

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Optimizacija procesnih parametrov za stabilizacijo
in izboljšanje sposobnosti struženja**

Magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje Strojništvo

Andrej Mlinar

Ljubljana, september 2017

UNIVERZA V LJUBLJANI

Fakulteta za strojništvo

**Optimizacija procesnih parametrov za stabilizacijo
in izboljšanje sposobnosti struženja**

Magistrsko delo magistrskega študijskega programa II. stopnje Strojništvo

Andrej Mlinar

Mentor: izr. prof. dr. Davorin Kramar, univ. dipl. inž.

Ljubljana, september 2017

Kandidat
Andrej MLINAR

MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM II. STOPNJE: **MAG II/461**

NASLOV TEME: **Optimizacija procesnih parametrov za stabilizacijo in izboljšanje
spôsobnosti struženja**

Na stružnici se med obdelavo pojavi problem, ker stroj ne zagotavlja zadostne stabilnosti procesa izdelave glede na tolerančno območje, vezano na cilindričnost izdelka. Zaradi nestabilnosti procesa struženja se izvaja 100 % kontrola kosov, kar predstavlja dodatno delo operaterjem na stroju. Z vgradnjo modula, ki sproti korigira izhodišče konice rezalnih orodij, bi skušali zagotoviti stabilnost obdelovalnega procesa in zmanjšati potrebno 100 % kontrolo na obdelovancih. Z določitvijo optimalnih nastavitvev parametrov, ključnih pri obdelavi (vpenjalni tlak, globina rezanja, podajanje), bi eliminirali pojav ovalnosti.

Delo naj vsebuje:

- pregled metodologij za izvajanje nadzora in optimizacije obdelovalnega procesa,
- analizo sposobnosti merilnega sistema,
- popis obstoječega proizvodnega procesa in pregled trenutnega stanja oz. sposobnosti obdelovalnega procesa,
- predstavitev izboljšav delovanja obdelovalnega stroja,
- načrtovanje preizkusov za optimizacijo procesnih parametrov,
- določitev optimalnih procesnih parametrov za stabilizacijo procesa,
- potrditveni preizkus pri optimalnih nastavitvah procesnih parametrov.

Magistrsko delo je treba oddati v jezikovno in terminološko pravilnem slovenskem jeziku. Rok za oddajo tega dela je šest mesecev od dneva prevzema.

Mentor

izr. prof. dr. Davorin Kramar, univ. dipl. inž.

Predsednik diplomske komisije

prof. dr. Sašo Medved, univ. dipl. inž.

Podpisani sem delo
prevzel v Ljubljani

dne 20.7.2017

Podpis [signature]



Prodekan za pedagoško dejavnost
II. in III. stopnje

izr. prof. dr. Andrej Kitanovski, univ. dipl. inž.

[signature]

Zahvala

V prvi vrsti bi se rad zahvalil mentorju na fakulteti izr. prof. dr. Davorinu Kramarju in zaposlenimi v njegovem laboratoriju, za nesebično pomoč pri nastajanju magistrske naloge.

Še posebna zahvala gre podjetju LTH Castings d.o.o. za štipendiranje tekom študija, omogočanjem dela in zaposlenim v tehnologiji obdelave, ki so me vodili in s svojimi izkušnjami pomagali pri praktičnem delu magistrske naloge.

Zahvaljujem se tudi svoji družini za pomoč, podporo in potrpežljivost.

Spodaj podpisani/-a Andrej Mlinar študent/-ka Fakultete za strojništvo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 23142034, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Optimizacija procesnih parametrov za stabilizacijo in izboljšanje sposobnosti struženja,

IZJAVLJAM,

1. * a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. da soglašam z uporabo elektronske oblike pisnega zaključnega dela študija za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;
8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V Ljubljani, 31. 8. 2017

Podpis avtorja/-ice:



* Obkrožite varianto a) ali b).

Optimizacija procesnih parametrov za stabilizacijo in izboljšanje sposobnosti struženja

Andrej Mlinar

Ključne besede: sposobnost procesa
analiza merilnega sistema
statistična kontrola procesa
ovalnost
načrtovanje eksperimentov
optimizacija

Magistrska naloga obravnava proizvodni proces izdelka z ozkim tolerančnim območjem. V procesu izdelave se je pojavil problem nestabilnosti obdelovalnega procesa. Pred analizo obdelovalnega procesa smo najprej z metodo analize merilnega sistema preverili merilni proces. Po preverjanju ustreznosti merilnega procesa smo v nadaljevanju preverili obstoječi obdelovalni proces. Iz analize statistične kontrole procesa obstoječega stanja smo ugotovili, da je proces potrebno stabilizirati. Za stabilizacijo procesa in izboljšanja sposobnosti smo vgradili korekcijski sistem ter kasneje CNC stružnico še umerili. Stabilnost in sposobnost obdelovalnega procesa smo izboljšali, še vedno pa se je na izdelku pojavljal problem ovalnosti. Procesne parametre, ki bi lahko vplivali na ovalnost izdelka, smo analizirali z metodo načrtovanja eksperimentov. Z metodo smo ugotovili, da ima glavni vpliv vpenjalna sila. Dosežena minimalna vpenjalna sila še ni v celoti izključila problema ovalnosti, zato smo za izključitev le-tega predlagali nov način vpetja.

Abstract

UDC 658.512.2(043.2)

No.: MAG II/461

Optimization of the process parameters for stabilization and improvement of the turning capability

Andrej Mlinar

Key words: process capability
 measurement system analyse
 statistical process control
 roundness
 design of experiments
 optimization

Master thesis deals with a manufacturing process of the product with narrow tolerances. A problem of the machining process instability arose during the process. A measurement system analysis of the measuring system and a control of the system's adequacy were made before the analysis of the machining process. After the examination and approval of the measuring system capability, the analysis of the machining process continued. A statistical process control on the existent machining process was performed. Low process capability coefficients showed that the machining process was not stable and was incapable. In order to stabilize the process an automatic correction system was integrated, followed by improvement of the machine precision. The stability and capability of the machining process increased but the problem of the roundness on the product was still present. The possible process parameters, which could affect the roundness problem, were examined with the design of the experiment method. The results showed that the clamping force has the largest effect on the problem. The lowest clamping force was achieved with the parameters optimization, but the problem was still present. Therefore a new clamping fixture was suggested to eliminate the roundness problem.

Kazalo

Kazalo slik	xv
Kazalo preglednic	xvii
Seznam uporabljenih simbolov	xix
Seznam uporabljenih okrajšav	xxi
1. Uvod	1
1.1. Problem	1
1.1.1. Nestabilnost obdelovalnega procesa	1
1.1.2. Ovalnost obdelancev	2
1.2. Cilj	2
2. Teoretične osnove	3
2.1. Struženje	3
2.1.1. Hrapavost površine	4
2.1.2. Orodja za struženje	6
2.2. Statistična kontrola procesa (SPC)	8
2.2.1. Osnove statistične kontrole procesa	8
2.2.2. Orodja statistične kontrole procesa	9
2.2.3. Opisna statistika in statistične veličine	9
2.2.4. Spособnost in zanesljivost proizvodnih procesov	11
2.3. Analiza merilnega sistema (MSA)	21
2.3.1. Variacija merilnega sistema	21
3. Obstoječi proizvodni proces	29
3.1. Obdelovanec	29
3.2. Obdelovalna celica	31
3.2.1. Okolje CNC stroja	31
3.2.2. Uporabljen CNC stroj	32
3.3. Kontrola izdelave izdelka	36
3.3.1. Zgradba merilnega sistema	36
4. Pregled obstoječega stanja proizvodnega procesa	41
4.1. Analiza merilnega sistema	41
4.1.1. Zajem meritev za MSA	42
4.1.2. Analiza ponovljivosti in primerljivosti	42

4.2.	Analiza sposobnosti obdelovalnega procesa	47
4.2.1.	Zajem meritev za SPC	48
4.2.2.	Analiza SPC.....	50
5.	Izboljšanje stanja proizvodnega procesa.....	55
5.1.	Uporabljeni korekcijski sistem	55
5.1.1.	Test delovanja korekcijskega sistema	57
5.1.2.	SPC analiza testa	58
5.2.	Umerjanje obdelovalnega stroja z laserjem.....	60
5.2.1.	Preverjanje točnosti in umerjanje stroja	60
5.2.2.	Statistična analiza procesa po umerjanju.....	62
6.	Optimizacija procesnih parametrov	65
6.1.	Metoda načrtovanja eksperimentov	65
6.1.1.	Planiranje eksperimenta.....	66
6.1.2.	Izvajanje eksperimenta	68
6.1.3.	Analiza eksperimenta	68
6.1.4.	Potrditev eksperimenta	68
6.2.	Izbira odzivov in procesnih parametrov	69
6.3.	Preliminaren preizkus.....	72
6.4.	Načrt in izvedba eksperimenta.....	73
6.5.	Analiza in vrednotenje rezultatov eksperimenta.....	75
6.5.1.	Analiza regresijskih modelov	75
6.5.2.	Regresijski model ovalnosti	77
6.5.3.	Regresijski model hrapavosti površine.....	79
6.6.	Optimizacija parametrov	82
6.7.	Potrditveni preizkus	83
7.	Rezultati in diskusija	85
8.	Zaključki	89
9.	Literatura	91
10.	Priloge.....	93

Kazalo slik

Slika 2.1: Grafični prikaz struženja [2].	4
Slika 2.2: Konica rezalnega orodja in veličine za izračun teoretične hrapavosti [5].	5
Slika 2.3: Ostanek materiala za minimalne globine rezanja h_m [5].	5
Slika 2.4: Prikaz neločljive zveze rezila in držala orodja [7].	6
Slika 2.5: Sestavljena zveza rezalne ploščice in držala [7].	7
Slika 2.6: Niz izmerjenih vrednosti in njihova povprečna vrednost [9].	10
Slika 2.7: Prikaz povprečne vrednosti in porazdelitve vrednosti [11].	11
Slika 2.8: Vpliv variacij na stabilnost procesa [11].	12
Slika 2.9: Osnovna oblika kontrolne karte [10].	13
Slika 2.10: Prikaz tolerančnih in kontrolnih mej [11].	16
Slika 2.11: Prikaz sposobnega procesa [18].	17
Slika 2.12: Prikaz mejno sposobnega procesa [18].	18
Slika 2.13: Prikaz nesposobnega procesa [18].	18
Slika 2.14: Grafični prikaz dejanske sposobnosti procesa C_{pk} [18].	19
Slika 2.15: Grafični prikaz različnih vrednosti koeficienta C_p [18].	20
Slika 2.16: Diagram skupne variacije [19].	22
Slika 2.17: Grafični prikaz odmika [22].	23
Slika 2.18: Grafični prikaz linearnosti [22].	24
Slika 2.19: Grafični prikaz dobre in slabe ponovljivosti merilnega procesa [22].	25
Slika 2.20: Grafični prikaz primerljivosti meritev med različnimi merilci [22].	25
Slika 2.21: Prikaz med slabo in dobro primerljivostjo meritev [22].	26
Slika 3.1: Ležajno ohišje.	29
Slika 3.2: Prerez ležajnega ohišja.	30
Slika 3.3: Shematski prikaz obdelovalnega centra.	31
Slika 3.4: Prikaz elementov pred strojem.	32
Slika 3.5: CNC stružnica Mori Seiki.	32
Slika 3.6: Prikaz delovnega prostora.	33
Slika 3.7: Prikaz vpenjalnega sistema.	34
Slika 3.8: Prikaz vpetja kosa.	34
Slika 3.9: Merilni sistem za merjenje vpenjalne sile.	35
Slika 3.10: Prikaz poteka vpenjalne sile pri različnih obratih.	35
Slika 3.11: Merilna postaja.	36
Slika 3.12: Merilna miza.	37
Slika 3.13: Merilo za FI64,3.	38
Slika 3.14: Merilo za FI65.	38
Slika 3.15: Prikaz izpisa merjenih dimenzij.	39
Slika 3.16: Prikaz spremljanja meritev za daljše časovno obdobje.	40
Slika 4.1: Študija $P\&P$ premera 64,3 mm.	43

Slika 4.2: Študija $P\&P$ premera 65 mm.	44
Slika 4.3: Študija $P\&P$ premera 72 mm.	45
Slika 4.4: Študija $P\&P$ premera 88e6 mm.	45
Slika 4.5: Študija $P\&P$ premera 88h6 mm.	46
Slika 4.6: Digitalni termometer.	48
Slika 4.7: Merjenje temperature emulzije.	49
Slika 4.8: Merjenje temperature zraka.	49
Slika 4.9: Prikaz poteka temperature emulzije in zraka.	50
Slika 4.10: $X-R$ karta meritev na premeru 64,3 mm.	50
Slika 4.11: Analiza sposobnosti za premer 64,3 mm.	51
Slika 5.1: Shematski prikaz korekcijskega sistema [21].	55
Slika 5.2: Vpet modul in sprejemnik.	56
Slika 5.3: Prikaz poteka temperature emulzije in zraka ter korekcij.	58
Slika 5.4: Laserski sistem ML10 Gold Standard [26].	61
Slika 5.5: Začetno stanje.	61
Slika 5.6: Stanje po kompenzaciji.	62
Slika 6.1: Model procesa z vhodnimi in izhodnimi spremenljivkami [29].	66
Slika 6.2: Ishikawa diagram za proces obdelave.	67
Slika 6.3: Prikaz ovalnosti.	69
Slika 6.4: Proces merjenja hrapavosti na merilniku hrapavosti Mitutoyo.	70
Slika 6.5: Ovalnost na vseh petih premerih.	71
Slika 6.6: Predstavitev načrta s središčnimi in robnimi točkami [29].	73
Slika 6.7: Vpliv vseh parametrov na ovalnost.	77
Slika 6.8: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in globine reza a_p na ovalnost pri vrednosti $f_n=0,05$ mm/vrt.	78
Slika 6.9: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in globine reza a_p na ovalnost pri vrednosti $f_n=0,12$ mm/vrt.	78
Slika 6.10: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in globine reza a_p na ovalnost pri vrednosti $f_n=0,19$ mm/vrt.	79
Slika 6.11: Vpliv vseh parametrov na hrapavost površine.	80
Slika 6.12: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in podajanja f_n na R_z pri vrednosti $a_p=0,06$ mm.	81
Slika 6.13: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in podajanja f_n na R_z pri vrednosti $a_p=0,37$ mm.	81
Slika 6.14: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in podajanja f_n na R_z pri vrednosti $a_p=0,68$ mm.	82
Slika 7.1: Analiza merilnega sistema.	85
Slika 7.2: Prikaz vrednosti P_{pk} v različnih stanjih obdelovalnega procesa.	87

