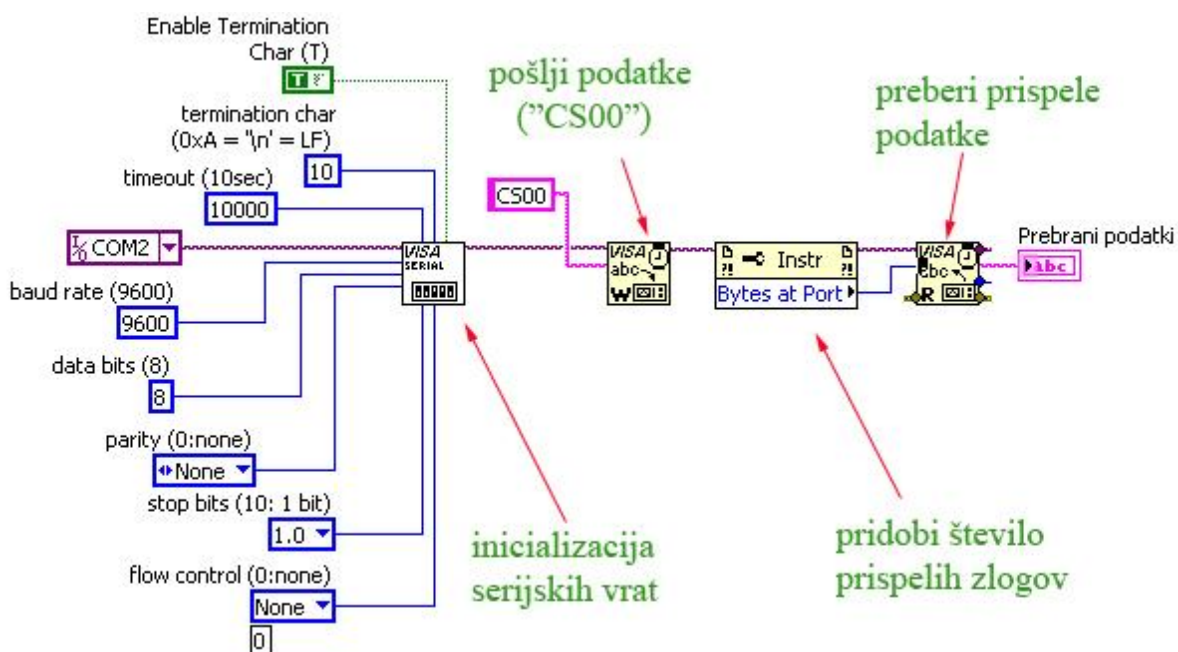
Pri zagonu programa je potrebno preveriti, če je strojna oprema priključena in delujoča. V ta namen se inicializira krmilnik koračnega motorja, števcu linearnih merilnikov položaja in procesna enota Balluff.

4.1.1 Inicializacija procesne enote Balluff

Komunikacija s procesno enoto poteka preko protokola TCP/IP. Inicializacija se izvrši na začetku in v primeru napake je potreben izhod iz programa.

4.1.2 Inicializacija linearnih merilnikov položaja

Do linearnih merilnikov položaja dostopamo preko serijskih vrat RS-232 (slika 26). S prvim blokom na levi inicializiramo serijska vrata; v blok povežemo vrednosti parametrov, potrebnih za pravilno delovanje komunikacije z določeno priključeno napravo. Z blokom za pošiljanje pošljemo podatke oddaljeni napravi; v primeru na Slika 26 pošljemo zahtevo za reinicializacijo napake vseh merilnih letcev (»CS00«). Merilne letve so priključene, če dobimo odgovor »CH00« (tabela 10) z blokom za branje prispelih podatkov. Pri inicializaciji merilnikov prazen niz prispelih podatkov pomeni napako v komunikaciji in program zahteva od uporabnika naj preveri napajanje in povezavo števcov z osebni računalnikom, obenem pa zahteva vnos prave številke serijskih vrat, na katera so priključeni števci.



Slika 26: Inicializacija serijskih vrat v LabView

Zahteve in pripadajoči odgovori števecv merilnih letev, uporabljene v merilnem sistemu, so zbrani v tabeli 10. Zahteva in odgovor sta predstavljena kot niz ASCII znakov. Števci imajo možnost prikaza trenutne, maksimalne in minimalne vrednosti merilnih letev – način prikaza lahko nastavljamo s tipkami na števcu ali preko serijskega vodila. Lahko se zgodi, da merilec s tipkami spremeni način prikaza med samo meritvijo (števcu nimajo možnosti zaklenitve tipk) in rezultati meritev so napačni. V izogib temu program pred vsakim branjem vrednosti merilnih letev prikaz nastavi na trenutno vrednost.

ZAHTEVA	ODGOVOR	OPIS
GA**CRLF	G#**, +01234.567CRLF	izpis vrednosti trenutnega prikaza na števcu za merilno letve ** (** = 01 - 99)
CN**CRLF	CH**CRLF	postavi prikaz rezultata merilne letve ** (** = 01 - 99 ali 00 - vse merilne letve) na trenutno vrednost
CS**CRLF	CH**CRLF	resetira napako merilne letve ** (** = 01 - 99 ali 00 - vse merilne letve)

Tabela 10: Uporabljeni ukazi števecv linearnih merilnikov položaja

4.1.3 Inicializacija krmilnika koračnega motorja

Pretvornik FT232R omogoča dva načina komunikacije z osebnim računalnikom. Prvi način omogoča klasično serijsko komunikacijo; naprava se obnaša kot navidezna serijska vrata. Slabost tega je, da naprava na različnih računalnikih pri priklopu zavzame poljubno številko serijskih vrat. V ta namen bi bilo potrebno v program vključiti rutino vnosa nove številke serijskih vrat, če komunikacija na privzeti številki ne bi delovala. Z vidika programiranja je boljši drugi način, ki omogoča dostop do USB naprave preko DLL (ang.: dynamic link library) funkcij. FT232R ima integriran EEPROM, ki omogoča nastavljanje nekaterih parametrov integriranega vezja; nastavitve so dostopne z aplikacijo MProg proizvajalca FTDI. Eden izmed nastavljivih parametrov je opis naprave, v krmilniku koračnega motorja nastavljen na »Run-Out«. Pri inicializaciji s pomočjo DLL funkcije poiščemo priključeno napravo, ki po opisu ustreza krmilniku koračnega motorja.

Hitrost komunikacije je nastavljena na 115.200 bitov na sekundo; način komunikacije je z osmimi podatkovnimi biti, dvema stop bitoma ter brez preverjanja paritete.

4.2 Zahtevani vnosi merilca

Pri zagonu programa in pred začetkom meritev je potrebno vpisati šifro merilca. Šifra se shrani v bazo rezultatov meritev in lahko pomaga pri analizi napak in izboljševanju merilnega sistema (vpliv merilca na merilni sistem).



Slika 27: Vnos statusa meritve

Merilec ima možnost izbrati status meritve preko menuja, prikazanega na sliki 27.

4.3 Komunikacija s krmilnikom koračnega motorja

Zahteve in pripadajoči odgovori krmilnika koračnega motorja so zbrani v tabeli 11.

ZAHTEVA	OPIS
SET01LF	merjeni motor na začetno pozicijo
SET02LF	koračni motor naprej 20 korakov (18°)
SET03LF	koračni motor naprej 4 korake (3,6°)
SET04LF	koračni motor na začetno pozicijo
SET05LF	postavi pin za indikacijo izvajanja meritve v visoko stanje
SET06LF	postavi pin za indikacijo izvajanja meritve v nizko stanje
SET07LF	postavi pin za napako v nizko stanje
SET08LF	časovni paznik omogočen
SET09LF	časovni paznik onemogočen
SET**LF	pridobi stanje krmilnika koračnega motorja (** = 10..99, 00)

ODGOVOR KRMILNIKA, NI NAPAKE
SET OK xx yy ***LF
xx = "IP", po poslani zahtevi SET01 je merjeni motor na začetni poziciji xx = "SP", po poslani zahtevi SET02, SET03 je merjeni motor na končni poziciji xx = " ", merjeni motor še ni dosegel začetne ali končne pozicije
yy = "ST", signal iz PLK za start meritve je nizek (začni meritev) yy = " ", signal iz PLK za start meritve je visok
*** = "SON", absolutna pozicija koračnega motorja še ni znana *** = 000...400, oddaljenost osi koračnega motorja od začetne pozicije v korakih

ODGOVOR KRMILNIKA, NAPAKA
ERROR a,b,c,d,eLF
a = "N", napaka na optičnem prekinjalniku na koračnem motorju a = "F", napaka v komunikaciji z krmilnikom (napaka v okvirju) a = ".", ni napake
b = "O", napaka v komunikaciji z krmilnikom (overrun) b = ".", ni napake
c = "E", časovni paznik se je iztekel c = "S", napaka v komunikaciji z krmilnikom (napačen format zahteve) c = ".", ni napake
d = "N", napaka na optičnem prekinjalniku na merjenem motorju d = ".", ni napake
e = "V", močnostni del krmilnika koračnega motorja ni priključen na napajanje e = ".", ni napake

Tabela 11: Zahteve krmilniku koračnega motorja in pripadajoči odgovori

Krmilniku koračnega motorja pošljemo zahtevo, zaključeno z ASCII znakom LF, za izvršitev določene operacije in krmilnik odgovori s »SET OK xx yy ***LF« ali v primeru napake »ERROR a,b,c,d,eLF«.

Pred začetkom vsake meritve je potrebno dobiti stanje priključka za začetek meritve. Visoko stanje priključka pomeni, da kos ni vpet in po poslani zahtevi za pridobitev stanja krmilnika (»SET00«) dobimo v odgovoru na mestu yy prazen niz »«. Po prehodu priključka v nizko stanje odgovori krmilnika na mestu yy vsebujejo niz »ST«, kar pomeni, da je merjeni motor vpet in pripravljen na meritev.

Z zahtevo »SET01« začnemo iskanje začetne pozicije merjenega motorja in v zanki preverjamo stanje krmilnika koračnega motorja. Mikrokrmilnik najprej motor zavrti do optičnega prekinjalnika koračnega motorja, da inicializira števec korakov. Pred inicializacijo števca korakov, odgovori na mestu *** vsebujejo niz »SON«. V trenutku prehoda ploščice mimo optičnega prekinjala, odgovori na mestu *** vsebujejo vrednost števca korakov, ki pomeni oddaljenost osi od optičnega prekinjalnika po kotu ($1 \text{ korak} = 0,9^\circ$). V kolikor po 420 korakih (378°) ni spremembe stanja izhoda optičnega prekinjalnika je odgovor krmilnika »ERROR N,,,,,LF«.