Kazalo preglednic

Preglednica 2.1 :Preglednica vrednosti C_p in pripadajoča količina slabih kosov [9].	20
Preglednica 3.1: Preglednica tehnoloških parametrov in ploščic za obdelavo.	30
Preglednica 3.2: Specifikacijske lastnosti stroja.	33
Preglednica 4.1: Prikaz rezultatov variacij analize merilnega sistema.	47
Preglednica 4.2: Prikaz rezultatov SPC analize pri preverjanju obstoječega stanja.	53
Preglednica 5.1: Lastnosti modula za korigiranje [24].	56
Preglednica 5.2: Prikaz rezultatov SPC analize po vgradnji korekcijskega sistema.	59
Preglednica 5.3: Osnovni podatki laserskih meritev.	60
Preglednica 5.4: Prikaz rezultatov SPC analize po umerjanju.	63
Preglednica 6.1: Interval priporočenih vrednosti parametrov f_n in a_p [32] in F_{vp} .	71
Preglednica 6.2: Vrednosti vhodnih parametrov na posameznem nivoju.	72
Preglednica 6.3: Načrt preliminarne testa.	72
Preglednica 6.4: Rezultati preliminarne testa.	73
Preglednica 6.5: Načrt eksperimentov.	74
Preglednica 6.6: Prikaz rezultatov eksperimenta.	75
Preglednica 6.7: Vrednosti regresijskih modelov.	76
Preglednica 6.8: Prikaz p vrednosti za posamezne parametre.	77
Preglednica 6.9: Prikaz p vrednosti za posamezne parametre.	80
Preglednica 6.10: Optimizirani procesni parametri in odzivni veličini.	83
Preglednica 6.11: Rezultati potrditvenega preizkusa.	83

Seznam uporabljenih simbolov

Oznaka	Enota	Pomen
A_2	/	faktor za izračun kontrolnih mej X karte
a_p	mm	globina rezanja
C_m	/	sposobnost stroja
C_{mk}	/	popravljen sposobnost stroja
C_p	/	potencialna sposobnost procesa
C_{pk}	/	indeks centriranosti procesa
C_{ps}	/	sposobnost procesa, za enostransko določen proces, za spodnjo tolerančno mejo
C_{pz}	/	sposobnost procesa, za enostransko določen proces, za zgornjo tolerančno mejo
D	mm	premer obdelovanca
D_3	/	faktor za izračun spodnje kontrolne meje R karte
D_4	/	faktor za izračun zgornje kontrolne meje R karte
f_n	mm/vrt	podajanje
h_m	mm	minimalna globina reza
l	mm	dolžina struženja
m	/	velikost vzorca
MR		razpon med dvema vzorcema
$\overline{MR}$		povprečje razponov (angl. <i>Moving range</i>)
n	min^{-1}	vrtilna hitrost
N	/	število podatkov
r	mm	radij rezalnega robu
P_p	/	dejanska sposobnost procesa
P_{pk}	/	indeks centriranosti procesa
R		razpon vzorca
$\bar{R}$		povprečen razpon vzorca
R_a	μm	aritmetična srednja hrapavost
R_{th}	μm	teoretično izračunana hrapavost
R_q	μm	kvadratična srednja hrapavost profila
R_z	μm	maksimalna višina profila hrapavosti
S		varianca
v_c	m/min	rezalna hitrost
$x_{max.}$		maksimalna vrednost med podatki
x_{min}		minimalna vrednost med podatki
$\bar{x}$		srednja vrednost
$\bar{\bar{x}}$		srednja vrednost srednjih vrednosti
σ		standardni odklon
σ_t		skupna variacija
σ_p		variacija procesa
σ_m		variacija merjenja

Seznam uporabljenih okrajšav

Okrajšava	Pomen
CBN	kubično kristaliziran borov nitrid
CNC	računalniško podprto krmiljenje (angl. <i>Computer Numerical Control</i>)
DOE	načrtovanje eksperimentov (angl. <i>Design Of Experiments</i>)
MSA	Analiza merilnega sistema (angl. <i>Measurement Systems Analysis</i>)
PKD	polikristalični diamant
ppm	na milijon kosov (angl. <i>Parts per million</i>)
ppb	na milijardo kosov (angl. <i>Parts per billion</i>)
P&P	študija ponovljivosti in primerljivosti
$R\bar{V}$	referenčna vrednost
SČ	središčna vrednost
ZKM	zgornja kontrolna meja
ZTM	zgornja tolerančna meja
SKM	spodnja kontrolna meja
STM	spodnja tolerančna meja
SPC	statistična kontrola procesa (angl. <i>Statistical Process Control</i>)

1. Uvod

V podjetju se poleg orodjarstva in livarstva ukvarjajo tudi s strojno obdelavo ulitkov. Osnovni element ulitkov je aluminijeva zlitina, kateri so dodane primesi še ostalih elementov (magnezij, silicij, baker ...). Strojna obdelava poteka na več kot 50 obdelovalnih centrih. Na različnih strojih se obdelujejo različni kosi, namenjeni za avtomobilsko industrijo. Vsaka vrsta obdelancev ima svoje specifikacijske lastnosti, ki so glede na kasnejši namen uporabe tudi primerno tolerančno zaostrene. V magistrski nalogi je predstavljena analiza proizvodnega procesa na obdelovalnem centru, katerega del je CNC stružnica Mori Seiki. Na tej stružnici se serijsko obdelujejo kosi, ki so del ohišja reduktorjev in služijo fiksiranju ležajev. Obdelana mesta, kamor nalegajo ležaji, imajo ozke tolerance v višini dveh stotink milimetra. Pri seriji več kot pol milijona kosov je potrebno zagotoviti stabilen proizvodni proces, ki mora omogočati nemoteno izdelavo želenih izdelkov.

Podjetje je posodobilo obdelovalni center z namenom olajšave dela delavcu, s čimer se je avtomatizirala dodatna priprava obdelanca (spihovanje, raziglevanje) in z namenom krajšanja proizvodnega cikla. Nad kosi, ki se obdelujejo na stroju, se na merilni postaji vrši 100 % dimenzijska kontrola, kar zahteva visok nadzor nad procesom obdelave in posledično tudi izgubo časa.

1.1. Problem

1.1.1. Nestabilnost obdelovalnega procesa

Na obdelovalnem stroju se pojavi problem med proizvodnim procesom, ker stroj ne zagotavlja zadostne stabilnosti v smislu držanja mer obdelancev znotraj tolerančnega območja. Ko je stružnica v polnem teku, so dimenzije obdelancev bodisi znotraj tolerančnega območja bodisi se premikajo proti tolerančnim mejam. Posledica tega je 100 % dimenzijska kontrola na merilni postaji in sprotno korigiranje koordinatni izhodišč rezalnih orodij, kar delavcu predstavlja zamudno dodatno delo. Problem nastane tudi pri zastoju stroja (nenaden zastoj, čiščenje, malica ...) in posledično njegovi ohladitvi, saj takoj po zastoju in ponovnem zagonu dimenzije znatno odstopajo, s čimer se ustvarja izmet in posledično izguba.

1.1.2. Ovalnost obdelancev

Pri obdelovalnem procesu na CNC stružnici Mori Seiki se pojavlja problem ovalnosti (neokroglosti) kosov. Ovalna oblika kosa nastane, ko vpenjalna sila deformira surovca pri vpetju v vpenjalno pripravo. Zaradi oblike surovca (več različnih zunanjih in notranjih premerov) pride po smeri in velikosti do različnih deformacij, kar otežuje obdelovalni proces in dimenzijsko zagotavljanje znotraj tolerančnega območja.

1.2. Cilj

Kosi, ki se obdelujejo na opazovani obdelovalni celici, imajo zaostreno tolerančno območje. Stružnica zaradi svoje starosti oz. obrabljenosti težko zagotavlja ustreznost obdelovalnega procesa in težko sledi kakovostnim zahtevam kupca glede kosa. Z vgradnjo modula v stroj in opazovanjem različnih parametrov se poskuša zagotoviti nemoteno obdelavo. Za dane kose ima podjetje velika naročila in bi z rešitvijo zgornjih problemov lahko znatno olajšali potek proizvodnega procesa. Cilj magistrske naloge je, da se pri CNC stroju analizira problem odstopanja dimenzij in ta problem z različnimi pristopi eliminira.

Cilj teoretičnega dela naloge je predstaviti metodo statistične kontrole procesa (angl. *SPC-Statistical Process Control*), opisati osnove statistične analize procesa in razložiti veličine, ki se tu pojavljajo. V teoretičnem delu se bo predstavila tudi analiza merilnega sistema. Merilni sistem igra v proizvodnem procesu ključno vlogo, saj na podlagi rezultatov, ki nam jih merilni sistem nudi, sklepamo o kakovosti proizvodnega procesa.

Za odpravljanje zgoraj opisanih problemov se v eksperimentalnem delu uporabi različne pristope. Po vgradnji korekcijskega sistema se izvede test, iz česar se sklepa ali je vgrajen korekcijski sistem sploh primeren za rešitev danega problema. Ker se je pojavil sum netočnosti stroja, se izvede umerjanje, na podlagi katerega se lahko sklepa o točnosti stroja. Zaradi ovalnosti kosov je bil cilj načrtovati eksperiment, kjer bi ugotovili vplivnost posameznih parametrov (vpenjalno silo, globino rezanja, podajanje) za sprejemljivo ovalnost ob čemer ne bi vplivali na dolžino obdelovalnega cikla.

Cilj eksperimentalnega dela naloge je uporaba različnih orodij kakovosti za stabilizacijo in izboljšanje sposobnosti obdelovalnega procesa.

2. Teoretične osnove

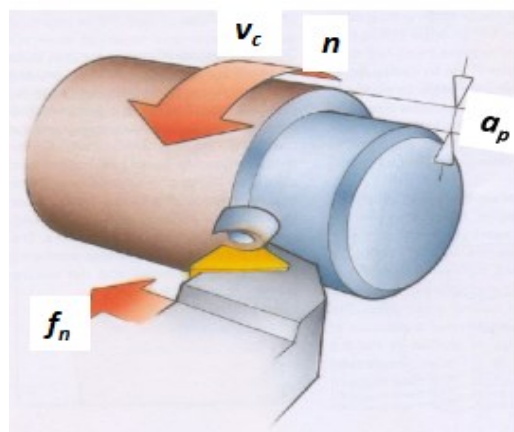
V poglavju teoretičnih osnov so predstavljene in povzete ključne metode, elementi ki so del eksperimentalnega dela magistrske naloge.

2.1. Struženje

Struženje uvrščamo med konvencionalne, enorezilne in neprekinjene postopke odrezavanja, kjer opravlja glavno krožno gibanje obdelovanec, orodje pa opravlja podajalna gibanja. Podajalno gibanje je izvedeno vzdolž osi obdelovanja. V nekaterih aplikacijah je lahko obdelovanec nepremičen in je obdelan med krožnim gibanjem obdelovalnega orodja, ampak v osnovi je delovanje še vedno enako. Zaradi osnovnega krožnega gibanja obdelovanja, so obdelovanci izdelani s struženjem večinoma osnosimetrični, njihova končna oblika pa je rezultat rotacije [1].

Proces struženja, poleg še ostalih dejavnikov kot so stroški, obdelovalni pogoji, zahteve, variira glede na obliko in material obdelovanja s tipi operacij [1]:

- vzdolžno (notranje, zunanje) struženje
- čelno struženje
- oblikovano struženje
- profilno struženje
- struženje navojev



Slika 2.1: Grafični prikaz struženja [2].

Osnovni parametri struženja:

- a_p = globina rezanja [mm]
- n = vrtilna hitrost obdelovanja [min^{-1}]
- v_c = rezalna hitrost [m/min]
- f_n = podajanje [mm/vrt]
- l = dolžina struženja [mm]
- D = premer obdelovanja [mm]

Vsak izmed parametrov struženja ima svoj doprinos k obrabi orodja. Globina rezanja vpliva na rezalne sile, ki se koncentrirajo na rezalnem robu in vplivajo na njegovo obrabo. Velikost vrtilne hitrosti obdelovanja je določena preko vrtilne hitrosti vretena in je poleg še ostalih veličin povezana z rezalno hitrostjo. Pri večji rezalni hitrosti hitreje dosežemo kritično obrabo orodja. Podajanje ima najbolj pomemben vpliv na kakovost površine v smislu hrapavosti [3, 4].

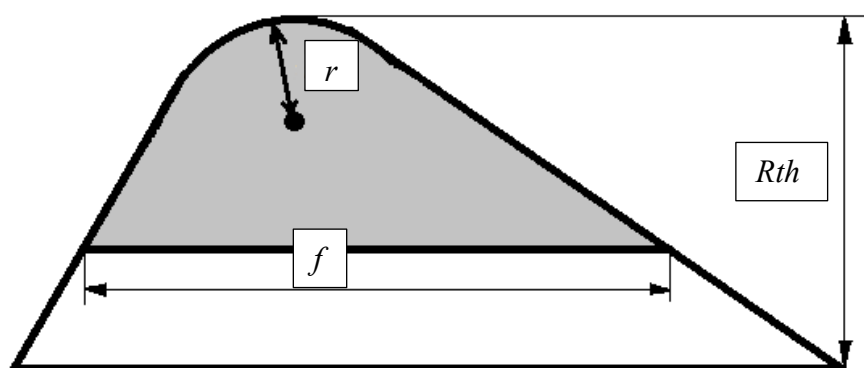
2.1.1. Hrapavost površine

Na izdelku se kot na izhodu obdelovalnega procesa opazujeta dve stvari. To sta ustrezna dimenzija in kakovost obdelane površine. Kakovost obdelane površine se preverja preko poškodovanosti, poroznosti in hrapavosti.

Hrapavost je najpomembnejši parameter za popis kakovosti obdelane površine pri odrezavanju. Parameter hrapavosti površine nam pove velikost in obliko meritve mikropovršinske hrapavosti in tako predstavlja tehnično zahteven problem. Najpomembnejše veličine pri merjenju hrapavosti [5]:

- R_z – maksimalna višina profila; je razlika med najvišjim vrhom in najnižjo dolino v vzorčni dolžini profila
- R_a – aritmetična srednja hrapavost
- R_q – kvadratična srednja hrapavost profil

Pri odrezovalnem postopku lahko zaradi geometrije konice orodja, parameter hrapavosti tudi izračunamo [5].



Slika 2.2: Konica rezalnega orodja in veličine za izračun teoretične hrapavosti [5].