Niz »IP« v odgovoru na mestu xx pomeni, da se merjeni motor nahaja na začetni poziciji; v primeru napake optičnega prekinjalnika na merjenem motorju sledi odgovor »ERROR ,,,,N,,LF«. Doseženo pozicijo motorja po poslani zahtevi »SET02« pri merjenju ali »SET03« pri umerjanju, sporoči krmilnik z nizom »SP« v odgovoru na mestu xx.

Krmilnik koračnega motorja sporoča napake v komunikaciji (napaka v okvirju, napačen format zahteve), napako v napajanju močnostnega dela in prekoračen čas časovnega paznika. Uporabniški vmesnik ob zaznani napaki prekine meritev in o napaki obvesti merilca.

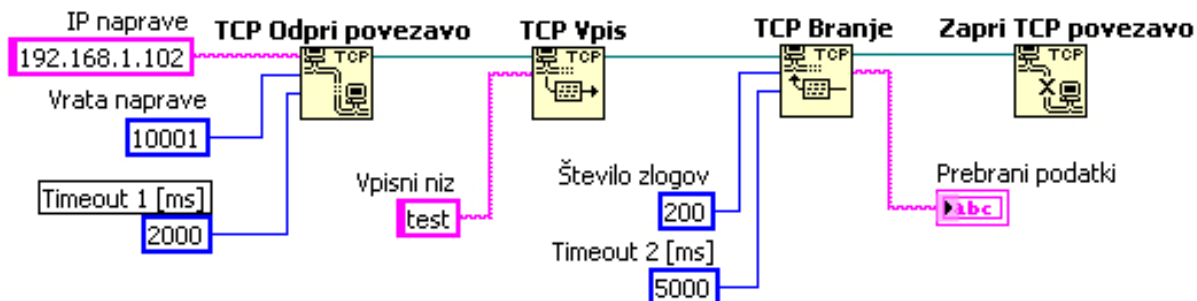
4.4 Izpis serijske številke in delovnega naloga

Številka delovnega naloga se pred začetkom vsake meritve prebere iz datoteke na strežniku. V primeru da datoteka ne obstaja, uporabniški vmesnik javi napako in vpetje spusti merjeni motor. Na sliki 28 je prikazan indikator serijske številke in delovnega naloga med meritvijo.



Slika 28: Indikator serijske številke in delovnega naloga

Procesorska enota za branje in pisanje na nosilec podatkov omogoča komunikacijo preko protokola TCP/IP (slika 29).



Slika 29: TCP komunikacija v LabView

Za začetek komunikacije z oddaljeno napravo je potrebno vpisati IP naslov in vrata te naprave. Če se oddaljena naprave ne odzove v določenem času (Timeout 1) blok javi napako. Ko je povezava vzpostavljena, podatke pošljemo kot niz znakov ASCII kode (v primeru na sliki 29 »test«).

Podatke preberemo z blokom TCP Branje. Nastavimo želeno število zlogov, prispelih podatkov in omejitev časa (Timeout 2) čakanja prispelih podatkov. Blok javi napako, če v tem času zahtevano število zlogov ni pridobljeno in vrne na izhod podatke, pridobljene pred iztekom časa omejitve. Zaradi vnaprej neznanega števila prispelih

zlogov v odgovoru procesorske enote (lahko dobimo podatke ali številko napake) je z vidika programiranja najlažje nastaviti želeno število zlogov na dolžino največjega pričakovanega niza prispelih podatkov. Po preteku časovne omejitve prezremo napako in z analizo prispelih podatkov določimo ali je prišlo do napake.

		UKAZ	Začetni naslov za vpis ali branje podatkov	Želena dolžina niza (zlogi)	Številka bralno/pisalne glave	Število zlogov v paketu (64 ali 32)	Terminacijski znak	Potrditev sprejema	Terminacijski znak	Začetek prenosa podatkov	Terminacijski znak	PODATKI	Terminacijski znak	Potrditev sprejema	Terminacijski znak
Branje nosilca podatkov	zahteva	'L'	A3 A2 A1 A0	L3 L2 L1 L0	K ('1' ali '2')	B ('0' ali '1')	LFCR			<STX>	LFCR				
	odgovor							<ACK> 0 ali <NAK> + št. napake	LFCR			D1 D2 D3 ... Dn	LFCR		
Pisanje na nosilec podatkov	zahteva	'P'	A3 A2 A1 A0	L3 L2 L1 L0	K ('1' ali '2')	B ('0' ali '1')	LFCR			<STX>		D1 D2 D3 ... Dn	LFCR		
	odgovor							<ACK> 0 ali <NAK> + št. napake	LFCR					<ACK> 0 ali <NAK> + št. napake	LFCR

		UKAZ	Znak za identifikacijo prisotnosti nosilcev podatkov	Terminacijski znak	Potrditev sprejema	Terminacijski znak	Odgovor	Številka glave	Prvi štirje zlogi na nosilcu podatkov	Potrditev sprejema	Terminacijski znak
Preveri prisotnost nosilca	zahteva	'H'	?	LFCR							
	odgovor				<ACK> 0	LFCR	H'	1', '2' ali '?'	D1 D2 D3 D4	<ACK> 0 ali <NAK> + št. napake	LFCR

Slika 30: Potek komunikacije s procesorsko enoto Balluff

Celoten potek komunikacije s procesorsko enoto pri branju in pisanju na nosilec podatkov ter preverjanju prisotnosti nosilca podatkov prikazuje slika 30. Vsak niz poslanih ali prejetih podatkov je zaključen s kombinacijo ASCII znakov LF (line feed) in CR (carriage return).

Pred začetkom pisanja ali branja podatkov program preveri prisotnost nosilca podatkov v bližini bralno / pisalne glave. Na zahtevo 'H?' dobimo odgovor 'H? 0000', če nosilec podatkov ni prisoten pri nobeni glavi, in 'H1 D3 D2 D1 D0' ('H2 D3 D2 D1 D0') za dosegljiv nosilec podatkov pri prvi (drugi) glavi. Zlogi D3 D2 D1 D0 pomenijo prve štiri zloge na zaznanem nosilcu podatkov. V primeru, da sta nosilca podatkov dosegljiva pri obeh glavah, odgovor vsebuje številko prve ali druge glave. Prisotnost nosilca podatkov na naslednji glavi ugotovimo s še eno poslano zahtevo.

Z znakom 'L' ('P') začnemo niz znakov zahteve za branje (pisanje). Niz nadaljujemo s štirimi znaki (A3 A2 A1 A0), ki pomenijo naslov prvega želenega prebranega (vpisanega) zloga na nosilcu podatkov in štirimi znaki (L3 L2 L1 L0) za želeno število prebranih (vpisanih) zlogov. Za popolno zahtevo je potrebno še določiti številko bralno pisalne glave (K) in način organiziranosti pomnilniškega prostora na nosilcu podatkov (B). Uporabljeni nosilci podatkov imajo pomnilniški prostor razdeljen na pakete po 64 zlogov ($B = 0$).

Procesorska enota potrdi sprejem zahteve z ASCII znakom <ACK> (acknowledgment) in številko 0 ali v primeru napake z ASCII znakom <NAK> (negative acknowledgment) in številko napake. V primeru napake branje ali vpis zahtevanih podatkov ni možno in je potrebno poslati novo zahtevo.

Podatke pridobimo v odgovoru na zahtevo za začetek pošiljanja podatkov (ASCII znak <STX> (start of text)). Niz podatkov za vpis začnemo z znakom <STX> in po poslanem nizu procesorska enota potrdi sprejem ali vrne napako.

Izkazalo se je, da je čas, potreben za komunikacijo s procesorsko enoto Balluff, pri branju daljši od 5 sekund (branje 19 zlogov serijske številke, 2 zlogov statusa in 1 zloga številke palete), s čimer je celotni čas meritve daljši od zahtevanih 40 sekund. Rešitev tega problema ponuja možnost vzporednega izvajanja različnih delov kode v programskem okolju LabView. Vzporedno z glavno zanko programa teče zanka za komunikacijo s procesno enoto Balluff, v kateri se med meritvami stalno preverja prisotnost nosilca podatkov v bližini bralno/pisalne glave. Prisotnost nosilca podatkov (paleta z motorjem vstavljena v merilni sistem) sproži branje podatkov, ki poteka med procesom vpenjanja merjenca v merilni sistem. Serijska številka merjenca in status nosilca podatkov sta že znana, ko je merjenec vpet v merilni sistem.

Vpis na nosilec podatkov po končani meritvi ni časovno potratna operacija (vpišeta se dva zloga), zato se izvrši pred izpenjanjem merjenca.

4.5 Prikaz rezultatov meritev

Rezultati meritev se med potekom meritve vpisujejo v tabelo na sliki 31. Vsak podatek v tabeli predstavlja razliko med izmerjeno vrednostjo pri kotu x in umerjeno vrednostjo pri najbližjem kotu. Pri razliki, ki je manjša od tolerance, se celica obarva zeleno; v nasprotnem primeru je celica rdeče barve.

Rezultati meritev			
	MP1	MP2	MP3
0°	0,001	-0,003	0,000
18°	-0,005	-0,003	-0,003
36°	0,001	0,001	-0,006
54°	-0,020	-0,001	-0,005
72°	-0,007	-0,001	-0,003
90°	-0,001	-0,004	-0,003
108°	-0,008	-0,001	0,001
126°	-0,008	-0,001	0,000
144°	-0,025	-0,009	-0,003
162°	-0,008	-0,007	-0,005
180°	0,002	-0,001	-0,004
198°	-0,003	0,001	-0,001
216°	0,001	-0,001	-0,001
234°	-0,005	0,001	0,006
252°	0,001	0,003	0,010
270°	-0,002	-0,001	0,018
288°	0,002	0,001	0,009
306°	0,000	-0,001	0,006
324°	-0,009	-0,004	0,008
342°	-0,001	-0,004	0,002

Slika 31: Izpis rezultatov meritev



Slika 32: Indikator statusa kosa (dober ali slab) po končani meritvi

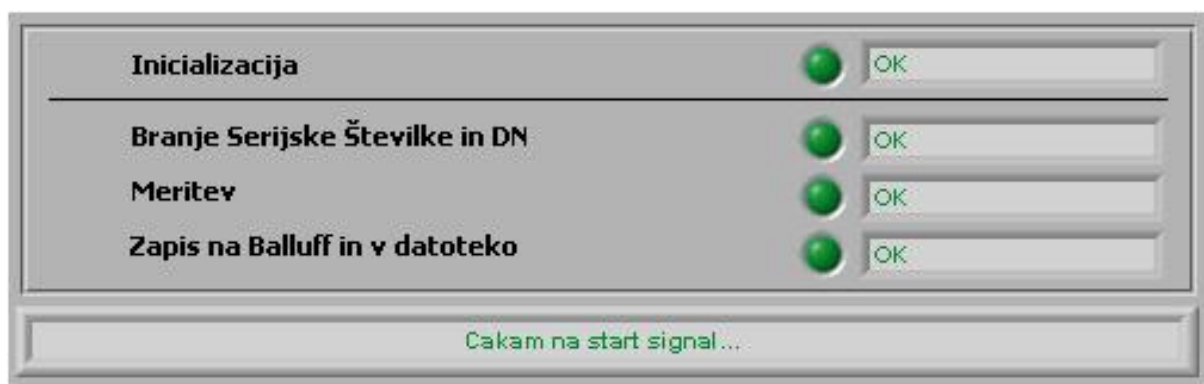
Poleg tabele so podatki za vsak merilnik posebej prikazani tudi grafično. Merilec iz grafičnega prikaza lažje razbere vzorec meritev kot iz tabele samih števil. V primeru

spremembe ali izboljšave procesa izdelave motorjev lahko že merilec iz izkušenj opisno oceni vpliv te spremembe na rezultate meritev.

Kos je slab, če je ena ali več vrednosti izven toleranc. Po končani meritvi indikator statusa kosa, prikazan na sliki 32, sporoči merilcu status kosa (dober ali slab).

4.6 Indikator poteka meritve

Indikator poteka meritve, prikazan na sliki 33, pomaga pri hitrem odpravljanju napak v delovanju samega merilnega sistema. V primeru napake pri določenem koraku se lučka obarva rdeče in v polju se izpiše kratek opis napake.



Slika 33: Indikator poteka meritve

Iskanje vira napake ni potrebno, zato lahko merilec v nekaterih primerih že sam razreši problem ali pa vrsto napake sporoči vzdrževalcu, kar skrajša čas popravila.

Zadnji korak v poteku meritve predstavlja analiza napake, če je do nje prišlo. Uporabniški vmesnik z detajlnim opisom napake obvesti merilca o napaki, ponudi možne rešitve in po potrditvi čaka na začetek nove meritve ali konča izvajanje programa.

Pri napaki v komunikaciji s krmilnikom koračnega motorja, števcu linearnih merilnikov ali procesorsko enoto Balluff in napaki optičnega prekinjalnika na koračnem motorju je potreben izhod iz programa; razrešiti je potrebno napako v strojni opremi. Po ponovnem zagonu programa se po inicializaciji strojne opreme in ponovni meritvi pokaže ali je bila napaka uspešno odpravljena ali ne.

V primeru drugih napak izhod iz programa ni potreben, ker ni potrebna ponovna inicializacija strojne opreme; vir teh napak je merilec (vstavljena prazna paleta, nosilec podatkov ni bil zbrisan) ali merjeni motor (okvara optičnega prekinjalnika).

5 Meritve in rezultati

Meritve izdelka med procesom izdelave in na koncu linije so pomembne zaradi dveh razlogov. Osnovni razlog je izločitev slabih, poškodovanih ali nedelujočih izdelkov, ki se pojavljajo naključno zaradi napake proizvodnega delavca pri sestavljanju ali mehanske poškodbe pri transportu med postajami. Drugi razlog je pomemben z vidika proizvodnje; z dobrimi meritvami ugotovimo napake v procesu izdelave, leženje procesa ali napake v vhodnem materialu in s tem nadzorujemo proizvodnjo. Za pridobitev uporabnih podatkov je potrebno pri načrtovanju in realizaciji merilnega sistema zagotoviti merjenje pravih lastnosti merjenja, ponovljivost ter zanesljivost meritev. Merilni sistem je neuporaben, če nam ne nudi pravih podatkov oziroma ne dobimo enakega rezultata pri ponovnih merjenjih istega merjenja.

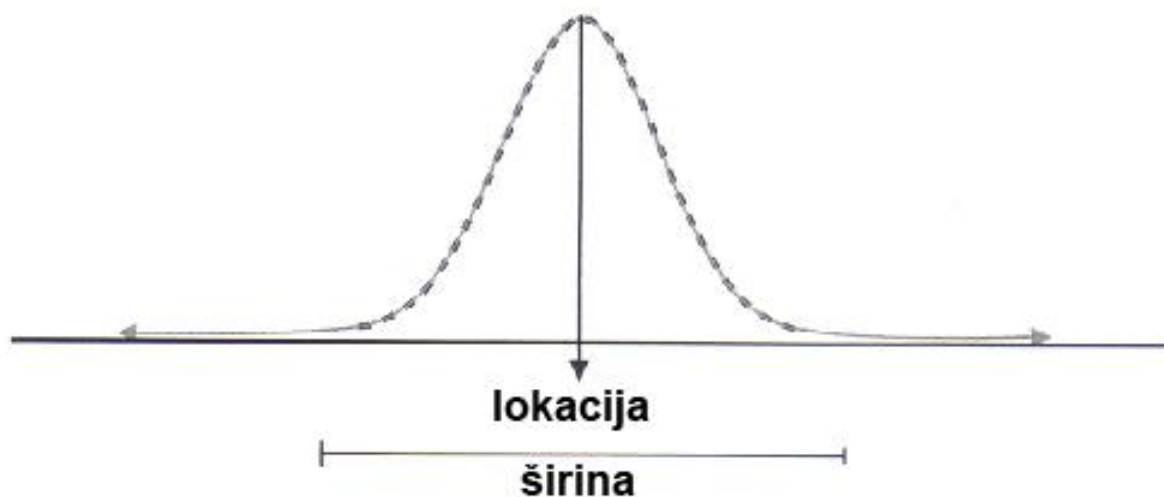
V avtomobilski industriji se je uveljavila praksa preverjanja zanesljivosti merilnih sistemov po metodah, določenih s strani združenja nekaterih največjih proizvajalcev in dobaviteljev v avtomobilski industriji AIAG (ang.: automotive industry action group) ter ameriške zveze za kakovost ASQ (ang.: American society for quality). Metode, ki temeljijo na statističnih analizah, so zbrane v referenčnem priročniku MSA (ang.: measurement systems analysis) [5]. Tako oddelek za kakovost v podjetju, kot tudi kupec zahtevata analizo po metodi GRR [5] za vsak merilni sistem pred odobritvijo zagona proizvodnje. Analiza je sestavni del tako projektne kot tudi proizvodne dokumentacije.

5.1 Analiza merilnega sistema po metodi GRR

Glavno merilo kvalitete postopka merjenja se opisuje z sposobnostjo (ang.: capability), ki predstavlja statistično oceno odstopanj meritev. V oceni odstopanj so zajeti vsi vzroki za ta odstopanja - merilni sistem, merilec, okolje in odstopanje merjenja. Lahko bi podali podatek o natančnosti merilnega sistema za določeno merilno in temperaturno območje, vendar je zaradi kompleksnosti vseh vplivov to premalo. Zato je potrebno analizo izvesti z večimi merilci, ki bodo dejansko merili v proizvodnji, v prostoru, kjer se bo merilo in z določenim številom merjencev, ki predstavljajo reprezentativen vzorec.

Za dolgoročno oceno zanesljivosti postopka merjenja je potrebno stalno preverjanje ali ocenjevanje sposobnosti. V primeru odstopanj je potrebno pogostejše umerjanje, zmanjšanje kritičnih vplivov ali izboljšanje merilnega sistema.

Odstopanja meritev so predstavljena z normalno porazdelitvijo, prikazano na sliki 34, ki jo lahko razdelimo na dva dela – lokacijsko odstopanje (ang.: location variation) in širinsko odstopanje (ang.: width variation) porazdelitve rezultatov meritev.



Slika 34: Predstavitev odstopanja rezultatov meritev (povzeto iz [5])

Sposobnost postopka merjenja je kombinacija ocen lokacijskega in širinskega odstopanja meritev.

5.1.1 Lokacijsko odstopanje porazdelitve meritev

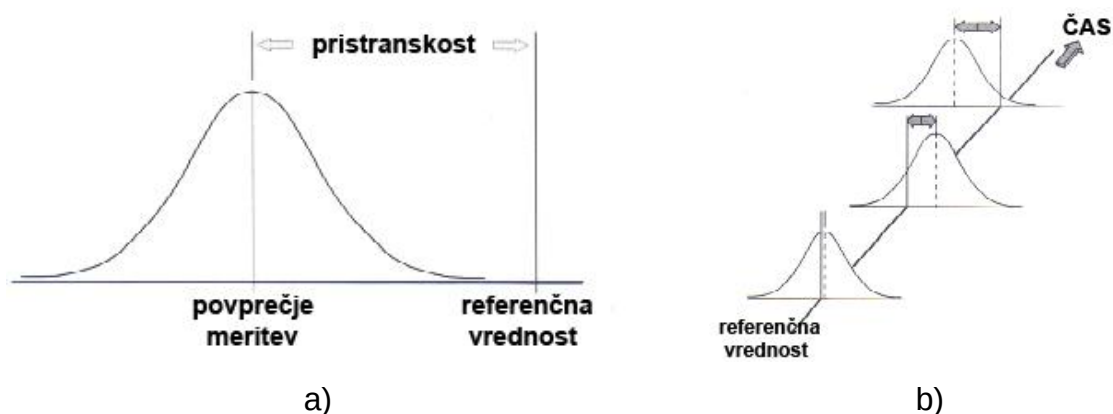
Lokacijsko odstopanje meritev pomeni odstopanje povprečja meritev od referenčne vrednosti, na kar vplivajo trije dejavniki:

- pristranskost (ang.: bias) merilnega sistema,
- lezenje (ang.: drift),
- nelinearnost.

Odstopanje med referenčno vrednostjo in povprečjem meritev iste karakteristike na istem kosu imenujemo pristranskost, ki je ponazorjena na sliki 35a. Vzroki za

pristranskost so obrabljenost vpetja, premik linearnih merilnikov položaja, okolje (temperatura, vlažnost in čistoča), obrabljenost ali poškodba kalibra in merilec.