Iz slike 2.4 dobimo naslednjo enačbo za izračun teoretične hrapavosti [5]:

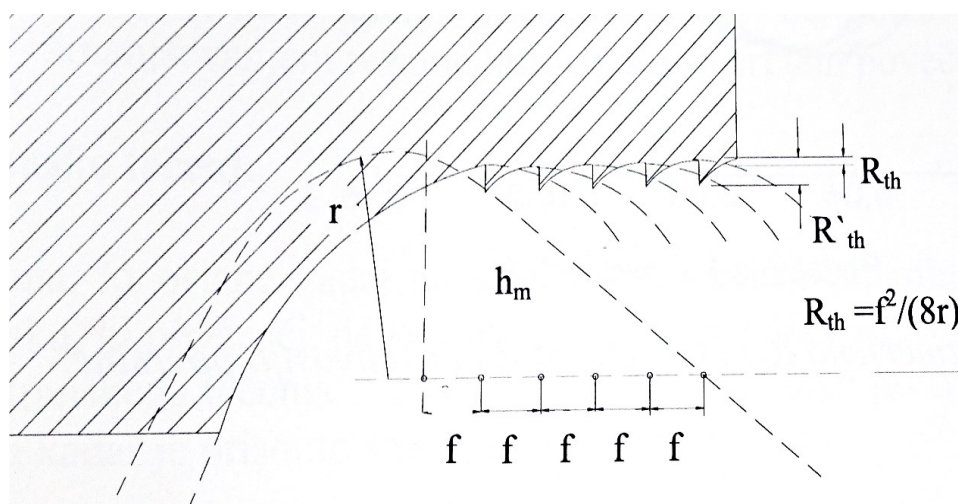
$$R_{th} = \frac{f^2}{8 \cdot r} \quad (2.1)$$

R_{th}teoretična hrapavost

fpodajanje

rradij rezalnega rob

Pri enačbi 2.1 ni upoštevan material, ki ostaja na obdelani površini zaradi minimalne globine rezanja.



Slika 2.3: Ostanek materiala za minimalne globine rezanja h_m [5].

Če upoštevamo še ta ostanek materiala dobimo naslednjo končno enačbo za izračun teoretične hrapavosti (2.2):

$$R'_{th} = \frac{f^2}{8*r} + \frac{h_m}{2} * \left(1 + \frac{r*h_m}{2}\right) \quad (2.2)$$

fpodajanje

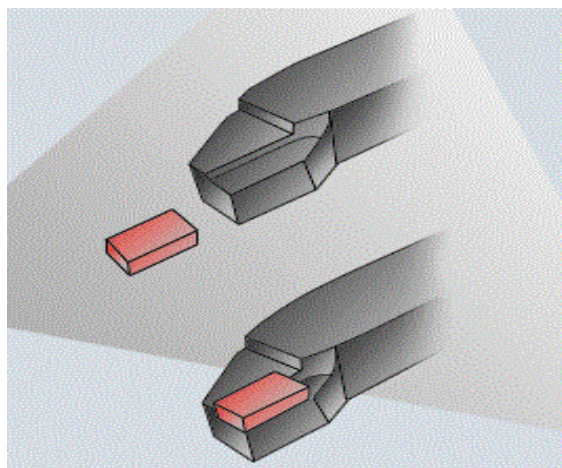
rradij rezalnega rob

h_mminimalna globina rezanja

S pomočjo zgornje enačbe (2.2), lahko že pred procesom obdelave predvidimo kakšno hrapavost bomo dobili in na podlagi tega prilagodimo procesne parametre. Enačba (2.2) potrjuje, kar je že znano iz teorije in to je, da na hrapavost površine najbolj vplivata podajanje in radij rezalne ploščice [6].

2.1.2. Orodja za struženje

Rezalno orodje pri struženju je sestavljeno iz dveh delov. Sestavljata ga rezilo in držalo rezila, s katerim so orodja vpeta v stroj. Rezilo in držalo sta lahko sestavljena ali pa neločljiva. V neločljivem primeru sta lahko rezilo in držalo iz rezalnega materiala, ali pa imamo bolj pogost način, kjer je rezilo privarjeno, prispajkano na držalo. Drug primer, kje sta rezilo in držalo ločena, pa je bolj uporaben. Rezalna ploščica je z mehansko zvezo pritrjena na držalo. Ima več rezalnih robov in se lahko menjajo. Ker ima več rezalnih robov, nam omogoča, da pri obrabi enega roba ploščico obrnemo in ponovno režemo z drugim robom. Rezalne ploščice razlikujemo po obliki, načinu vpetja in načinu lomljenja odrezkov.



Slika 2.4: Prikaz neločljive zveze rezila in držala orodja [7].



Slika 2.5: Sestavljena zveza rezalne ploščice in držala [7].

2.1.2.1. Rezalni materiali

Za ustrezno kakovost obdelane površine ima poleg oblike rezalnega robu ključno vlogo rezalni material, ki tvori rezalni del orodja. Rezalni material izberemo glede na vrsto materiala, ki ga obdelujemo in mora za doseganje ustrezne kakovosti obdelane površine ustrezati določenim zahtevam. Trdnost in trdota rezalnega materiala morata biti večja kot pa trdnost in trdota obdelovalnega materiala. Poleg trdnosti in trdote je pomembna tudi žilavost materiala, zaradi katere je rezalno orodje odpornejše na vibracije in sunkovite obremenitve [2].

Rezne materiale na splošno delimo v več skupin [1]:

- orodna jekla
- hitrorezna jekla
- steliti
- ukon
- karbidna trdnina
- oslojeni rezalni material
- kermeti
- rezalna keramika
- polikristalinični materiali
 - PKD-polikristalični diamant
 - CBN-kubično kristaliziran borov nitrid

V magistrski nalogi je predstavljena obdelava surovcev iz aluminijevih zlitin. Za obdelavo te vrste materiala uporabljamo rezalne materiale iz polikristaličnega diamanta (PKD). Rezne ploščice so lahko dvoslojne, pri katerih je sloj PKD nanesen na podlago iz karbidne trdnine in enoslojne, kjer je celotna rezalna ploščina iz polikristaličnega diamanta. Diamant ima zaradi specifične oblike kristalne rešetke največjo trdoto in odpornost na obrabo. Glavna značilnost je njegova trdota in toplotna prevodnost, ki ni primerljiva z nobenim drugim materialom. Zaradi tega ima veliko odpornost proti obrabi, je pa zelo občutljiv na sunkovite obremenitve in ima majhno upogibno trdnost [8].

Ker je obdelovalni material iz aluminijevih zlitin in so polikristalične diamantne rezalne ploščice najbolj odporne na obrabo, smo pri analizi stabilnosti obdelovalnega procesa že v začetku eliminirali možne vzroke za nestabilnost, ki bi jih povzročila obraba orodja.

2.2. Statistična kontrola procesa (SPC)

Zagotavljanje kakovosti temelji na sistematičnem odkrivanju vzrokov, zaradi katerih slaba kakovost sploh nastaja. Najprej mora produkt ustrezati zahtevam, ki so bile podane s strani kupca. Ko smo zadostili zahtevam kupca, moramo doseči še stabilnost proizvodnega procesa in njegovo ponovljivost. Doseganje stabilnosti in ponovljivosti procesa pomeni, da zmanjšamo variabilnost nominalnih karakteristik. Variabilnost proizvodnega procesa je posledica različnih dejavnikov [9]:

- variacija stroja, linije
- variacija vhodnega materiala
- variacija uporabe različnih metod
- variacija merjenja
- variacija operaterja
- variacija parametrov okolja

2.2.1. Osnove statistične kontrole procesa

Statistična kontrola procesa (ang. SPC-*Statistical Process Control*) je metoda, ki omogoča doseganje visoke stabilnosti in sposobnosti procesa in je metoda, s katero ugotovimo, ali se opazovana karakteristika na določenih produktih nahaja znotraj že vnaprej določenih meja. Je nepogrešljivo orodje za sodobno proizvodno podjetje, ki stremi k zagotavljanju in višanju kakovosti proizvodov.

Cilj SPC-ja ni doseči popolnosti procesa, ampak sprejemljivo oz. primerno in gospodarno stanje nadzora. Koncept metode je v zbiranju preteklih podatkov, s katerimi se lahko popiše obnašanje procesa v preteklosti. Na podlagi le-teh lahko predpostavimo, kako se bo proces obnašal v prihodnosti. Njen pristop je računski oz. grafični prikaz, npr. prikaz procesa s kontrolnimi kartami, preko katerih lahko spremljamo najbolj vplivne procesne parametre oz. karakteristike procesa [9].

SPC nam podaja odgovor glede ustreznosti delovanja določenega procesa.

Prednosti metode so [10]:

- vodenje obvladovanja procesa s spremljanjem procesa in prepoznavanjem napak še preden se pojavijo,
- pomoč pri odkrivanju različnih vzrokov variacij od tistih, ki so naravne za določen sistem,
- doseganje nižjih stroškov na enoto proizvoda in povečanje kapacitete z vpeljevanjem "sistema hitrega odkrivanja napak" z namenom zniževanja izmeta in popravil ter dodelav,
- združevanje vseh tradicionalnih metod odkrivanja za prepoznavanje problemov kakovosti na mestih, kjer je uporabljena.

Orodja za zagotavljanje kakovosti temeljijo na dejstvu, da je največji delež vzrokov za nastanek slabe kakovosti v začetni fazi proizvodnje. Stroški za odpravo napak proizvodov so najnižji v tej fazi proizvodnje in so največji v zadnjih fazi, ko je proizvod že na trgu [11].

2.2.2. Orodja statistične kontrole procesa

V odvisnosti od lastnosti procesa in karakteristik proizvoda ter postavljenih ciljev se lahko v različnem obsegu uporabljajo posamezna statistična orodja in metode za obvladovanje. Metode in tehnike statistike različni avtorji različno razporejajo po težavnostni stopnji [12]. Znotraj metode SPC lahko najdemo številna statistična orodja, s katerimi zmanjšamo variabilnost procesa in izboljšamo njegovo sposobnost.

Osnovna statistična orodja statističnega obvladovanja procesov SPC so opredeljena tudi kot elementarne statistične metode ali sedem osnovnih orodij za obvladovanje kakovosti, ki naj bi jih obvladovali vsi zaposleni v podjetju. Sedem osnovnih statističnih metod se je uveljavilo za zagotavljanje kakovosti in lažje odkritje vzrokov napak [11]:

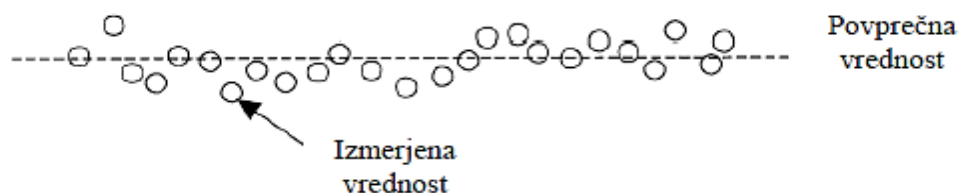
- preglednice in preglednice podatkov
- histogram
- Pareto diagram (ABC diagram)
- časovni diagram in diagrami trendov
- diagram vzrokov in posledic (ribja kost ali Ishikawa diagram)
- nadzorne karte
- diagram porazdelitve

2.2.3. Opisna statistika in statistične veličine

Opisna statistika in statistične veličine nam služijo, da lahko iz niza meritev razberemo dodatne lastnosti merjenega kosa. Najpomembnejše opisne statistike pri SPC-ju so: aritmetična srednja vrednost (imenovana tudi povprečna vrednost), standardni odklon ali standardna deviacija, razpon in porazdelitev vrednosti [13].

2.2.3.1. Srednja vrednost ali aritmetična sredina

Povprečna vrednost meritev je približek prave vrednosti in jo izračunamo tako, da seštejemo rezultate vseh meritev in seštevek delimo s številom meritev. Primer niza izmerjenih vrednosti in njihovo povprečno vrednost je prikazan na spodnji sliki [11]:



Slika 2.6: Niz izmerjenih vrednosti in njihova povprečna vrednost [9].

Povprečno vrednost dobimo iz naslednje enačbe [14]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{N} \quad (2.3)$$

x_i ... zaporedni podatek i , $i=1, \dots, m$

N ... število podatkov

2.2.3.2. Standardni odklon

Pri velikem številu izmerjenih meritev za oceno kvantitativnega raztrosa meritev uporabljamo standardno deviacijo oz. standardni odklon. Standardni odklon niza meritev nam pove, koliko je povprečje razlik posameznih izmerjenih vrednosti od povprečne vrednosti celotnega niza. To je numerična vrednost, ki pokaže tendenco variabilnosti podatkov. Večja vrednost standardnega odklona kaže na večjo variabilnost podatkov kot manjša.

Matematično izraz za standardni odklon zapišemo kot [14]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (2.4)$$

$\bar{x}$... srednja vrednost

x_i ... i-ta izmerjena vrednost

N ... število podatkov

2.2.3.3. Razpon

Razpon je razlika med največjo in najmanjšo opaženo vrednostjo v skupini podatkov. Izračunamo ga po enačbi [14]:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (2.5)$$

x_{max} ... maksimalna vrednost med podatki

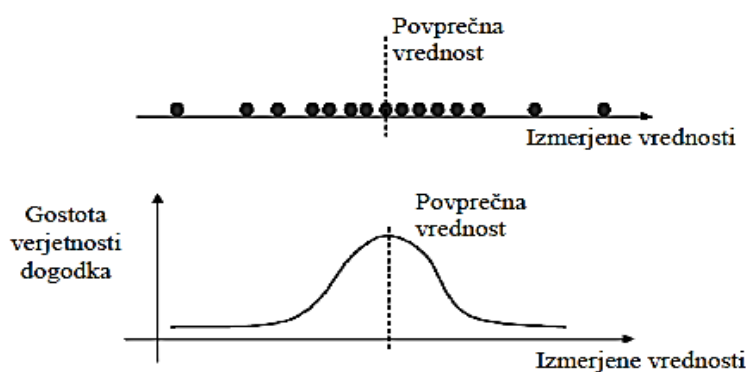
x_{min} ... minimalna vrednost med podatki

Je najbolj enostavna in najhitreje izračunana mera, a manj natančna, ker upošteva le razliko največje in najmanjše vrednosti v raztrosu podatkov. Razpon kot mera variabilnosti pokaže celotno razsežnost variabilnosti podatkov, njegova točnost pa pada z naraščanjem števila podatkov.

2.2.3.4. Porazdelitev verjetnosti

Za določanje karakteristik opazovanih merjenih veličin lahko uporabimo tudi porazdelitev verjetnosti.

Najpogosteje se nahaja največje število meritev vrednosti okoli povprečne vrednosti. Verjetnost, da je meritev zelo oddaljena od povprečja, pa je manjša. Tako porazdelitev imenujemo normalna ali Gaussova porazdelitev. Če je število podatkov in njihovih vrednosti enako nad in pod povprečjem, govorimo o simetrični porazdelitvi, v ostalih primerih pa o nagnjeni porazdelitvi [13].

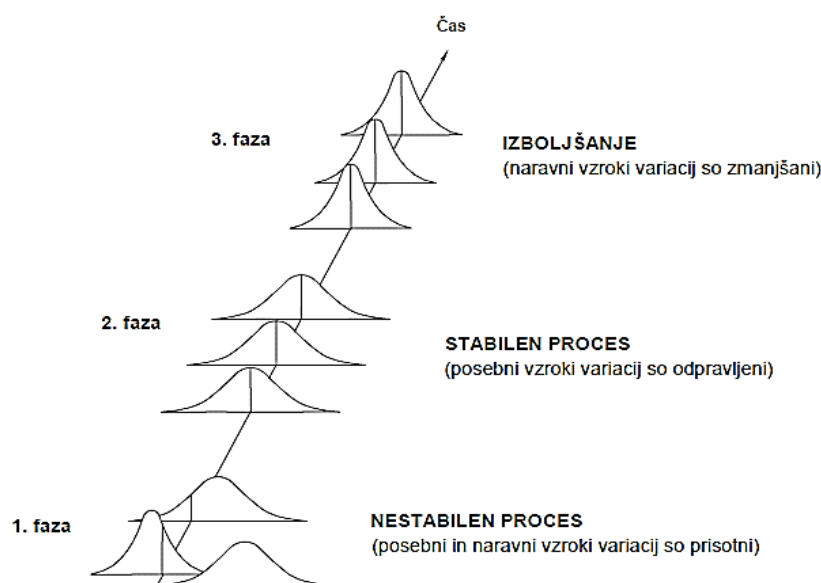


Slika 2.7: Prikaz povprečne vrednosti in porazdelitve vrednosti [11].

2.2.4. Sposobnost in zanesljivost proizvodnih procesov

Potrebno se je zavedati, da je v proizvodnih procesih prisotna variabilnost, ki je ni mogoče izničiti oz. odstraniti. Med različnimi procesi proizvajamo različne proizvode in znotraj istega procesa proizvajamo enake proizvode. Variabilnost procesa je dejavnik, ki vpliva, da se proizvodi znotraj istega procesa lahko razlikujejo med seboj. Poznamo dve vrsti variacij (slika 2.8) [10]:

- normalna variacija: Niti dva produkta si nista enaka zaradi majhnih razlik v materialih, strojih, delavcih in drugih faktorjih. Takemu tipu variacij se ne moremo izogniti. Proces je pod nadzorom, če kaže samo navadne vzroke operacij.
- specifična variacija: To je variacija, ki jo lahko točno definiramo in eliminiramo. Proces je izven nadzora, če kaže specifične razloge za variacije.



Slika 2.8: Vpliv variacij na stabilnost procesa [11].

Različni proizvodi istega procesa nas usmerjajo k spoznanju, da mogoče med produkti obstaja tako velika razlika, da je lahko posamezen produkt istega procesa že izven zahtevanih lastnosti, podanih s strani kupca.

V izogib neustreznim izdelkom in nastalim stroškom se poslužujemo orodij statističnega nadzora, ki nam pomagajo spoznati sposobnost stroja in sposobnost oz. potek procesa.

Osnovni namen SPC-ja je, da prepreči proizvodnjo produkta, ki ne ustreza že vnaprej določenim specifikacijam. V grobem lahko orodja statističnega nadzora procesa razdelimo v dve skupini [10]:

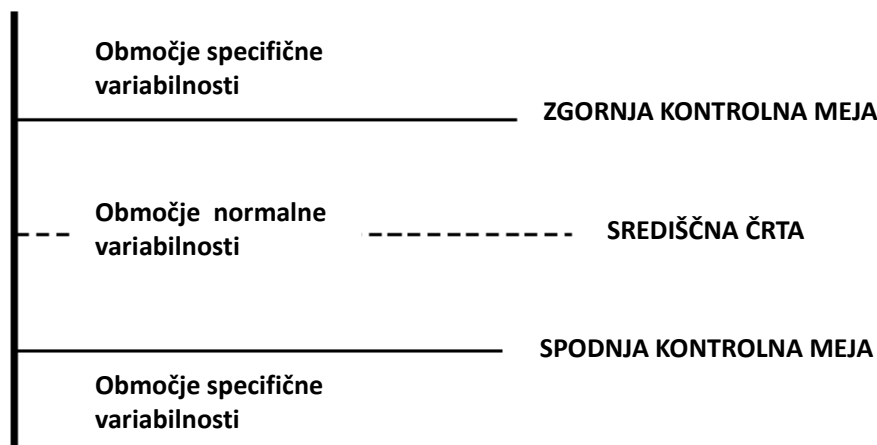
- kontrolne karte
- orodja za proučevanje sposobnosti stroja ali procesa

Bistvena razlika med skupinama se nanaša na čas, v katerem posamezna skupina spremlja oz. napoveduje potek procesa. Namen kontrolnih kart je sprotno oz. trenutno spremljanje proizvodnega procesa, medtem ko orodja za analiziranje sposobnosti stroja ali procesov na podlagi podatkov napoveduje delovanje stroja ali procesa v prihodnosti.

2.2.4.1. Kontrolne karte

Proizvodni procesi so podvrženi različnim dejavnikom, ki v različnih merah in na različne načine vplivajo na proces. To pomeni, da je proces izpostavljen variabilnosti, ki je posledica naključnih in nenaključnih vzrokov. Naključni vzroki so tisti, ki so v proizvodnem procesu vedno prisotni, a nimajo velikega vpliva. Ko je proces podvržen samo naključnim vzrokom, imamo nad njim statističen nadzor. Nenaključni vzroki imajo na potek procesa večji vpliv, kar za posledico nosi, da ga nimamo pod statističnim nadzorom. Lastnost nenaključnih vzrokov je, da so v veliki meri prepoznavni in so zato tudi rešljivi. Stremimo k temu, da se te vzroke in posledice odpravi pred zagonom proizvodnega procesa [15].

Namen uporabe kontrolnih kart je nadzor in izboljšanje procesa s preučevanjem variabilnosti in njenih vzrokov. Cilj uporabe kontrolnih kart je vršenje nadzora nad procesom in sprejemanje ukrepov za njegovo izboljšanje na podlagi dobljenih podatkov. So ena izmed najpogostejših uporabljenih orodij pri procesu statistične kontrole.



Slika 2.9: Osnovna oblika kontrolne karte [10].

Nadzorujemo lahko poljubno karakteristiko izhoda procesa, zato jih delimo na kontrolne karte za spremenljivke in kontrolne karte za attribute. Pri kontrolnih kartah za spremenljivke imamo opravka s karakteristikami z numeričnimi vrednostmi (dolžina, teža, tlak ...) Pri kontrolnih kartah za attribute pa imamo opravka s karakteristikami, ki nosijo kvalitativne vrednosti (dober/slab, gre/ne gre, sprejemljivo/nesprejemljivo) [13].

Ker smo pri nalogi uporabili samo kontrolno karto za spremenljivke, bo v nadaljevanju podrobneje predstavljena ta vrsta kontrolnih kart.

Kontrolna karta za spremenljivke

Kontrolne karte za spremenljivke vsebujejo kvantitativne podatke in v primerjavi s kartami za attribute nosijo več informacij kot samo podatek o npr. sprejemljivosti/nesprejemljivosti. Zbiranje variabilnih podatkov je za razliko od atributivnih podatkov dražje, a pridemo zaradi manjšega števila vzorca hitreje do rezultata in presoje ter napovedi o kvaliteti poteka procesa [13].

V osnovi se kontrolno karto izdela na sledeč način [12]:

1. Izbor kontroliranih karakteristik
2. Izbor veličin v zvezi z vzorcem:
 - a) velikost vzorca
 - b) število vzorcev
 - c) interval jemanja vzorcev
3. Izračun statistike za osrednjo tendenco in razprostrtosti R oziroma standardno deviacijo vzorca S

4. Izračun aritmetične sredine aritmetičnih sredin (veliko povprečje) in povprečja oziroma iz podatkov vzetih vzorcev
5. Izračun kontrolnih meja
6. Analiza vrednosti aritmetičnih sredin in razponov oziroma standardne deviacije vzorca z ozirom na izračunane kontrolne meje
7. Analiza ekonomske sprejemljivosti kontrolnih meja
8. Uporaba kontrolne karte za nadzor redne proizvodnje

X karta

X karto uporabljamo, ko opazujemo srednjo vrednost v procesu in je zato imenovana tudi karta povprečja. Karta je sestavljena iz središčne linije in dveh črt, ki predstavljata zgornjo in spodnjo kontrolno mejo.

Središčna črta je povprečje posameznih povprečij vzorcev procesa. Izračunamo jo po enačbi [14]:

$$S\check{C} = \bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (2.6)$$

$\bar{\bar{x}}$središčna črta

$\bar{x}_m$...srednja vrednost m-tega vzorca

mvelikost vzorca

Zgornji (ZKM) in spodnji (SKM) kontrolni liniji za X karto izračunamo po enačbi [14].

$$ZKM = \bar{\bar{x}} + A_2 * \bar{R} \quad (2.7)$$

$$SKM = \bar{\bar{x}} - A_2 * \bar{R} \quad (2.8)$$

$\bar{\bar{x}}$središčna črta

A_2koeficient, ki je odvisen od velikosti vzorca in ga dobimo iz preglednice [13]

$\bar{R}$povprečen razpon vzorca

R karta

Za izris kontrolnih linij potrebujemo oceno standardne deviacije, ki jo dobimo iz razponov med m številom vzorcev. Razpon dobimo iz enačbe 2.9. Če imamo $R_1, R_2, \dots, R_m$, posamezne razpone med m številom vzorcev, dobimo enačbo povprečja razpona, ki predstavlja tudi centralno linijo R-karte [14].

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (2.9)$$

R_m ...posamezen razpon med dvema vzorcema

mvelikost vzorca

Zgornji (*ZKM*) in spodnji (*SKM*) kontrolni liniji za *R* karto izračunamo po enačbi [14].

$$ZKM = D_4 * \bar{R} \quad (2.10)$$

$$SKM = D_3 * \bar{R} \quad (2.11)$$

D_3, D_4 sta koeficienta, ki jih dobimo iz preglednice [13].

$\bar{R}$povprečen razpon vzorca

***I-MR* karta**

»Individual moving range karta« oz. karta posameznih odčitkov je karta, kjer spremljamo posamezne odčitke opazovane spremenljivke in razpon med opazovanim in predhodnim odčitkom [12]. Celotna karta je sestavljena iz dveh kart, kjer je prva karta klasična *X*-karta, druga pa je karta, kjer opazujemo potek razpona med posameznimi zaporednimi odčitki.

Posamezen razpon izračunamo iz naslednje enačbe [16]:

$$MR_i = |x_m - x_{m-1}| \quad (2.12)$$

x_i*i*-ta vrednost opazovane spremenljivke

x_{i-1} ...*i*-1-ta vrednost opazovane spremenljivke

Za *m* število odčitkov imamo *m-1* število razponov. Povprečje razponov $\overline{MR}$ izračunamo iz enačbe (2.13), ki predstavlja tudi sredno linijo na karti drsečih razponov [17]:

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=2}^m MR_i}{m-1} \quad (2.13)$$

MR_i*i*-ti razpon

m.....število odčitkov

Razpon ima vedno absolutno vrednost, zato je lahko sklepamo, da bo spodnja kontrolna meja drsečih razponov enaka 0. Zgornjo kontrolno mejo pa dobimo iz naslednje enačbe [15]:

$$ZKM = D_4 * \overline{MR} \quad (2.14)$$

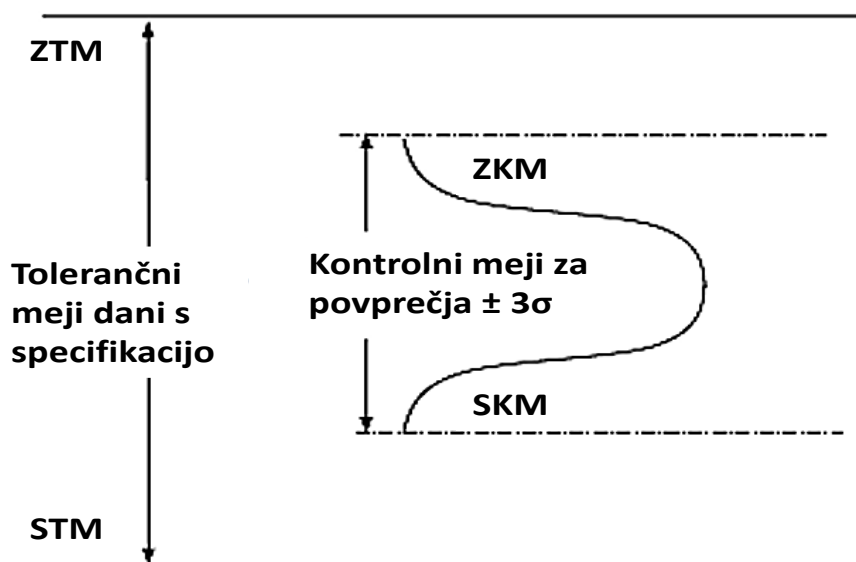
D_4koeficient, ki ga dobimo iz preglednice [13].

$\overline{MR}$povprečje razponov

Odnos med tolerančnimi, procesnimi in kontrolnimi mejami

Na osnovi statistike vzorca izračunamo položaj kontrolnih meja. Že vnaprej podane specifikacijske zahteve izdelka nam določajo tolerančne meje in posledično velikost variacij, ki so za izdelek še sprejemljive. Kontrolne meje interpretiramo podobno kot pri procesnih mejah, vendar se položaj na karti razlikuje, ker procesne meje izračunamo na osnovi statistike vzorcev. Procesne meje določamo iz pogostnostne porazdelitve. Velikost vzorca

mora biti večja od 50 proizvodov, kar rezultira v povečanih stroških in povečani količini časa, da dobimo rezultat. Da bi nadzor bil bolj učinkovit, bi bilo bolje vzeti iz procesa manjše število vzorcev in v pogostejših intervalih. Idealen odnos med tolerančnima, procesnima in kontrolnima mejama prikazuje spodnja slika [10].



Slika 2.10: Prikaz tolerančnih in kontrolnih mej [11].