Z lezenjem opišemo spremembo rezultatov meritev iste karakteristike na istem kosu v daljšem časovnem obdobju – sprememba pristranskosti po času, prikazano na sliki 35b. Vzroki za lezenje so podobni, kot za pristranskost.



Slika 35: Pristranskost (a) in lezenje (b) odstopanja meritev (povzeto iz [5])

Spremembo pristranskosti po celotnem merilnem območju predstavlja nelinearnost. Vzroki za napako linearnosti so opletanje kalibra, umerjanje (ne pokriva celotnega področja merjenja), robustnost merilnega sistema in nelinearnost linearnih merilnikov položaja.

Sistem merjenja temelji na umerjanju s kalibrom znanih dimenzij in primerjavi teh meritev z meritvami merjenih motorjev. Na ta način se izognemo preciznemu nastavljanju merilnih letev in ozkih toleranc položaja merilnih letev glede na vpetje merjenega motorja. Kaliber in vpenjanje merjenja sta narejena na način, ki posnema razmere v aplikaciji, zato nas ne zanima dejanska vrednost opletanja ampak odstopanja od idealnega merjenja - kalibra. V tem primeru računanje pristranskosti takoj po umerjanju nima smisla. Problem predstavlja lezenje, ki je lahko posledica obrabe vpetja, nečistoč na glavah linearnih merilnikov položaja ali fizičnega premika linearnih merilnikov položaja. Uveljavljeni postopki za zmanjšanje napak meritev zaradi lezenja predvidevajo merjenje istega merjenja pred vsako izmeno ali pri povečanem izmetu, da se preveri pravilnost meritev.

Merjenec, imenovan »zlati kos« je posebej označen motor iz proizvodnje, hranjen v zaboju z rezultati vseh prejšnjih meritev. Oddelek za kakovost analizira rezultate in ugotovi, če so odstopanja meritev znotraj meja in ali je potrebno ponovno umerjanje. Umerjanje z kalibrom se v vsakem primeru izvede enkrat tedensko ali po vsakem posegu v merilni sistem. Prav tako se vodi evidenca o umerjanju kalibra in linearnih merilnikov položaja s strani certificirane ustanove – kaliber se umerja enkrat letno, linearni merilniki položaja pa enkrat na 2 leti. Lezenja zaradi sprememb okolja ni pričakovati, ker se v prostoru, v katerem se izvajajo meritve, nadzorujejo in regulirajo temperatura, vlažnost in tlak.

5.1.2 Širinsko odstopanje porazdelitve meritev

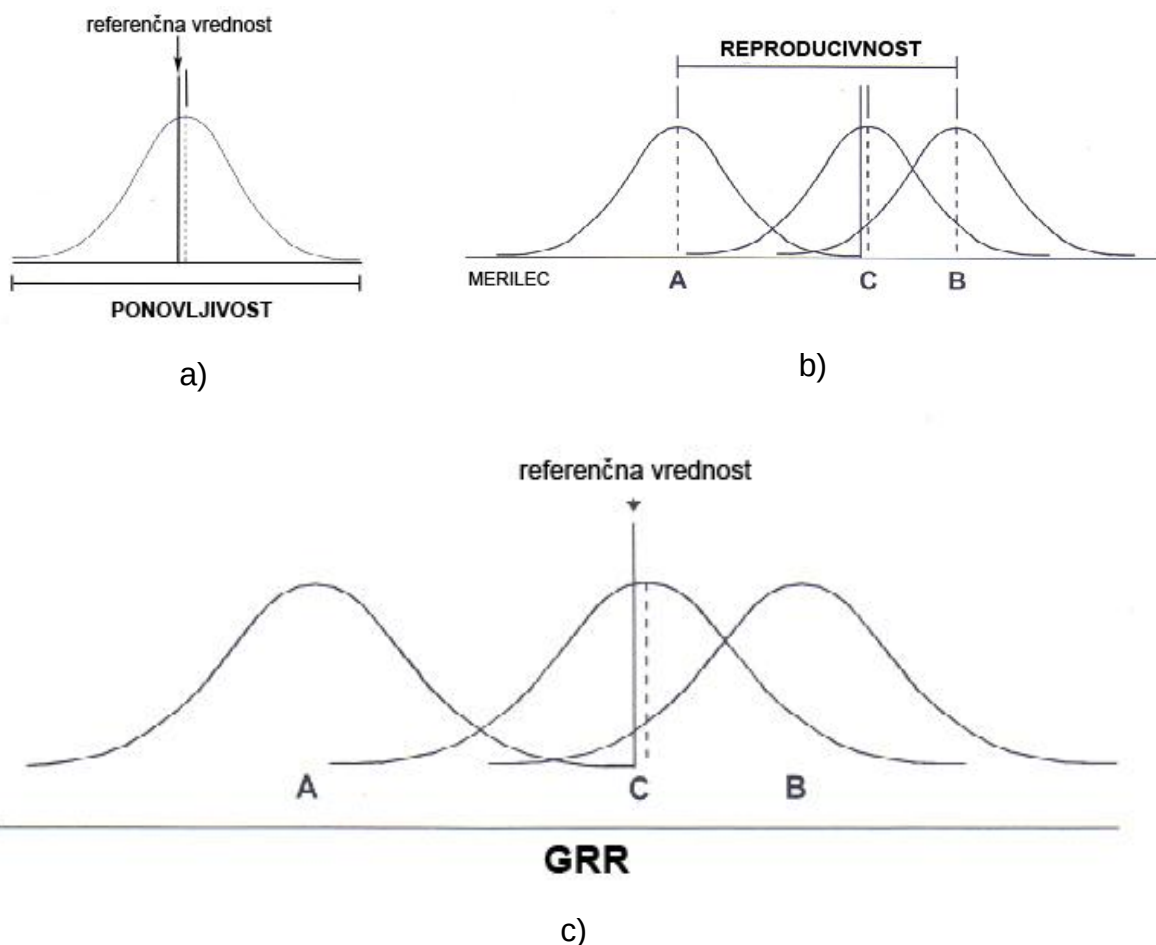
Širinsko odstopanje porazdelitve meritev pokriva 2 osnovna vzroka za napako rezultatov meritev:

- ponovljivost (ang.: repeatability),
- primerljivost (ang.: reproducibility).

Ponovljivost, shema je prikazana na sliki 36a, zajema odstopanje meritev, izvedenih z enim merilcem, enim merjencem na istem merilnem sistemu pod enakimi pogoji; predstavljena je kot sposobnost merilnega sistema (ang.: equipment variation (EV)). Slaba ponovljivost ima široko krivuljo normalne porazdelitve odstopanj meritev.

Primerljivost predstavlja odstopanje med povprečji meritev, izvedenih z različnimi merilci na istem merilnem sistemu z enim merjencem; predstavljena je kot povprečje odstopanj pri različnih pogojih delovanja merilnega sistema (ang.: appraiser variation (AV)). Slaba primerljivost se kaže v zamiku krivulj normalne porazdelitve odstopanj meritev glede na merilca, kar je prikazano na sliki 36b. GRR je ocena skupnega vpliva ponovljivosti in primerljivosti (slika 36c).

V praksi je potrebno meritve, potrebne za analizo, opravljati pri istih pogojih, kot bodo v redni proizvodnji. Za izvedbo meritev so potrebni trije merilci, ki po trikrat pomerijo 10 naključno izbranih motorjev iz proizvodnje. Pomembno je, da so merilci tiste osebe, ki bodo merile motorje v redni proizvodnji.



Slika 36: Ponovljivost (a), primerljivost (b) in GRR (c) odstopanj meritev (povzeto iz [5])

Rezultate meritev se vnese v tabelo, kot kaže primer v tabeli 12. Najprej je potrebno iz rezultatov izračunati osnovne podatke, ki jih potrebujemo za izračun ponovljivosti in primerljivosti. Pri vsakem merilcu je potrebno najprej izračunati največje odstopanje med 3 meritvami istega merjenja in povprečje teh meritev. V naslednjem koraku se izračunajo povprečja največjih odstopanj vseh merjencev po posameznih merilcih ($\bar{R}_a, \bar{R}_b, \bar{R}_c$) in povprečja povprečij meritev vseh merjencev po posameznih merilcih ($\bar{X}_a, \bar{X}_b, \bar{X}_c$). Za izračun ponovljivosti se izračuna povprečje največjih odstopanj po vseh merilcih ($\bar{\bar{R}}$); za izračun primerljivosti je pomembna največja razlika med povprečji meritev vseh merjencev po posameznih merilcih (X_{diff}).

Merilec / zap. meritev		MERJENEC										Povprečje
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
A	1	0,088	0,085	0,079	0,097	0,074	0,070	0,081	0,069	0,088	0,086	
	2	0,086	0,092	0,080	0,090	0,074	0,090	0,086	0,076	0,083	0,095	
	3	0,086	0,096	0,076	0,070	0,072	0,077	0,080	0,078	0,085	0,079	
Povprečje		0,087	0,091	0,078	0,086	0,073	0,079	0,082	0,074	0,085	0,087	$\bar{X}_a = 0,082$
Največja razlika		0,002	0,011	0,004	0,027	0,002	0,020	0,006	0,009	0,005	0,016	$\bar{R}_a = 0,010$
B	1	0,087	0,085	0,095	0,091	0,079	0,084	0,078	0,078	0,085	0,090	
	2	0,091	0,087	0,087	0,088	0,079	0,076	0,081	0,075	0,082	0,090	
	3	0,090	0,085	0,086	0,088	0,076	0,075	0,066	0,077	0,095	0,086	
Povprečje		0,089	0,086	0,089	0,089	0,078	0,078	0,075	0,077	0,087	0,089	$\bar{X}_b = 0,084$
Največja razlika		0,004	0,002	0,009	0,003	0,003	0,009	0,015	0,003	0,013	0,004	$\bar{R}_b = 0,007$
C	1	0,081	0,090	0,087	0,087	0,067	0,082	0,082	0,073	0,082	0,080	
	2	0,075	0,080	0,078	0,076	0,077	0,082	0,065	0,083	0,087	0,083	
	3	0,074	0,069	0,069	0,071	0,063	0,074	0,058	0,073	0,066	0,077	
Povprečje		0,077	0,080	0,078	0,078	0,069	0,079	0,068	0,076	0,078	0,080	$\bar{X}_c = 0,076$
Največja razlika		0,007	0,021	0,018	0,016	0,014	0,008	0,024	0,010	0,021	0,006	$\bar{R}_c = 0,014$
Povprečje merjenja		0,084	0,085	0,082	0,084	0,073	0,079	0,075	0,076	0,084	0,085	$R_p = 0,012$
$\bar{R} = (\bar{R}_a + \bar{R}_b + \bar{R}_c) / (\text{št. merilcev})$												$\bar{\bar{R}} = 0,010$
$\bar{X}_{diff} = MAX[\bar{X}_a, \bar{X}_b, \bar{X}_c] - MIN[\bar{X}_a, \bar{X}_b, \bar{X}_c]$												$\bar{X}_{DIFF} = 0,007$

Tabela 12: Primer tabele GRR

Iz tabele izračunamo odstopanja merjencev tako, da za vsakega izmed njih izračunamo povprečje vseh treh meritev pri vseh treh merilcih in izračunamo največje odstopanje med temi povprečji (R_p).