Ko obvladujemo vse vplive na proces, lahko spreminjamo zgornje in spodnje kontrolne meje. Pri celovitem poznavanju vzrokov, ki vplivajo na variabilnost procesa, je zaradi poznavanja procesa in njegovega obvladovanja možno ožiti meje. Na osnovi preračuna sposobnosti se odločamo o spremembah zgornjih in spodnjih kontrolnih meja, to pomeni, da na podlagi različnih izboljšanj procesa, ki so posledica določenih ukrepov na stroju, lahko zožimo kontrolne meje [14].

2.2.4.2. Sposobnost procesa in stroja

V proizvodnji je ključnega pomena dobro poznavanje procesa in stroja. Na podlagi poznavanja lahko ocenjujemo in napovedujemo obseg variabilnosti ter s primernimi ukrepi preprečimo proizvodnjo neprimernih izdelkov. Sposobnost procesa in stroja ugotavljamo z vzorčenjem izdelkov proizvedenih v dotičnem procesu in stroju še preden smo začeli s proizvodnjo velikih serij.

Zmogljivost stroja C_m in zmogljivost procesa C_p primerja raztros meritev s širino tolerančnega polja na risbi. Razlika med C_m in C_p je odvisna od tega, kako izrazimo vrednosti za standardni odklon: pri sposobnosti stroja C_m izračunamo standardni odklon S na osnovi enega relativno velikega vzorca, medtem ko sposobnost procesa C_p izračunamo na osnovi večjega števila primernih vzorcev, ki podajo dobro oceno vrednosti standardnega odklona σ [10].

Dejansko sposobnost stroja C_{mk} in dejansko sposobnost procesa C_{pk} izraža razlika med standardnim odklonom povprečne meritve in najbližje ležeče tolerančne meje. Podatki za

spodobnost so odvisni od širine tolerančnega polja na risbi. Če imamo izdelke z različnimi tolerancami, moramo določati za vsako tolerančno območje sposobnost procesov in strojev [10].

Sposobnost procesa

Sposobnost procesa merimo s faktorjem sposobnosti procesa C_p . Faktor sposobnosti procesa nam kaže razmerje med širino tolerančnega polja in variabilnostjo procesa [10].

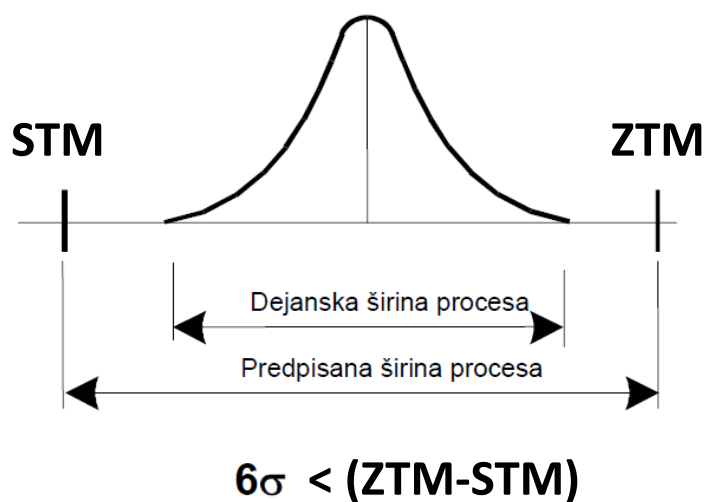
$$C_p = \frac{ZTM - STM}{6\sigma} \quad (2.15)$$

$ZTM - STM$širina procesa

σstandardni odklon procesa

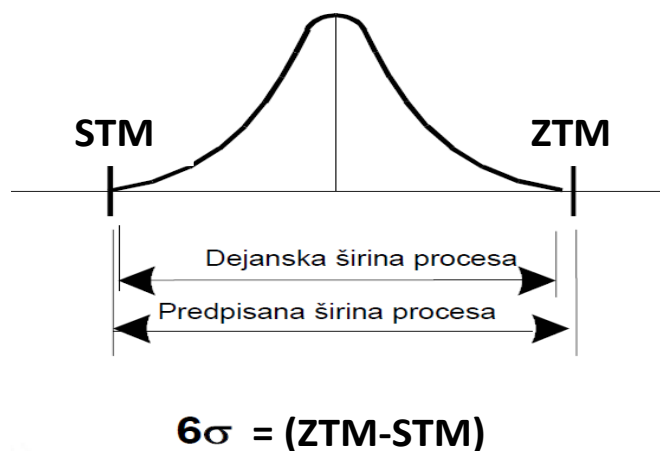
Če primerjamo meje določene s specifikacijo izdelka in raztros, lahko dobimo tri situacije [18]:

- Predpisana širina procesa je znatno širša od dejanske, kar pomeni, da je proces sposoben.



Slika 2.11: Prikaz sposobnega procesa [18].

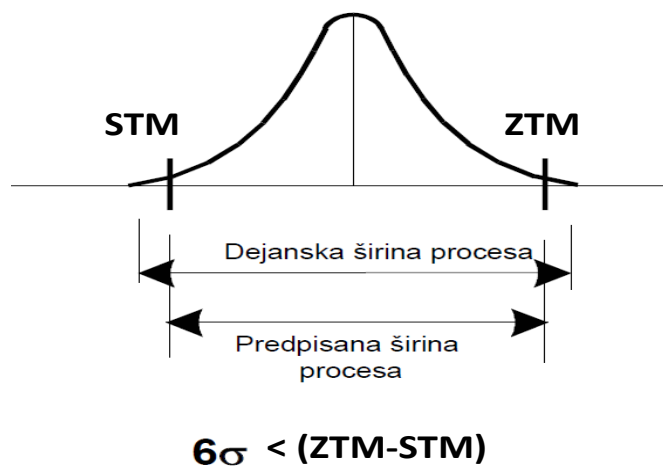
- Dejanska širina procesa je enaka predpisani širini procesa.



Slika 2.12: Prikaz mejno sposobnega procesa [18].

V tem primeru moramo biti pazljivi, ker se ob premiku aritmetične sredine raztrosa proizvodi nahajajo izven tolerančnih meja.

- Dejanska širina procesa je večja kot pa predpisana širina.



Slika 2.13: Prikaz nesposobnega procesa [18].

V tem primeru imamo opravka z nesposobnim procesom, ker dejanska širina procesa sega čez predpisano in imamo lahko izdelke zunaj tolerančnih meja ne glede na premik aritmetične sredine.

Glede na srednjo nazivno mero procesa lahko C_p računamo enostransko ali pa dvostransko. Če ga računamo za enostransko določen proces s spodnjo tolerančno mejo, imamo sledečo enačbo [10]:

$$C_{ps} = \frac{\bar{x} - STM}{3\sigma} \quad (2.16)$$

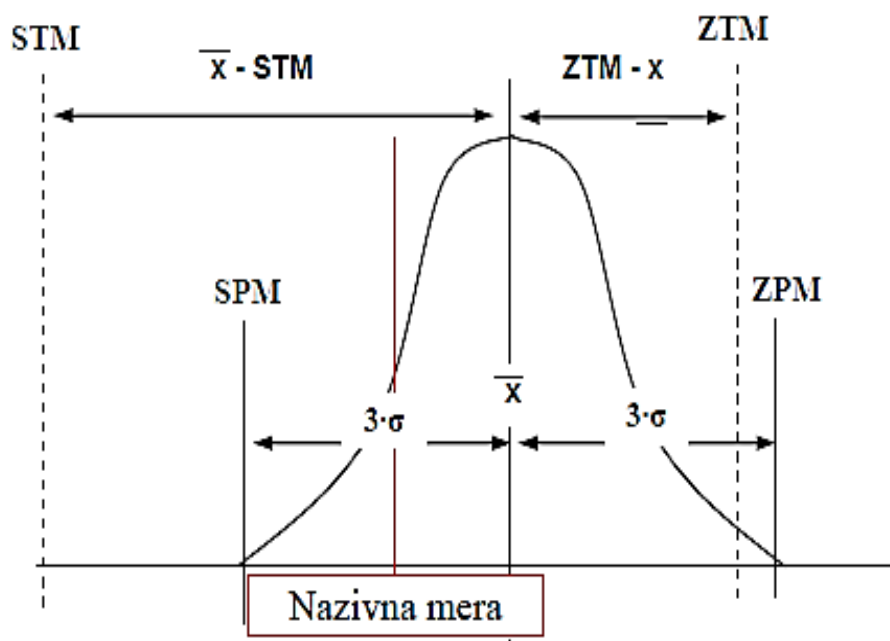
Če ga računamo za enostransko določen proces z zgornjo tolerančno mejo, pa imamo naslednjo enačbo [10]:

$$C_{pz} = \frac{ZTM - \bar{x}}{3\sigma} \quad (2.17)$$

Kritična ali dejanska sposobnost procesa C_{pk} je definirana z razmerjem oddaljenosti srednje vrednosti procesa od najbližje tolerančne meje (ZTM ali STM) in 3σ procesa. C_{pk} velja kot mera sposobnosti procesa in je vedno tista od C_{ps} in C_{pz} , ki ima manjšo vrednost. C_{pk} izrazimo z naslednjo enačbo [10]:

$$C_{pk} = \min(C_{ps}; C_{pz}) \quad (2.18)$$

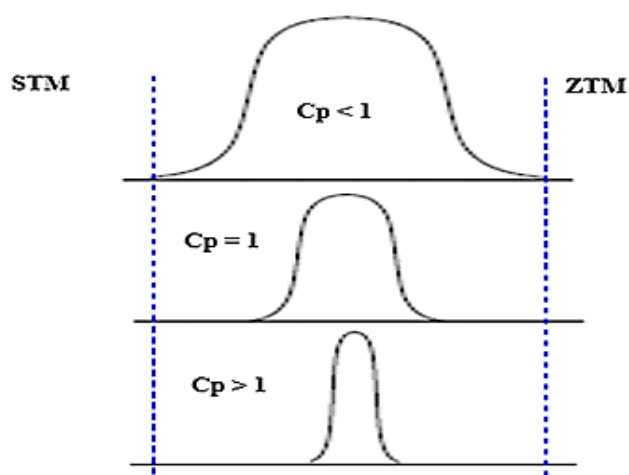
Pokazatelji sposobnosti procesa C_{pk} so razvidni iz spodnje slike (slika 2.14).



Slika 2.14: Grafični prikaz dejanske sposobnosti procesa C_{pk} [18].

Vrednost koeficienta C_p lahko razdelimo v tri območja:

- $C_p < 1$; Če je vrednost koeficienta C_p manjša od 1, pomeni, da imamo opravka z nesposobnim procesom, kjer je variabilnost procesa večja od podanih tolerančnih mej.
- $C_p = 1$; Če je vrednost koeficienta C_p enaka 1, pomeni, da variabilnost procesa enaka predpisani širini procesa.
- $C_p > 1$; Če je vrednost C_p večja od 1, pomeni, da imamo opravka s sposobnim procesom in je variabilnost procesa manjša od tolerančnih meja.

Slika 2.15: Grafični prikaz različnih vrednosti koeficienta C_p [18].

V spodnji preglednici (preglednica 2.1) je razvidna predpostavka, koliko slabih kosov bomo izdelali v proizvodnji, če izračunamo določen koeficient sposobnosti procesa [9].

Preglednica 2.1 :Preglednica vrednosti C_p in pripadajoča količina slabih kosov [9].

C_p	število slabih kosov (ppm-kosov na milijon serije)
0,60	71800
0,90	6900
1,00	2700
1,33	63
1,67	0,6
2,00	2 <i>ppb</i> (kosov na bilijon serije)

Ko je vrednost koeficienta sposobnosti procesa enaka [9]:

- 1,33 govorimo o raztrosu procesa znotraj $1,33 \times 3 \sigma = + - 4 \sigma$
- 1,67 govorimo o raztrosu procesa znotraj $1,67 \times 3 \sigma = + - 5 \sigma$
- 2,00 govorimo o raztrosu procesa znotraj $2,00 \times 3 \sigma = + - 6 \sigma$

Sposobnost stroja

Za razliko od sposobnosti procesa C_p , ki ga dobimo iz izračuna standardnega odklona σ na podlagi večjega števila vzorcev, dobimo sposobnost stroja C_m preko izračuna standardnega odklona S na podlagi enega velikega vzorca.

Sposobnost stroja dobimo iz naslednje enačbe [10]:

$$C_m = \frac{ZTM - STM}{6S} \quad (2.19)$$

Svarianca

V primeru nizkega koeficienta C_m je potrebno odkriti vzroke za veliko variabilnost stroja in posledično izvesti primerne ukrepe, da se variabilnost zmanjša.

V programu Minitab, kjer smo računali sposobnost procesa, se pojavljata dva različna koeficienta za določevanje sposobnosti procesa- C_p oz. C_{pk} in pa P_p oz. P_{pk} . Razlika med C_p in P_p je v tem, da prvi koeficient označuje potencialno sposobnost procesa, medtem ko drugi koeficient označuje dejansko sposobnost procesa.

2.3. Analiza merilnega sistema (MSA)

Analiza merilnih sistemov (angl. *MSA-Measurement Systems Analysis*) je pomemben del metodologije 6sigma in je v celotnem sistemu uvajanja filozofije 6sigma eden ključnih elementov.

Če hočemo izvajati ustrezen proizvodni proces, v katerem nam kot izhod predstavljajo izdelki, ki ustrezajo kupčevim zahtevam, moramo poskrbeti, da vsi elementi v proizvodnem procesu delujejo pravilno.

Imamo proces, ki ga hočemo obvladovati na ravni procesa 6sigma. Po končanem procesu izdelave je potrebno vršiti kontrolo nad izdelkom v izogib odposlanih slabih izdelkov, ki prinesejo s seboj reklamacijo kupcev in velike stroške. Z merilno pripravo premerimo produkt in vidimo, da so vse dimenzije znotraj specifikiranega tolerančnega območja. S tem, ko preverimo in premerimo izdelek, samo predvidevamo, da je izdelek dober, saj lahko v primeru nepoznavanja merilne priprave in njenih tehničnih lastnosti pride do napačnih informacij glede kvalitete izdelka.

Merilni odstop, ki izhaja iz nepoznavanja delovanje merilne priprave, je zelo pomemben dejavnik pri merjenju, ker lahko meritev z neustreznim merilom zavaja in vodi k napačnem sklepu o samem procesu ali izdelku. Analiza merilnih sistemov se v osnovi omeji na statistične analize merilnih sistemov, ki se uporabljajo v izdelovalnem procesu [19].

2.3.1. Variacija merilnega sistema

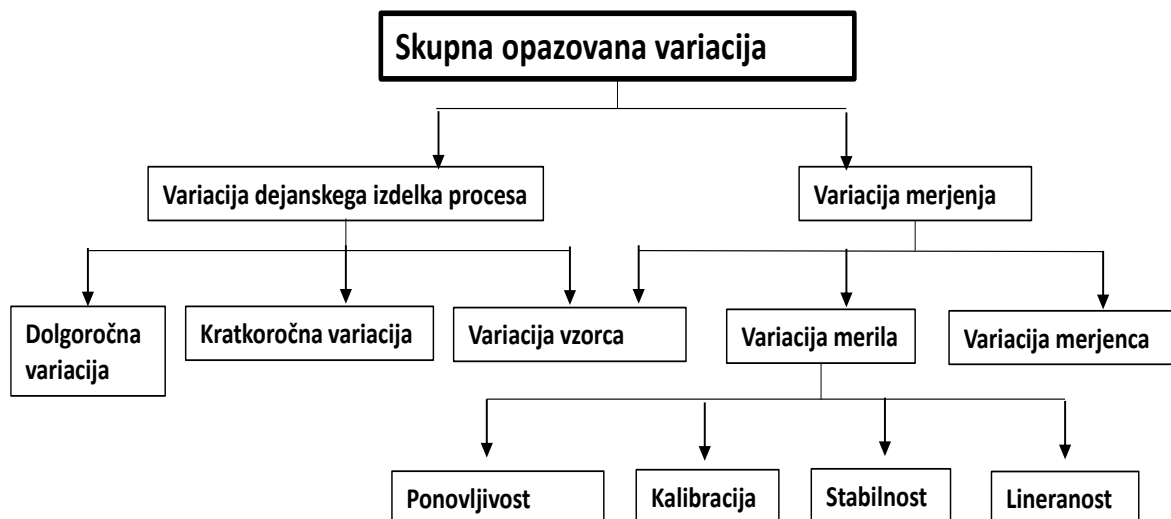
V procesu merjenja imamo različne variacije, ki jih lahko z matematično analizo merilnega sistema predstavimo z naslednjo enačbo [20]:

$$\sigma_t^2 = \sigma_p^2 + \sigma_m^2 \quad (2.20)$$

σ_t skupna variacija

σ_p variacija procesa

σ_m variacija merjenja



Slika 2.16: Diagram skupne variacije [19].

Variacijo merilnih sistemov lahko razdelimo v 5 kategorij [22]:

- stabilnost
- odmik
- linearnost
- ponovljivost
- primerljivost

2.3.1.1. Stabilnost

Stabilnost je celotna variacija meritev merilnega sistema na enem merjencu pri meritvi iste karakteristike v daljšem časovnem intervalu. Stabilnost predstavlja skupno razliko med odkloni skozi daljše časovne obdobje [19]. Za analizo stabilnosti merilnega sistema lahko uporabimo tudi $X-R$ kontrolne karte, iz katerih se lahko jasno prepozna, ali je merilni sistem stabilen ali ne. Možni vzroki za nestabilnost [19]:

- neustrezna kalibracija merila, kalibriranje je potrebno v pogostejših intervalih
- obrabljen merilni inštrument oz. merilna priprava
- zastarelost merila
- slabo vzdrževanje merilnega sistema, zaradi podvrženosti neprimernim pogojem (visoka temperatura, vlaga, vibracije..)
- neprimeren oz. zastaran etalon
- slaba zasnova in izdelava merilnega sistema
- napačna zasnova merilnega procesa

2.3.1.2. Odmik

Odmik je razlika med pravo referenčno vrednostjo in povprečjem izmerkov iste karakteristike na istem produktu in je tudi merilo za točnost oz. sistematično napako procesa [21].

Odmik dobimo iz razlike med povprečjem meritev (enačba 2.21) in referenčno vrednostjo [22].

$$ODMIK = \bar{x} - RV \quad (2.21)$$

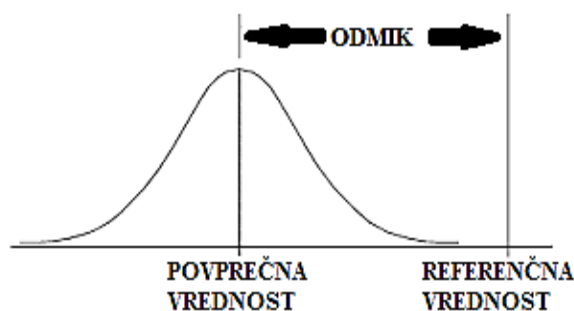
RV.....referenčna vrednost

Kakšen delež nam odmik predstavlja v meritvah, lahko izračunamo iz naslednje enačbe [22]:

$$\% ODMIK = 100 \% * \frac{ABS ODMIK}{PROCESNA VARIACIJA} \quad (2.22)$$

ABS ODMIK.....absolutna vrednost odmika

PROCESNA VARIACIJA.....razlika med povprečjem meritev in absolutnega odmika



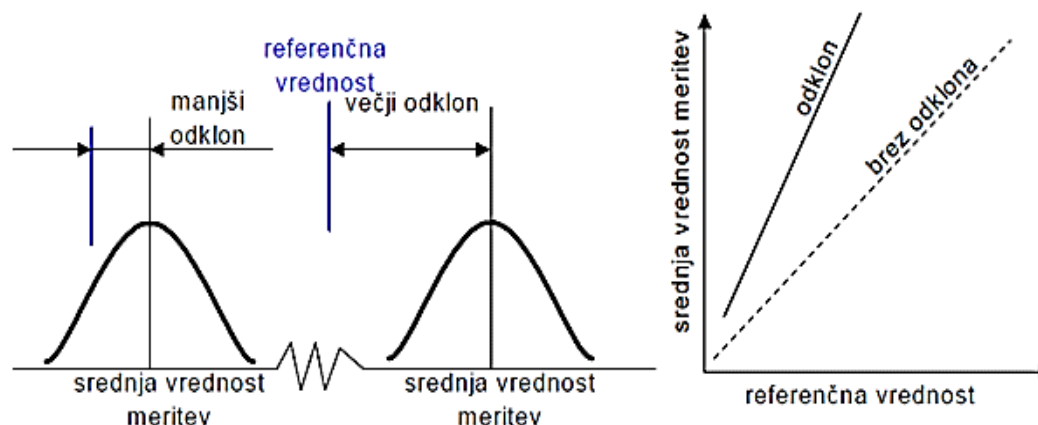
Slika 2.17: Grafični prikaz odmika [22].

2.3.1.3. Linearnost

Linearnost je mera zanesljivosti merilnika na celotnem merilnem območju [21]. Je razlika med odkloni v določenem merilnem območju merilnika.

Možni vzroki za napako linearnosti [19]:

- neustrezna kalibracija merila
- poškodovan merilni inštrument oz. merilna priprava
- star, neprimeren etalon
- zastarelost merila
- slabo vzdrževanje merilnega sistema
- merjenje v neprimernih pogojih (neustrezna temperatura, vlaga, vibracije..)
- neprimeren merilnik za merjenje opazovane karakteristike



Slika 2.18: Grafični prikaz linearnosti [22].

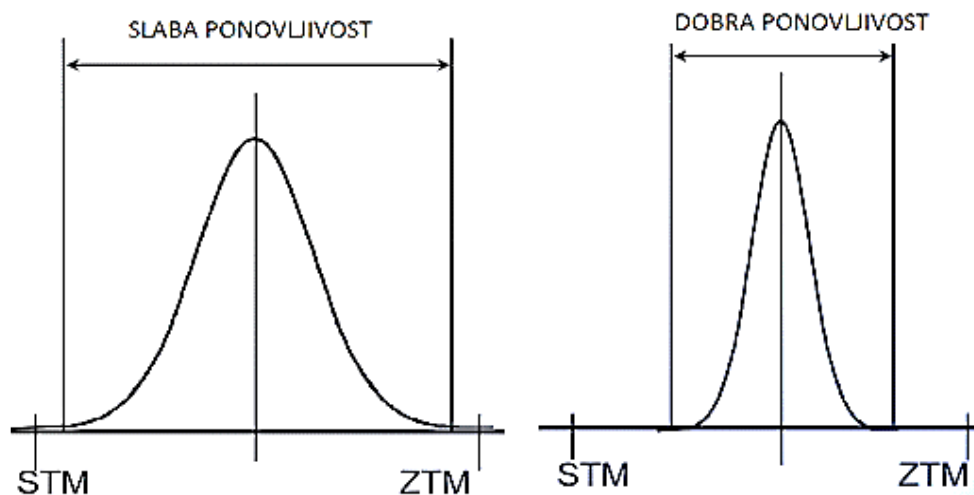
Odmik ali odklon je v merilniku, v različnih merilnih območjih, lahko različen. To pomeni, da je pri nižjih vrednostih merjenja določene karakteristike, če primerjamo z referenčno vrednostjo, odklon lahko večji/manjši, kot pa pri višjih vrednostih. Iz tega sledi, da pri nestalnem odklonu graf ni linearna črta, pač pa druge oblike. Obliko določa razlika med povprečjem vrednosti meritev in referenčno vrednostjo.

2.3.1.4. Ponovljivost

Ponovljivost je definirana kot variacija meritev, ki so bile izvedene s strani istega merilca, na istem merilnem sistemu, ob merjenju iste merilne karakteristike. Predstavlja variacijo oziroma sposobnost celotnega merilnega sistema.

V MSA priročniku Ford/General Motors/Chrysler [21] so navedli, da je definicija ponovljivosti, ki se nanaša samo na variacijo merilnega inštrumenta, zmotna, ampak je ponovljivost variacija celotnega merilnega procesa, kar vključuje točno definiran način merjenja, karakteristike, ki se merijo in pogoje, pod katerim merjenje poteka.

Merilni inštrument oziroma merilna oprema je končni element v verigi merjenja, iz katerega dobimo rezultat merjenja in na katerem je skupek vseh variacij v merilnem procesu. Iz tega sledi, da je definicija, da se ponovljivost nanaša samo na merilno opremo, zmotna.



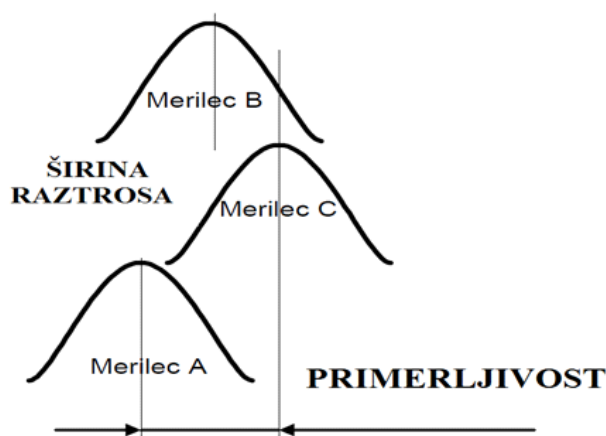
Slika 2.19: Grafični prikaz dobre in slabe ponovljivosti merilnega procesa [22].

Do variacij znotraj merilnega sistema pride zaradi variacij znotraj [19]:

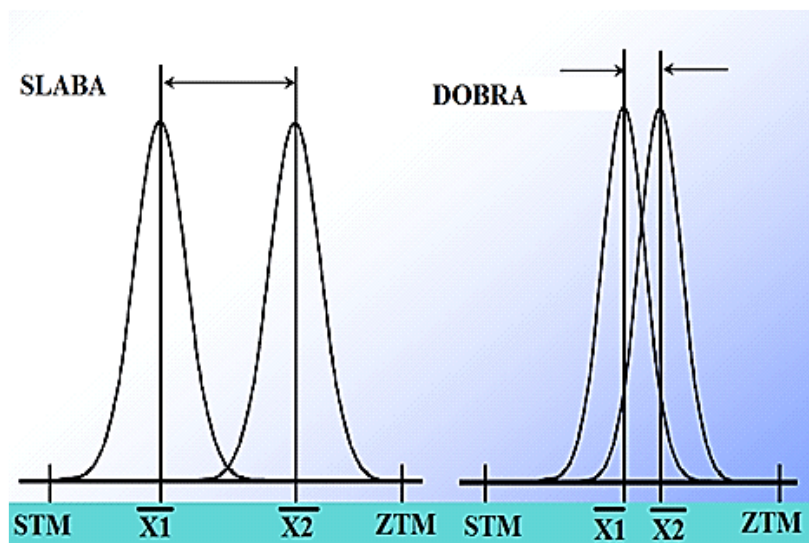
- *merjenca* - enakost merjenca, oblika, kvaliteta merjene površine
- *merila* - napaka merila, slabo vzdrževanje, obrabljenost
- *metode* - način merjenja, variacija ob nastavitvi,
- *merilca* - način merjenja, rokovanje z merjencem, pomanjkanje izkušenj
- *okolja* - različne temperature, vlaga, vibracije

2.3.1.5. Primerljivost

Primerljivost izraža spremenljivost meritev, ki jih izvajajo različni merilci na istem merjencu oz. isto karakteristiko merjenca na istem merilnem inštrumentu. Primerljivost lahko preverjamo tam, kjer se meritve izvajajo ročno. Tam, kjer se meritve izvajajo avtomatsko, je variacija med meritvami minimalna, ali pa je sploh ni [22].



Slika 2.20: Grafični prikaz primerljivosti meritev med različnimi merilci [22].



Slika 2.21: Prikaz med slabo in dobro primerljivostjo meritev [22].

Možne vzroke za napako primerljivosti lahko najdemo med [19]:

- *merjenci*: povprečna razlika, ko merimo različne merjence z uporabo iste merilne opreme, z isto metodo in z istim merilcem;
- *merili*: povprečna razlika pri uporabi različnih meril, ko merimo istega merjenca z istim merilcem pod istimi pogoji;
- *standardi*: povprečen vpliv različnih nastavitev standardov v merilnem procesu;
- *merilci*: povprečna razlika med različnimi merilci, zaradi različnih tehnik merjenja, veščin rokovanja z merili in izkušenosti;
- *okolji*: v različnih okoljih imamo različne pogoje (temperatura, vlaga, vibracije ...), pod katerimi poteka proces merjenja.

Pri študiji ponovljivosti in primerljivosti merilnega sistema lahko pride do sledečih rezultatov [21]:

- Ponovljivost je velika v primerjavi s primerljivostjo:
 - potrebno je preveriti merilo in ga primerno vzdrževati
 - mesto nahajanja merila je potrebno izboljšati
 - obstaja prevelika variabilnost znotraj merjencev
- Primerljivost je boljša v primerjavi s ponovljivostjo:
 - potrebno bi bilo izobraževati merilca
 - izboljšati odčitavanje meritev
 - merilo bi bilo potrebno fiksirati

Razumevanje variacij pri merilnem procesu in razumevanje vpliva prispevka teh variacij, k celotnemu proizvodnemu procesu, mora biti glavno vodilo k reševanju osnovnih problemov. Ko variacije v merilnem sistemu presežejo vse ostale, je potrebno, da se najprej ugotovi te vzroke in odpravi posledice, preden se natančneje analizira še ostale variacije, ki so lahko v proizvodnem procesu prisotne. Ko spregledamo napake v merilnem sistemu, se osredotočamo na druge variacije, kar pa povzroča izguba časa, nepotrebne zastoje in posledično velike izgube [19].