Odstopanje meritev zaradi ponovljivosti se izračuna z enačbo 3.

$$EV = \bar{\bar{R}} \cdot K_1 \quad (3)$$

Konstanta K_1 je odvisna od števila ponovitev meritev enega merjenja in je enaka inverzni vrednosti d_2^* (dodatek C, [5]). Tabelirane vrednosti d_2^* pomenijo koeficiente porazdelitve povprečnega odstopanja in se povečujejo z večanjem števila vzorcev (števila ponovitev meritev, števila merjencev ali števila merilcev). Večje število vzorcev pomeni večjo verjetnost zajema celotnega odstopanja. Vrednost K_1 je enaka 0,5908 za 3 ponovitve merjenja.

Z enačbo 4 izračunamo odstopanje meritev zaradi primerljivosti. Največjo razliko povprečij meritev med merilci pomnožimo z konstanto K_2 , ki je odvisna od števila merilcev in je za 3 merilce enaka 0,5231; K_2 je inverzna vrednost d_2^* (dodatek C, [5]). Odstopanje zaradi primerljivosti že vsebuje tudi napako ponovljivosti merilnega sistema, zato jo je potrebno upoštevati v izračunu.

$$AV = \sqrt{(\bar{X}_{diff} \cdot K_2)^2 - (EV^2 / (nr))} \quad (4)$$

n – število merjencev

r – število ponovitev meritev

Vrednost GRR izračunamo s kvadratnim korenem vsote kvadratov odstopanj zaradi ponovljivosti in primerljivosti, kot kaže enačba 5.

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} \quad (5)$$

Iz podatkov se izračuna odstopanje merjencev PV (ang.: part variation) z množenjem največje razlike med povprečji meritev posameznih merjencev in konstante K_3 , ki je odvisna od števila merjencev uporabljenih pri analizi in je za 10 merjencev enaka 0,3146. K_3 je inverzna vrednost d_2^* (dodatek C, [5]). Izračun odstopanja merjencev kaže enačba 6.

$$PV = R_p \cdot K_3 \quad (6)$$

Skupno odstopanje meritev TV (ang.: total variation) se izračuna po enačbi 7.

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} \quad (7)$$

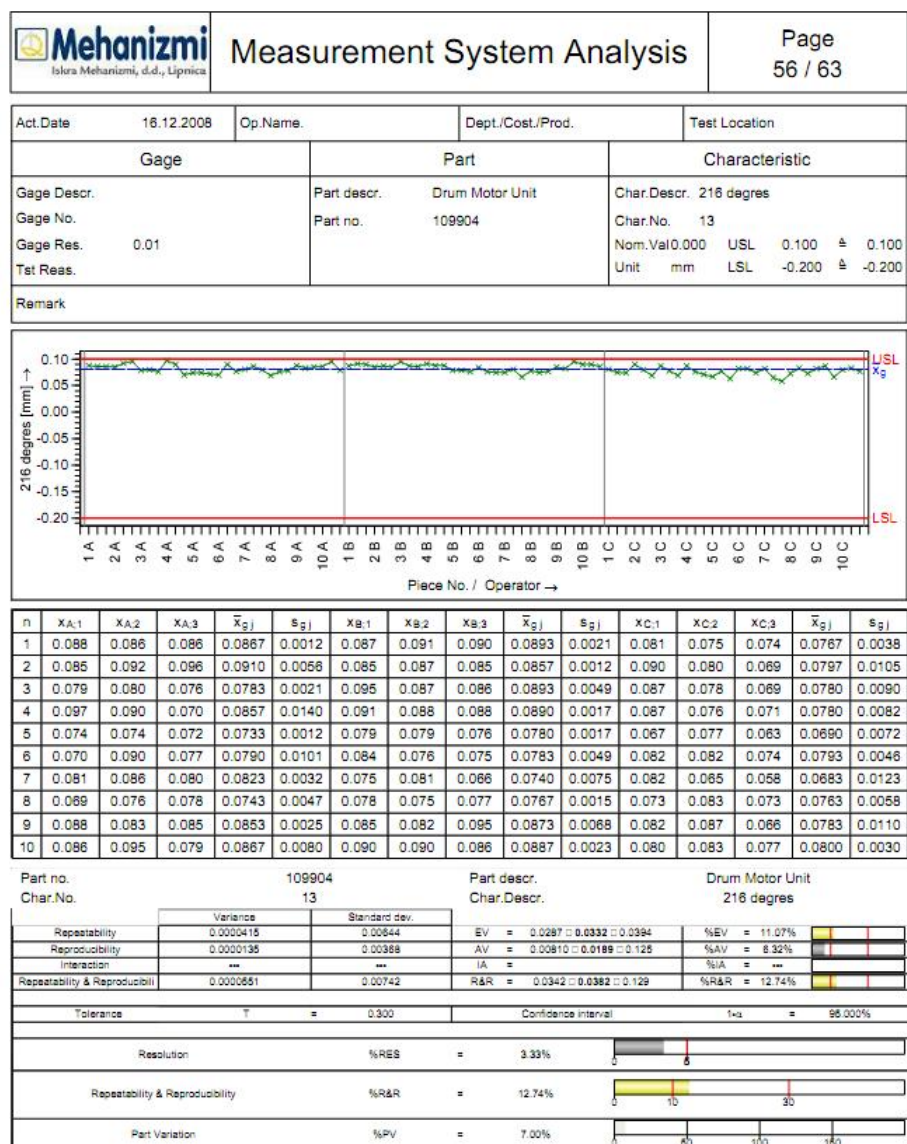
Odstopanja rezultatov meritev zaradi ponovljivosti in primerljivosti ter odstopanje merjencev se predstavi kot delež posamezne komponente glede na zahtevano toleranco, če želimo meriti samo odstopanje merjenja. Za ugotavljanje odstopanja procesa izdelave se rezultati prikažejo kot delež posamezne komponente glede na

skupno odstopanje (TV) rezultatov meritev. Enačbe za izračun so prikazane v tabeli 13.

nadzor izdelka	nadzor procesa
$\%EV = 100[6*EV/toleranca]$	$\%EV = 100[EV/TV]$
$\%AV = 100[6*AV/toleranca]$	$\%AV = 100[AV/TV]$
$\%PV = 100[6*PV/toleranca]$	$\%PV = 100[PV/TV]$
$\%GRR = 100[6*GRR/toleranca]$	$\%GRR = 100[GRR/TV]$

Tabela 13: Izračun deleža posameznih komponent odstopanja merilnega sistema

Merilni sistem za merjenje ovalnosti in ekscentričnosti rotorja motorja se uporablja za kontrolo merjencev in ne za nadzor procesa.

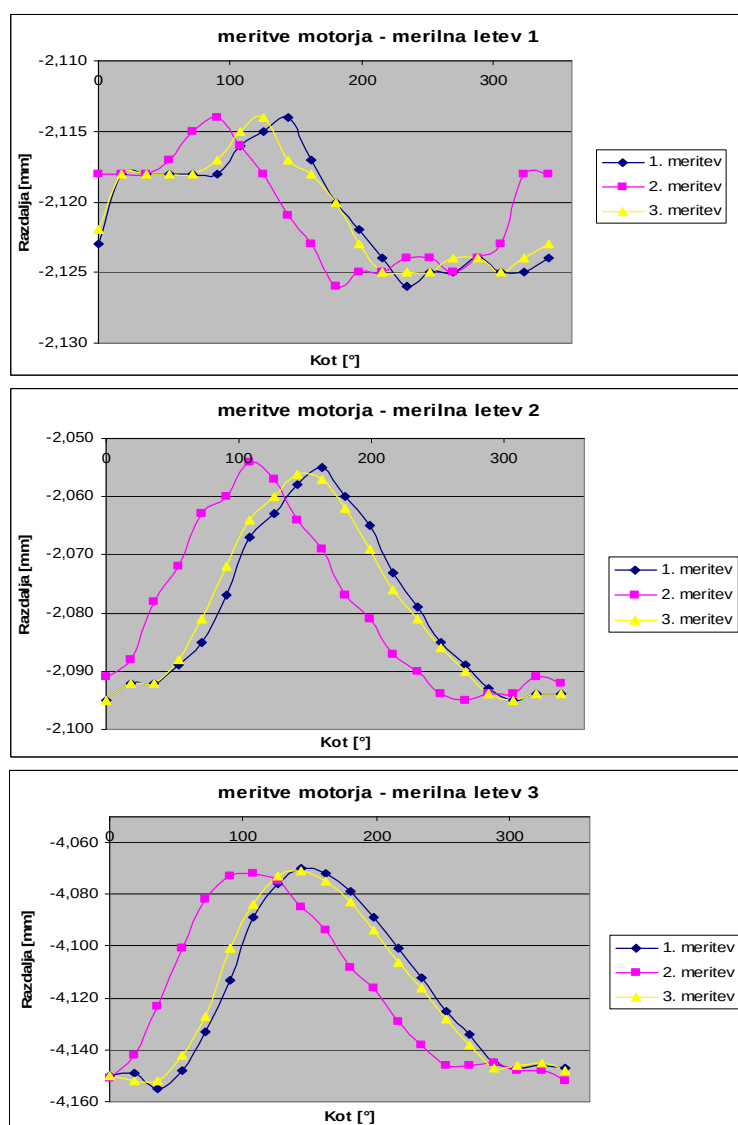


Slika 37: Izpis rezultatov metode GRR za merilnik položaja 3 in kot 216°

V podjetju se uporablja programski paket za statistične ocene procesnih in merilnih sistemov qs-STAT podjetja q-DAS [23]. V program se vnese podatke, izbere metodo in avtomatsko izračuna želene vrednosti; izpis rezultatov je prikazan na sliki 37. Analiza je narejena za vsak linearni merilnik po vsakem kotu posebej.