Merilni sistem predstavlja skupek posameznih elementov, ki so del merilnega procesa. Sistem zaobjema merila, merilca, merilno metodo, merilne pogoje...Vsi ti elementi skupaj tvorijo sistem, katerega cilj je zagotavljanje kakovosti izdelkov.

Z merilnim sistemom ne proizvajamo kakovostnih izdelkov, ampak preverjamo proizvodni proces in na podlagi rezultatov, ki nam jih merilni sistem ponuja, primerno ukrepamo.

Analiza merilnega sistema služi, da popolnoma obvladujemo merilni proces in posledično tudi proizvodni proces, kar za posledico nosi zaupanje kupcev.

3. Obstoječi proizvodni proces

Magistrska naloga temelji na opazovanju in analizi obdelovalnega procesa izdelka ohišja ležaja (slika 3.1), ki se obdeluje na obdelovalni celici, ki jo tvorijo CNC stružnica in dva posluževalna robota. V nadaljevanju je v celoti predstavljen proizvodni proces.

3.1. Obdelovanec

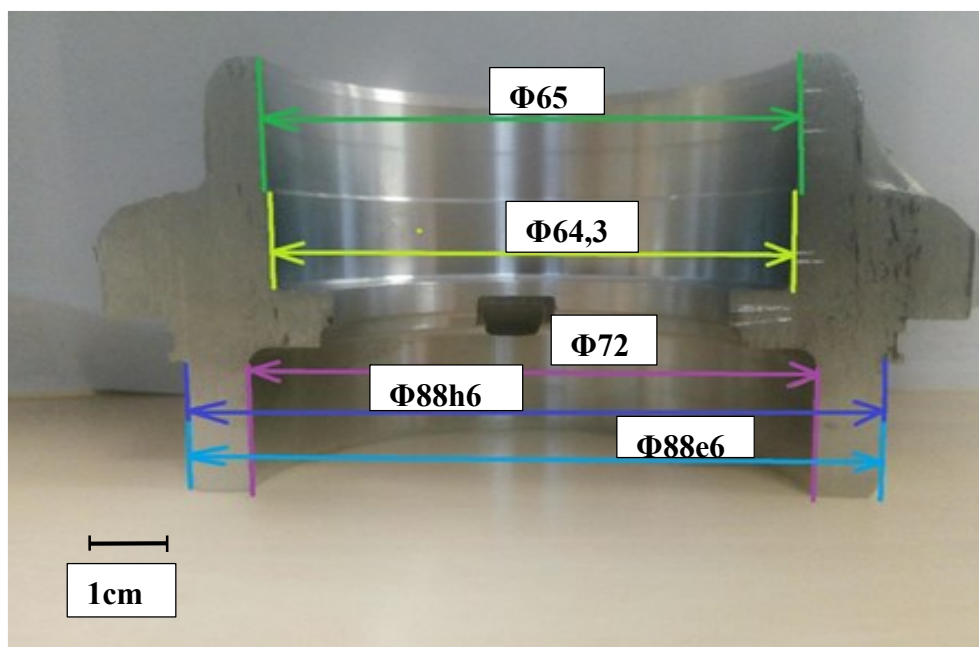
Izdelek služi za uležajenje ležajev in je, zaradi ozkega tolerančnega območja zahteven za obdelavo. Ležajno ohišje ima 5 ključnih premerov za končno uležajenje in montažo (slika 3.2).

Izdelek se izdeluje z vzdolžnim notranjim in zunanjim struženjem ter s prečnim struženjem. Za obdelavo se uporablja PKD ploščice, katerih obraba je pri obdelavi aluminija zanemarljiva. Zanemarljivo obrabo smatramo kot obrabo, ki za nestabilen proces ne predstavlja ključne vloge.



Slika 3.1: Ležajno ohišje.

Na sliki 3.2 je prikazanih pet premerov, ki so na izdelku funkcijsko najpomembnejši in so 100 % kontrolirani na posebni merilni postaji. Izdelani so v tolerančnem območju dveh stotink milimetra. Ostale dimenzije imajo širše tolerančno območje, zato ni potrebe po 100 % kontroli, pač pa se jih preverja dvakrat na izmeno.



Slika 3.2: Prerez ležajnega ohišja.

Preglednica 3.1: Preglednica tehnoloških parametrov in ploščic za obdelavo.

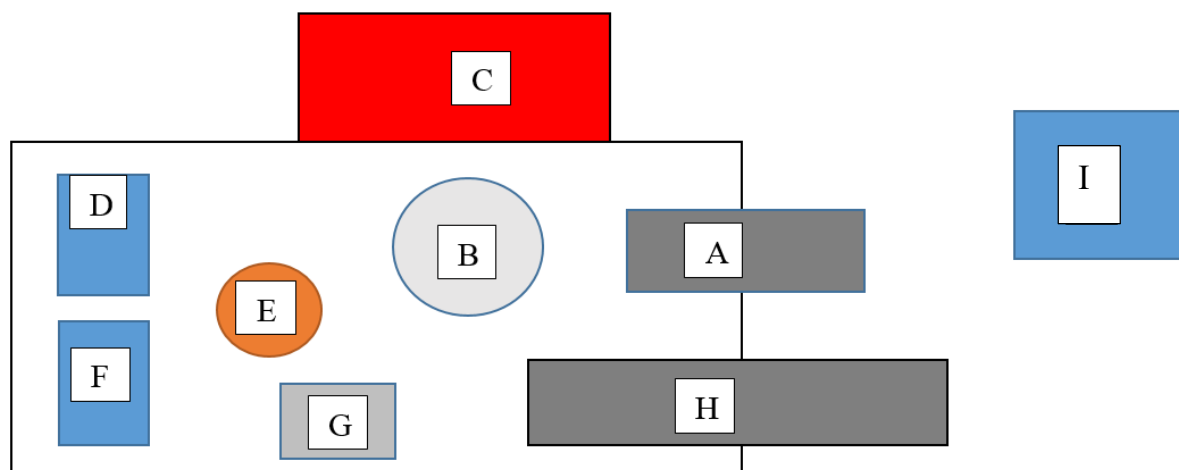
premer [mm]	rezalna ploščica	f_n [mm/vrt]	a_p [mm]
Φ 64,3	DCMW 11T304	0,08	0,37
Φ 65	DCMW 11T304	0,08	0,37
Φ 72	DCMW 11T304	0,08	0,37
Φ 88e6	CCGW11T308	0,12	0,37
Φ 88h6	CCGW11T308	0,12	0,37

V zgornji preglednici 3.1 so prikazani parametri in rezalne ploščice s katerimi se obdeluje obdelanec.

Pri izdelavi teh izdelkov je potrebna velika pozornost s strani operaterjev, da je obdelovalni stroj med proizvodnim procesom vedno ogret na delovni temperaturi, v nasprotnem primeru so obdelanci lahko izven tolerance in predstavljajo izmet ter posledično stroške. Težavo predstavljajo nenadni zastoji, zastoji za malice, ki vplivajo na delavno temperaturo stroja. Poskrbeti je potrebno, da dejavniki iz okolice, kot so temperatura prostora ali vibracije, čim manj vplivajo na proces izdelave.

3.2. Obdelovalna celica

Obdelovalna celica sestoji iz dveh delov (slika 3.3, slika 3.4). Prvi del predstavlja okolje stroja in je povezava med operaterjem in CNC obdelovalnim strojem, ki predstavlja drugi del.



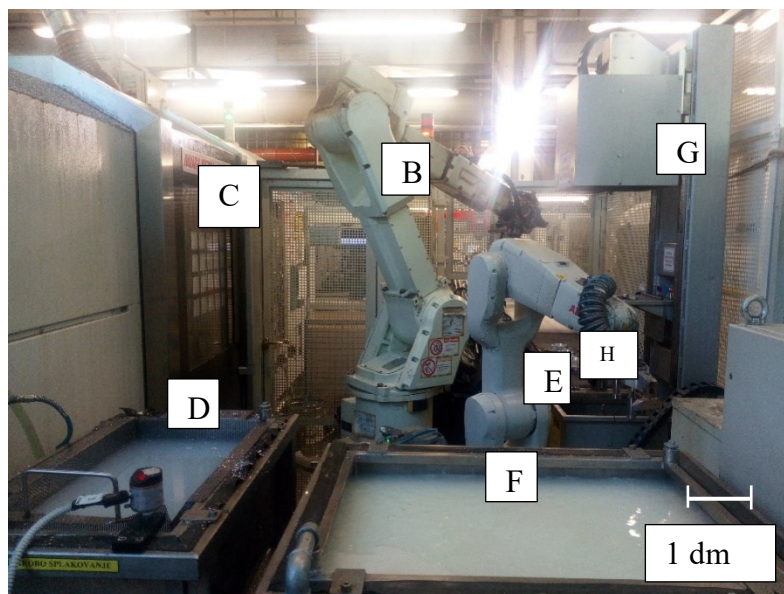
Slika 3.3: Shematski prikaz obdelovalnega centra.

- A.....vhodni zalogovnik
- B.....prvi robot
- C.....obdelovalni stroj
- D.....grobosplakovalna kad
- E.....drugi robot
- F.....finosplakovalna kad
- G.....spihovalna komora
- H.....odlagalni trak
- I.....merilna postaja

3.2.1. Okolje CNC stroja

Sklop posameznih elementov pred strojem, ki služi za manipulacijo kosa od vhodnega zalogovnika pa do izhodnega traku je prikazan na spodnji sliki (slika 3.4).

Na sliki 3.3 in sliki 3.4 so z oznakami predstavljeni elementi in njihova postavitve pred CNC strojem. Surovce vložimo v vhodni zalogovnik (oznaka A na sliki 3.3). Na robotu (oznaka B) je montirano prijemalo, ki ima štiri prijemalne čeljusti - 1 par čeljusti za prijetje dveh surovcev in 1 par čeljusti za prijetje dveh obdelancev. Robot pobere 2 surovca iz zalogovnika in jih vloži v stroj (oznaka C), ki ima dve vpenjalni glavi.



Slika 3.4: Prikaz elementov pred strojem.

Še preden robot vloži oba surovca v stroj, odvzame iz obeh vpenjalnih glav obdelanca. Po tem, ko vloži surovca v stroj, grobo splakne obdelanca v splakovalni kadi (oznaka D), nato odloži surovca na preložišče. Iz preložišča jih nato odvzame drugi robot (oznaka E), ki obdelanca najprej razigli in potem fino splakne v kadi za fino splakovanje (oznaka F). Obdelanca sta nato prenešena v spihovalno komoro (oznaka G), kjer se dokončno odstranijo ostružki in se spiha površina obdelanca. Iz spihovalne komore robot prenese kosa na odlagalni trak (oznaka H).

3.2.2. Uporabljen CNC stroj

Za izdelavo ohišja ležaja se uporablja CNC stružnica Mori Seiki NZ1500T2Y2 (slika 3.5).



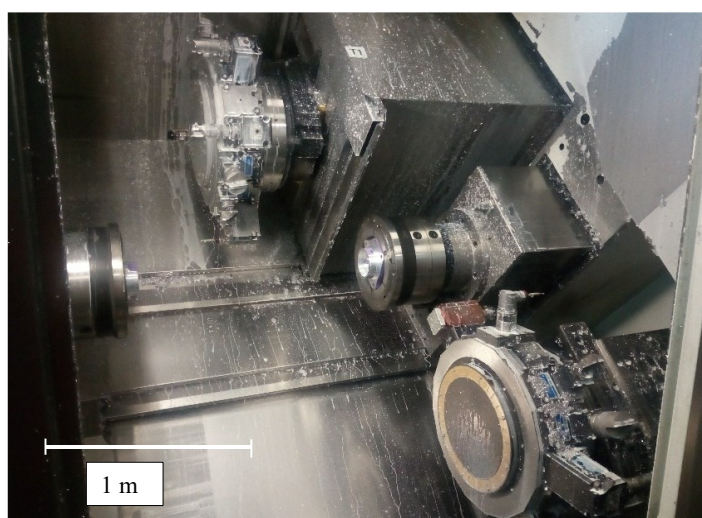
Slika 3.5: CNC stružnica Mori Seiki.

Preglednica 3.2: Specifikacijske lastnosti stroja.

KARAKTERISTIKE STROJA	
število vreten/revolverjev	2
maksimalna dolžina struženja	810 mm
maksimalni premer struženja	320 mm
razdalja med vreteni	1130 mm
območje vrtilne hitrosti vreten	60-6000 min ⁻¹
število pozicij na revolverjih	16
maksimalni <i>X</i> pomik revolverja	210 mm
maksimalni <i>Y</i> pomik revolverja	110 mm
maksimalni <i>Z</i> pomik revolverja	810 mm
maksimalni pomik 2. vretena	900 mm
vrtilna hitrost gnanih orodij	60-6000 min ⁻¹

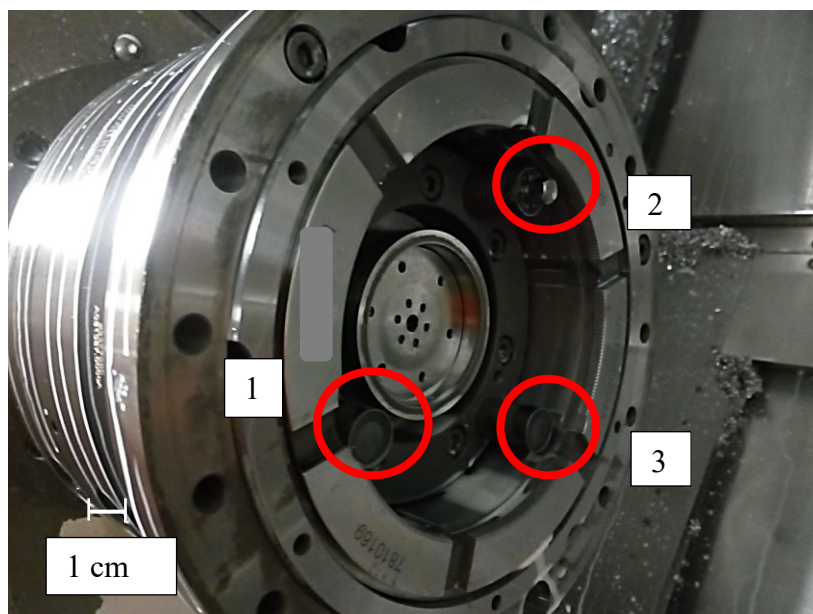
CNC stružnica je dvovretenska stružnica z dvema revolverjema, kjer je prostora za 16 rezalnih orodij (slika 3.6). Na vsakem revolverju se za obdelavo opisanega izdelka, uporablja šest orodij, ki služijo za obdelavo ulitka in eno orodje, katerega namen je splakovanje vpenjalne glave.