5.2 Prve meritve

Pri načrtovanju merilnega sistema je bilo predvideno, da bodo z umerjanjem kompenzirane vse napake vpetja in postavitve motorja v merilnem sistemu. To domnevo so prve meritve motorjev zavrgle in so pokazale odvisnost rezultatov meritev od vpetja motorja, kar kažejo rezultati treh meritev istega motorja (slika 38).



Slika 38: Grafi meritev motorja na vsakih 18°, brez nastavitve začetnega kota umerjanja

Rezultati prvih meritev kažejo na ponovljivost oblike krivulje opletanja, vendar so krivulje zamaknjene ena proti drugi. Potrebna je bila dodatna analiza vpetja motorja v merilni sistem za ugotovitev vzroka neponovljivosti. Opravile so se dodatne tri meritve s kalibrom, s katerimi se je ugotavljalo ponovljivost vpetja čeljusti, oplet kalibra in opletanje pogonske sklopke.

Meritev opleta kalibra se je izvedla z zaklenjenim koračnim motorjem in rotacijo kalibra z zajemom meritev vsakih 45°. Rezultati meritve so zbrani v tabeli 14. Največje odstopanje 5 µm pomeni 2 % najnižje tolerance odstopanja opletanja motorja in zadostuje podanim zahtevam za natančnost in ponovljivost merilnega sistema (pravilo 10 proti 1) [5].

kot	MP1 [µm]	MP2 [µm]	MP3 [µm]
0	795	957	915
45	792	953	910
90	794	953	913
135	795	954	912
180	792	953	910
225	795	955	913
270	793	954	912
315	794	956	913
min	792	953	910
max	795	957	915
razlika min-max	3	4	5

Tabela 14: Opletanje kalibra

Meritev ponovljivosti vpetja čeljusti se je izvedla z zaklenjenim koračnim motorjem (os vpetja na enakem kotu) in s kalibrom fiksiranim na enak kot. Na ta način se znebimo vpliva opletanja osi koračnega motorja in opletanja kalibra. Po vsaki meritvi se je izpelo merjenec iz merilnega sistema.

zap. meritev	MP1 [µm]	MP2 [µm]	MP3 [µm]
1	797	950	923
2	797	947	920
3	798	950	919
4	798	948	919
5	797	948	919
min	797	947	919
max	798	950	923
razlika min-max	1	3	4

Tabela 15: Ponovljivost vpenjanja čeljusti

Rezultati meritev, zbrani v tabeli 15, so odčitane vrednosti linearnih merilnikov položaja. Največje odstopanje 4 μm pomeni 1,6 % najnižje tolerance odstopanja opletanja motorja (0,1 mm) in zadostuje osnovnim zahtevam za natančnost in ponovljivost merilnega sistema.

Meritev opletanja pogonske sklopke se je izvedla z enim vpenjanjem in z fiksiranim kalibrom na enak kot; obračala se je sklopka za kot 45°. Vrednosti linearnih merilnikov položaja so zbrane v tabeli 6.

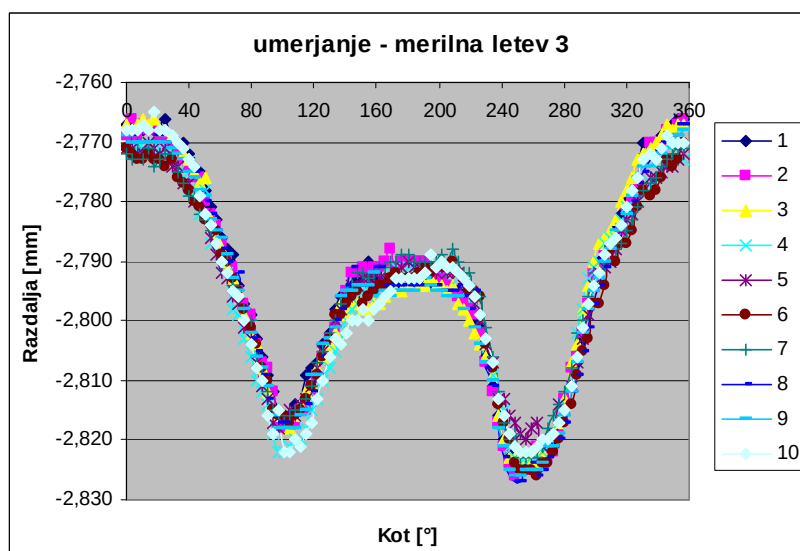
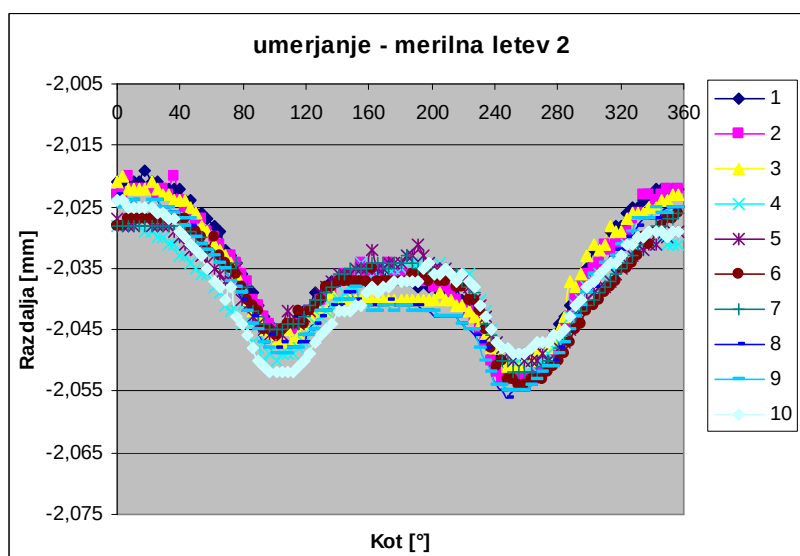
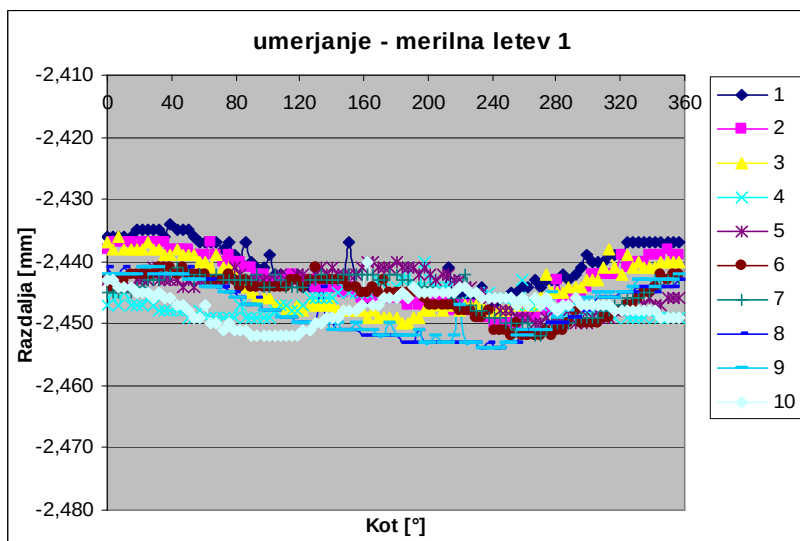
kot	MP1 [μm]	MP2 [μm]	MP3 [μm]
0	795	946	895
45	797	954	911
90	797	955	911
135	799	962	924
180	794	956	915
225	790	935	871
270	788	927	855
315	788	928	858
min	788	927	855
max	799	962	924
razlika min-max	11	35	69

Tabela 16: Opletanje pogonske sklopke

Opletanje pogonske sklopke prispeva k neponovljivosti merilnega sistema na prvem linearnem merilniku položaja 4,4 %, na drugem linearnem merilniku položaja 14 % in na tretjem linearnem merilniku položaja 27,6 % najnižje tolerance odstopanja opletanja motorja.

Glede na rezultate meritev različnih delov vpetja je ugotovljeno, da opletanje pogonske sklopke prispeva največ k neponovljivosti merilnega sistema. Kot najboljša rešitev tega problema se je izkazala montaža dodatnega optičnega prekinjalnika k pogonski sklopki; s tem je poskrbljeno, da se primerja meritev opleta motorja z umerjeno vrednostjo pri enakem kotu zasuka pogonske sklopke.

Grafe meritev kalibra na sistemu z dodanim optičnim prekinjalnikom prikazuje slika 39. Kaliber je bil merjen 10 krat z izpenjanjem po vsaki meritvi. V rezultatih teh meritev so vključene vse napake vpetja merilnega sistema.



Slika 39: Grafi umerjanj na vsakih 3,6°, z nastavitvijo začetnega kota umerjanja

Za vse 3 linearne merilnike položaja se je izvedla analiza odstopanj 10 zaporednih meritev po posameznih kotih; razlika med največjo in najmanjšo vrednostjo meritve pri posameznem kotu, kar predstavlja ponovljivost meritve. Največje in najmanjše razlike ter povprečje razlik po vseh kotih na posameznih merilnikih prikazuje tabela 17.

	najmanjša razlika	največja razlika	povprečje razlik
MP1	0,007	0,014	0,0106
MP2	0,005	0,011	0,008
MP3	0,004	0,01	0,0069

Tabela 17: Povprečje, največje in najmanjše razlike 10 zaporednih umerjanj s kalibrom, z nastavitvijo začetnega kota umerjanja

Analiza podatkov umerjanj z nastavitvijo začetnega kota umerjanja pokaže, da je vpliv opletanja, ki je bil kritičen na linearnem merilniku položaja 3, v tolerančnem območju. Pokazalo se je, da je kombinacija napake opletanja in ovalnosti kalibra in napake vpenjanja čeljusti večja od napake opletanja vpetja koračnega motorja. Kombinacija napake vpliva na meritve na linearnem merilniku položaja 1 (največja napaka 14 μm (5,6 % tolerančnega območja)) in na meritve na linearnem merilniku položaja 2 (največja napaka 11 μm (4,4 % tolerančnega območja)). Ponovljivost meritev se je z dodanim optičnim prekinjalnikom izboljšala in dosega predpisane zahteve.

5.3 Rezultati analize merilnega sistema po metodi GRR

Meritve ovalnosti motorjev za analizo merilnega sistema so opravljali trije merilci. Uporabljenih je bilo 10 motorjev, naključno izbranih iz proizvodnje. Vsak merilec je pred vsako meritvijo postavil motor na paletu, ga kontaktiral in vstavil paletu v merilni sistem. Vsi merilci so trikrat pomerili vsak motor.

KOT	MP1			MP2			MP3		
	%EV	%AV	%RR	%EV	%AV	%RR	%EV	%AV	%RR
0	15,88	1,67	15,97	18,65	1,94	18,75	16,54	6,80	17,88
18	16,28	1,93	16,39	19,28	2,99	19,51	15,93	6,50	17,20
36	16,42	0,00	16,42	17,90	1,84	18,00	14,44	5,16	15,34
54	18,07	3,18	18,35	9,82	8,37	12,90	10,97	2,18	11,19
72	16,98	0,00	16,98	14,69	13,99	20,28	10,71	0,78	10,74
90	20,23	1,01	20,25	14,58	10,61	18,03	10,03	0,00	10,03
108	18,29	0,00	18,29	13,72	0,62	13,73	20,08	0,00	20,08
126	16,76	0,00	16,76	15,58	0,91	15,61	8,48	1,73	8,65
144	21,47	1,76	21,54	16,32	3,35	16,56	14,02	2,99	14,34
162	18,01	0,00	18,01	15,03	0,69	15,05	8,25	4,49	9,39
180	18,57	0,00	18,57	15,16	1,46	15,23	8,35	4,21	9,35
198	18,00	0,00	18,00	16,51	2,82	16,75	8,94	5,23	10,36
216	19,68	1,56	19,74	16,35	1,98	16,47	11,07	6,32	12,74
234	17,34	1,71	17,42	15,14	3,29	15,49	11,88	6,07	13,34
252	15,96	0,00	15,96	13,93	0,00	13,93	13,99	6,64	15,48
270	18,21	0,00	18,21	15,61	0,00	15,61	12,94	6,42	14,44
288	18,62	0,00	18,62	16,10	0,00	16,10	10,35	0,00	10,35
306	17,24	0,79	17,26	17,19	2,28	17,34	13,31	1,54	13,40
324	17,75	0,89	17,77	16,89	1,24	16,94	15,72	4,04	16,23
342	16,21	0,81	16,23	17,66	2,81	17,88	15,67	5,20	16,51
Povprečje:	17,80	0,77	17,84	15,81	3,06	16,51	12,58	3,82	13,35

 pogojno dober sistem ($10 < \%RR < 30$)
 dober sistem ($\%RR \leq 10$)

Tabela 18: Rezultati analize merilnega sistema po metodi GRR

Rezultati meritev, zbrani v tabeli 18, kažejo pogojno dober sistem na vseh treh merilnikih. Glede na princip avtomatskega vpenjanja je bilo pričakovati majhen vpliv merilca (%AV) v primerjavi z vplivom neponovljivosti merilnega sistema (%EV).

6 Zaključek

V diplomski nalogi je predstavljena izvedba sistema za merjenje ovalnosti in ekscentričnosti rotorja brezkrtačnega motorja v skladu s podanimi zahtevami. Razvit je bil krmilnik koračnega motorja z vhodno/izhodnimi sponkami za komunikacijo z programabilnimi logičnimi krmilniki. Izdelana je bila uporabniku prijazna programska oprema z možnostjo komunikacije s števcem linearnih merilnikov in procesno enoto za brezkontaktno branje podatkov motorja. Ključni del programske opreme so pregledni prikazi rezultatov in možnih napak na merilnem sistemu. Prikaz napak omogoča enostavno in hitro servisiranje merilnega sistema, kar skrajša čas zastojev in zmanjša stroške.

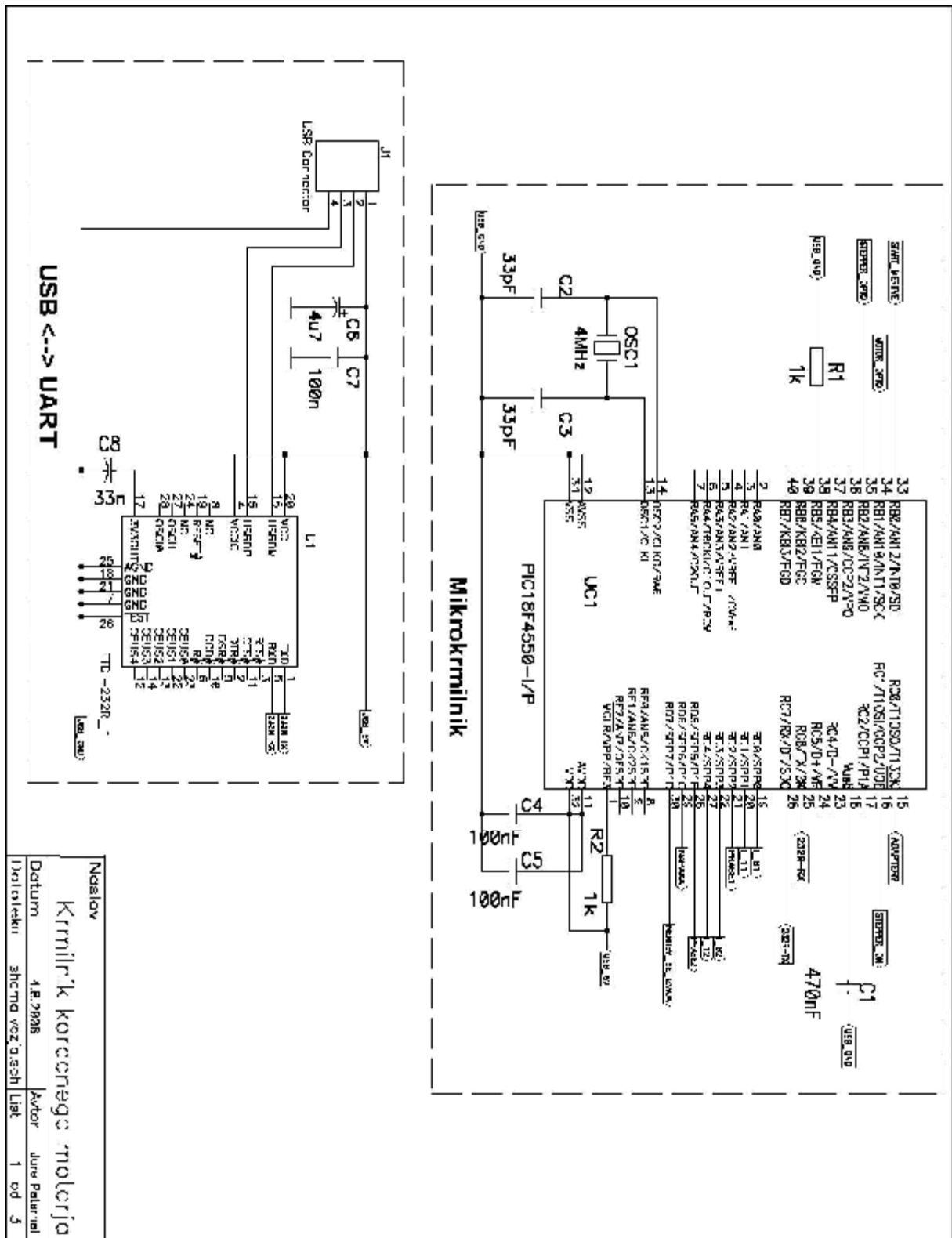
V zadnjem delu diplomske naloge je bila predstavljena analiza merilnega sistema po metodi GRR [5]. Rezultati so pokazali pogojno dober sistem, kar pomeni zahtevo po njegovem izboljšanju.

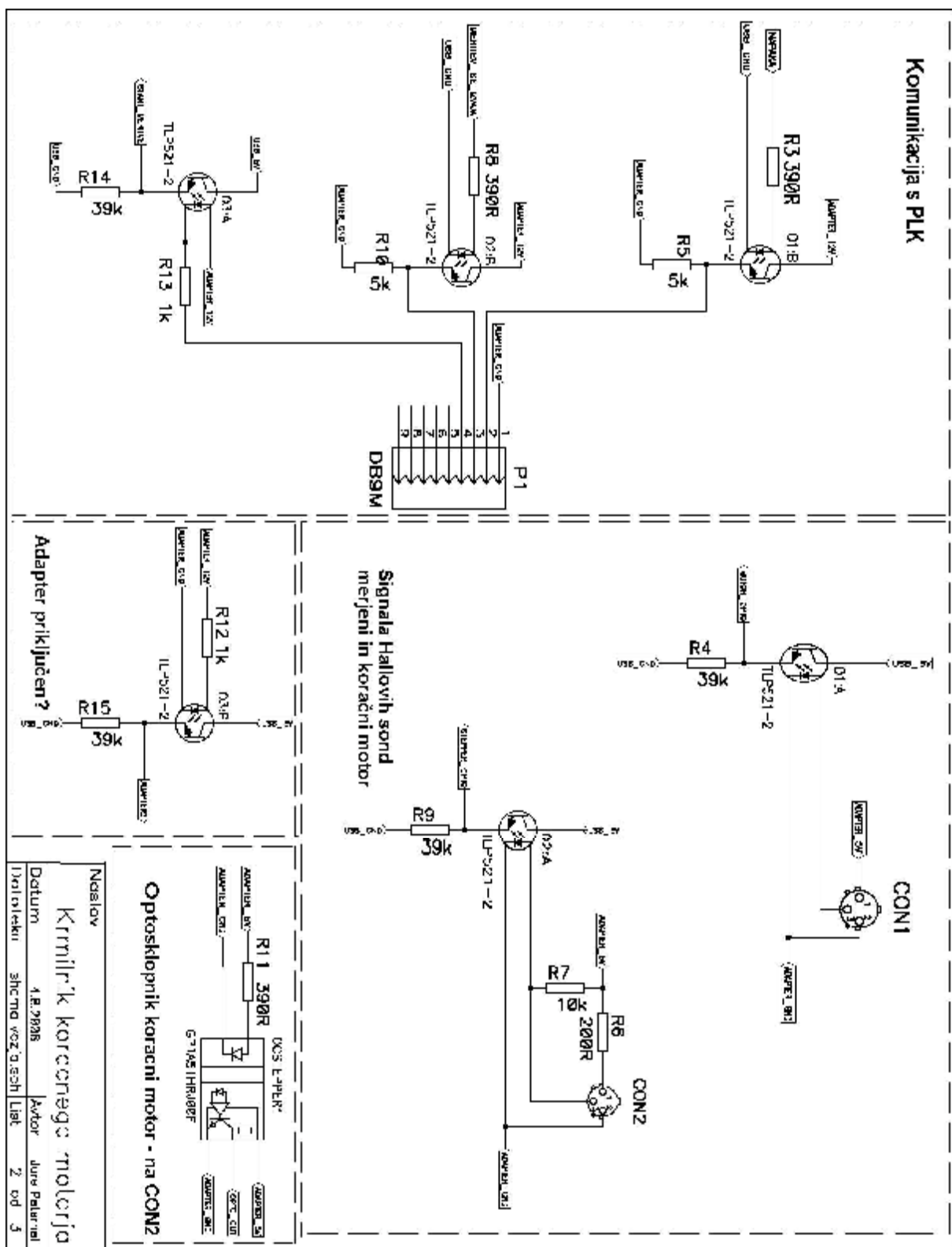
Glede na meritve na merilnem sistemu se je izkazalo, da bo potrebno izboljšati ponovljivost položaja vpetega motorja. Pri načrtovanju celotnega sistema končne kontrole niso bile predpisane ožje tolerančne meje za sistem vpenjanja na merilnem mestu ovalnosti, kar bistveno vpliva na rezultate meritev in ponovljivost meritev.

Problem predstavlja sama površina merjenega motorja v povezavi z merjenjem na izbranih kotih. Brazde na površini motorja in toleranca pri nastavljanju kota merjenja privedejo do različnih odčitkov vrednosti ovalnosti pri nekaterih kotih; ležaj merilne urice je lahko na vrhu med dvema brazdama ali v brazdi na površini, kar ne predstavlja prave meritve ampak lokalni minimum. Rešitev tega problema je v zveznem odčitavanju vrednosti ovalnosti in izločitvi lokalnih minimumov v pridobljeni meritvi. Serijska komunikacija s števci linearnih merilnikov položaja zveznega odčitavanja ne omogoča, zato je potrebno zamenjati števce s števno karto s predpomnilnikom na PCI ali USB vodilu, kar omogoča zajem vrednosti v realnem času. Tak način meritve bi omogočal krajši čas meritve in s tem možnost meritev večjega števila merjencev v primeru povečanega obsega naročil.

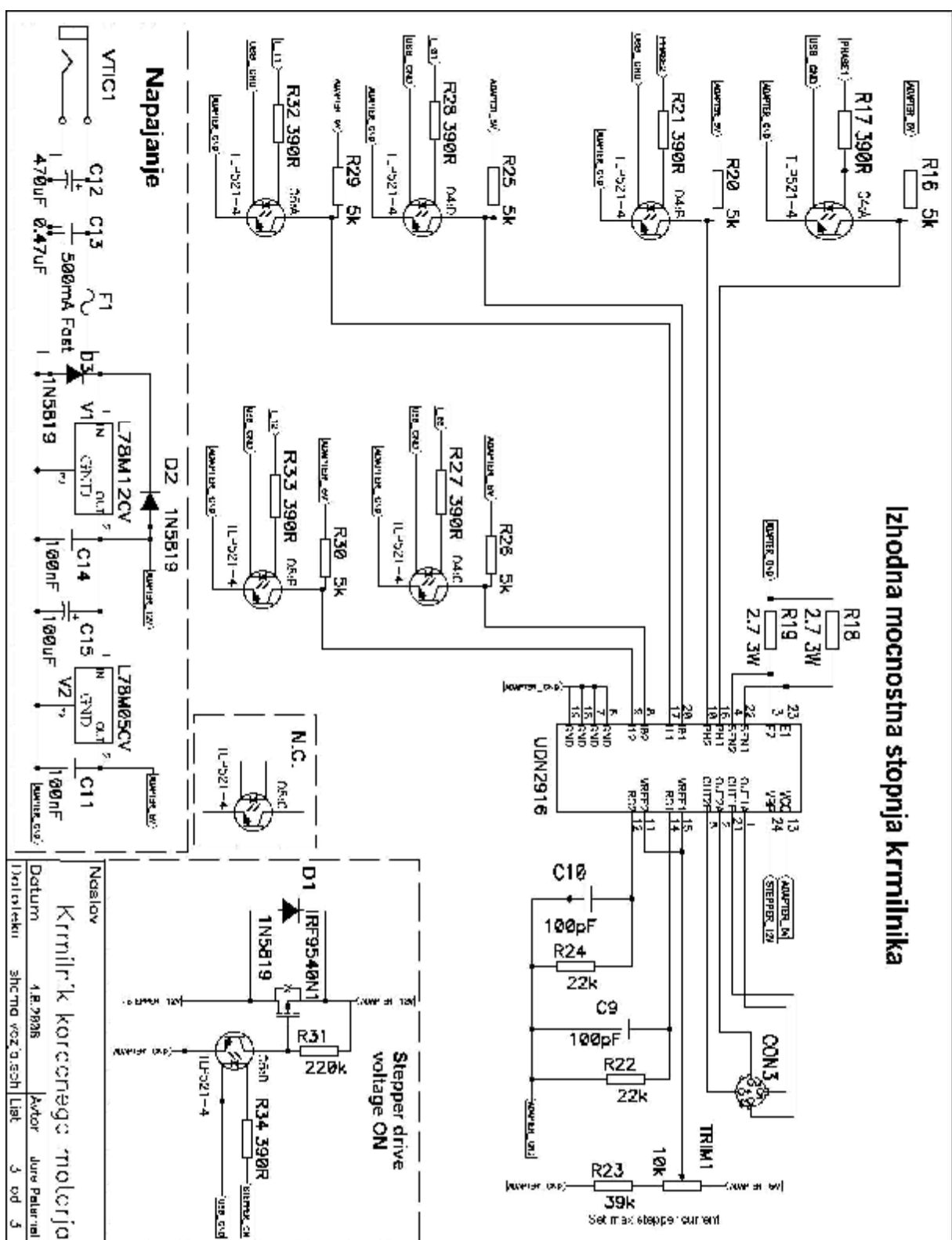
7 Priloge

Priloga 1: električna shema vezja krmilnika koračnega motorja





Shema 2: Optosklopniki



Shema 3: Napajanje in izhodna močnostna stopnja krmilnika

Literatura

1. World Health Organisation. Global status report on road safety. http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241563840_eng.pdf, dostopnost preverjena april 2011.
2. William W. Yeadon, Alan H. Yeadon. *Handbook of small electric motors*. McGraw-Hill, New York, 2001.
3. Klaus Feldmann. *3D-MID Technologie*. Carl Hanser Verlag, Munchen, 2004.
4. Continental AG. *Technical description of the radar system ARS300*. April 2007.
5. *Measurement Systems Analysis Reference Manual*. 3. izdaja. Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality Requirements Task Force, 2002.
6. BIS C-6027 Ethernet with TCP/IP-Protocol, Technical Description, User's Manual. [http://www.balluff.be/balluff/literature.nsf/\\$VersionFiles/CB76A6774A07F28CC12571680042B379/\\$file/C6027_BA_847527_0711_E.pdf](http://www.balluff.be/balluff/literature.nsf/$VersionFiles/CB76A6774A07F28CC12571680042B379/$file/C6027_BA_847527_0711_E.pdf), dostopnost preverjena april 2011.
7. 3-Component Force Link Type 9317B, datasheet. <http://www.helmar.com.pl/helmar/biblioteka/pdf/9317B.pdf>, dostopnost preverjena april 2011.
8. Iskra Mehanizmi d.d. *EOL LINE for Drum Motor UNIT - specifikacija Balluf*. April 2008.
9. DataMan™ 100, Quick Reference Guide. <http://www.cognex.com>, dostopnost preverjena april 2011.
10. BIS C-190-32/L, 34x34, Identification-Systems BIS. http://www.balluff-china.com/PDF/en/datenblaetter/BIS%20C-190-32_L.pdf, dostopnost preverjena april 2011.
11. Electronic Identification Systems BIS, Read/Write Heads, Manual. http://www.balluff.com/Balluff/Website/Script/Trackers/elqNow/elqRedir.htm?ref=http://www.balluff.com/Balluff/Documents/manuals/716464_e.pdf, dostopnost preverjena april 2011.
12. Linear Gage, Catalog No. E4174-542/572/575. www.mitutoyo.com/pdf/E4174-542.pdf, dostopnost preverjena april 2011.

- 13.2 Phasen High Torque Schrittmotoren - 0,9°, Typen ST4209 - Größe X, S, M, L.
<http://en.nanotec.com/downloads/pdf/1998/Schrittmotor-ST4209.pdf>, dostopnost preverjena april 2011.
14. GP1A51HRJ00F datasheet. http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp1a51hr_e.pdf, dostopnost preverjena april 2011.
15. GP1S092HCPI, datasheet. http://sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/gp1s092hcopi_e.pdf, dostopnost preverjena april 2011.
16. Boštjan Murovec, Peter Šuhel. *Elektronski elementi v procesnih sistemih*. Založba FE in FRI, Ljubljana, 2004.
17. FT232R USB UART IC Datasheet. http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf, dostopnost preverjena april 2011.
18. Toshiba TLP521-4 datasheet. http://www.semicon.toshiba.co.jp/docs/datasheet/en/Opto/TLP521-1_TLP521-4_en_datasheet_071001.pdf, dostopnost preverjena april 2011.
19. UDN2916 Dual Full-Bridge PWM Motor Driver datasheet. http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/2916/2916.pdf, dostopnost preverjena april 2011.
20. PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632D.pdf>, dostopnost preverjena april 2011.
21. eProDas Data Acquisition System, users guide and programming manual. <http://lie.fe.uni-lj.si/>, dostopnost preverjena april 2011.
22. National Instruments LabView. <http://www.ni.com/labview/>, dostopnost preverjena april 2011.
23. q-DAS qs-STAT. <http://www.q-das.de/en/anwendungen/qs-stat/>, dostopnost preverjena april 2011.

Izjava

Izjavljam, da sem diplomsko delo izdelal samostojno pod vodstvom mentorja doc. dr. Boštjana Murovca. Izkazano pomoč ostalih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Zapuže, 18. april 2011

Jure Peternel