V magistrski nalogi je prikaz delovanja CNC stružnice na levem vretenu. Desno vreteno je povsem neodvisno od levega, a je pri obdelovalnem procesu njegovo delovanje enako kot na levem, zato je dovolj, če se problematika analizira na levem vretenu in se ukrepi ter rešitve nato prenesejo še na desnega.



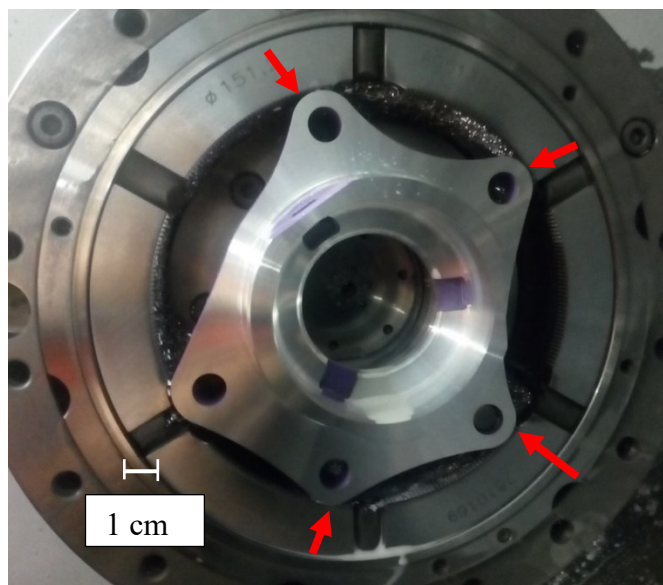
Slika 3.6: Prikaz delovnega prostora.

Vpenjanje surovcev poteka avtomatsko preko robota. Surovec nalega na tri naležne točke (slika 3.7), ki tvorijo ravnino pravokotno na vzdolžno os struženja. Na prvi naležni točki je tudi centrirnik, ki služi za preprečevanje zasuka surovca in tako poskrbi, da ne pride do odmika od centra obdelave.



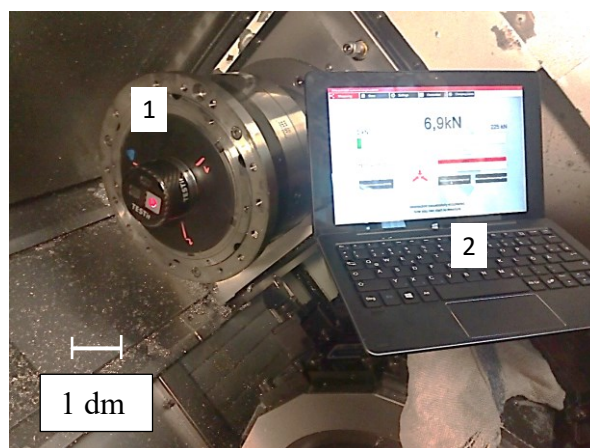
Slika 3.7: Prikaz vpenjalnega sistema.

Po tem, ko robot pritisne surovca na naležne točke, počaka, da vpenjalni obroč radialno fiksira surovca. Fiksiranje je v štirih točkah, ki so označene na spodnji sliki (slika 3.8).



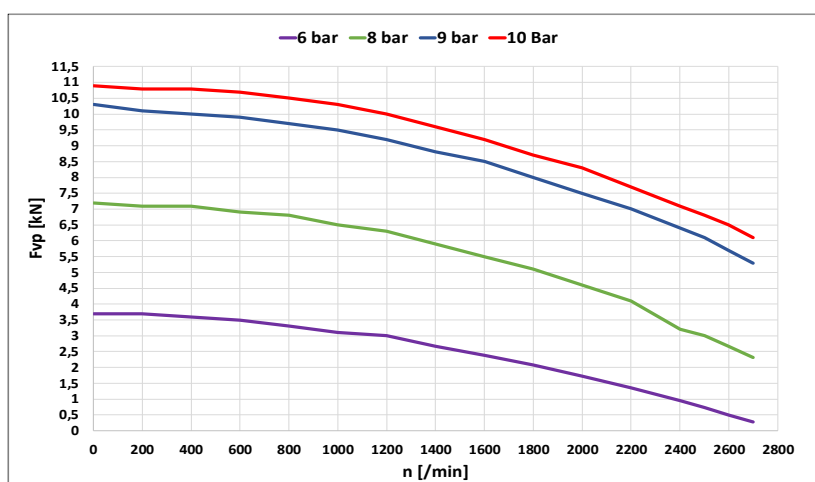
Slika 3.8: Prikaz vpetja kosa.

Pri vpetju kosa nastane problem, ker vpenjalna sila ne deformira surovca enakomerno. Surovec ni simetričen, njegovi zunanji robovi se ne nahajajo na isti razdalji od centra surovca, kar za posledico nosi, da je vpetje surovca po njegovem obodu neenakomerno. Pri fiksiranju surovca nosita ključno vlogo oblika vpetja in vpenjalna sila. Oblika vpetja je predstavljena na sliki 3.8, vpenjalno silo pa smo pomerili preko merilnega sistema, ki nam ga je zagotovilo podjetje, ki dostavlja vpenjalne glave. Merilni sistem je sestavljen iz naprave, ki se vstavi v vpenjalno glavo (slika 3.9- 1) in računalnika (slika 3.9-2), ki se preko brezžičnega signala poveže z napravo.



Slika 3.9: Merilni sistem za merjenje vpenjalne sile.

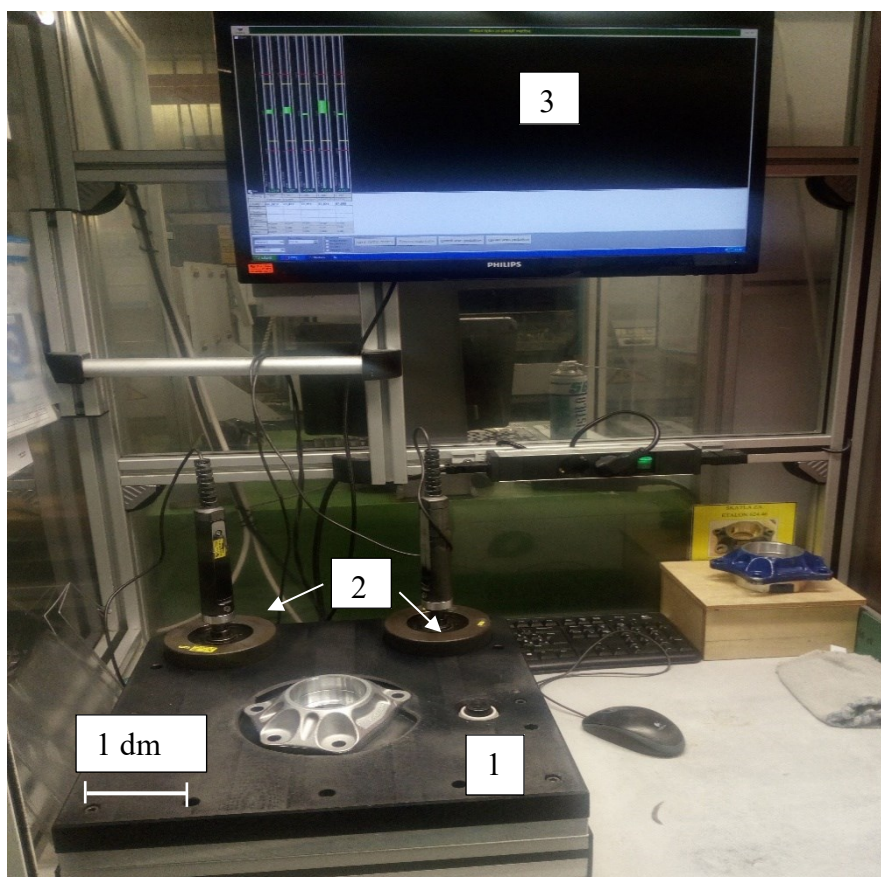
Na podlagi merjenja sile smo dobili spodnji graf (slika 3.10), ki prikazuje, kako vpenjalna sila pada s povečevanjem obratov. Različne barvne linije predstavljajo različne vpenjalne tlake, ki jih lahko sami nastavljamo. Obdelava ulitkov poteka pri 2700 vrtljajih na minuto. V povprečju se vpenjalna sila od začetnih proti končnim vrtljajem zmanjša za 5 kN. Vpenjalna sila ne sme pasti pod 3 kN, ker pri tem obstaja nevarnost, da bi radialna sila preveč razprla vpenjalne čeljusti. To pomeni, da bi vpetje popustilo in bi surovec med obdelavo padel iz vpenjalne glave.



Slika 3.10: Prikaz poteka vpenjalne sile pri različnih obratih.

3.3. Kontrola izdelave izdelka

V proizvodnji je pomembno, da proces obdelave teče nemoteno, torej da vsak obdelan ulitek, ki pride na odlagalni trak ustreza kakovostnim kriterijem. To pomeni, da so dimenzije po obdelavi znotraj tolerance, da je hrapavost površin znotraj meja dovoljenih in da zadostuje vizualnim zahtevam (brez poškodb itd.). Stabilnost obdelovalnega procesa se spremlja preko merjenja dimenzij obdelanca na merilni postaji (slika 3.11). Merilna postaja je postavljena poleg obdelovalnega centra in služi za 100 % kontrolo obdelancev.



Slika 3.11: Merilna postaja.

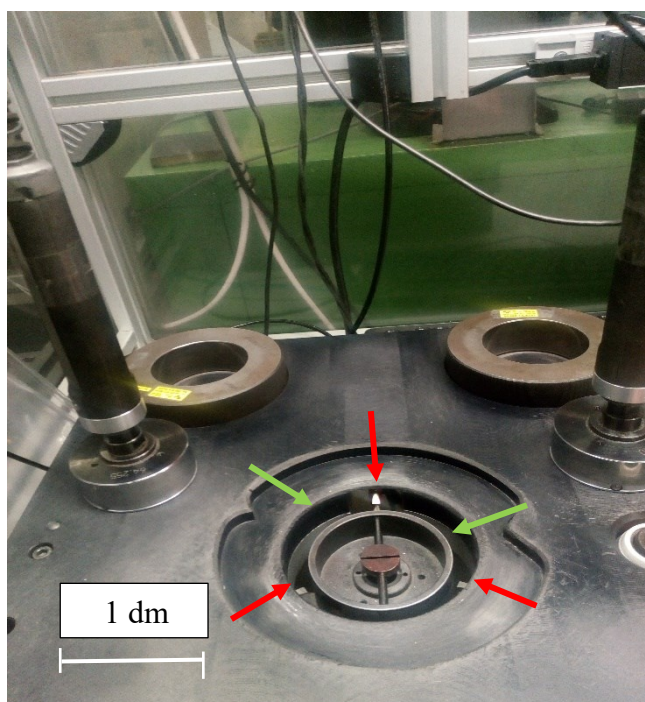
3.3.1. Zgradba merilnega sistema

Na sliki 3.11 je predstavljena shema merilne postaje, ki je sestavljena iz:

- merilne mize (1)
- merilnih tipal (2)
- zaslona (3)

Merilna miza

Na merilni mizi je vložišče (slika 3.11-1, slika 3.12), kamor se odloži obdelan kos. Vložišče s svojo obliko omogoča operaterju, da je obdelanec v vsakem procesu merjenja obrnjen enako. Na merilni mizi sta postavljeni dve merili za dva notranja premera ter tipala, ki so vgrajena v merilno mizo in merijo notranji premer ter dva zunanja premera.



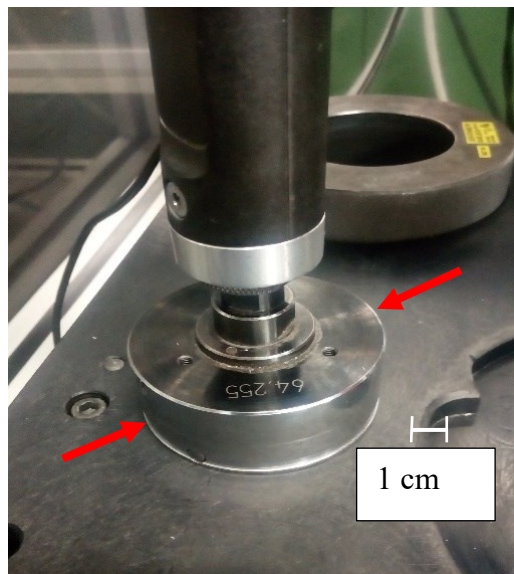
Slika 3.12: Merilna miza.

Ko kos vložimo v mizo, s pritiskom na gumb, ki je vgrajen v mizo, pnevmatsko sprožimo tipala, ki se premaknejo proti središču in se dotaknejo obdelanca. Tipala so postavljena po obodu, kot prikazuje slika 3.12 (označena z rdečimi puščicami). Na ta način pomerimo zunanja premera - $\phi 88h6$ in $\phi 88e6$. Notranji premer $\phi 72$ se samodejno meri že, ko kos vložimo v mizo. Tipalo za merjenje premera $\phi 72$ se nahaja na jeklenem obroču v sredini (zeleno označeno na sliki 3.12).

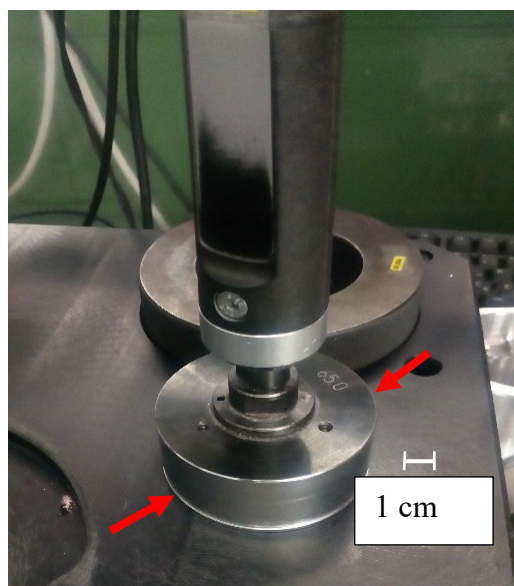
Merilno vložišče nam ne zagotavlja celotnega zasuka obdelanca okrog svoje osi. Zasuk je tako velik, da lahko preverjamo, če je zaradi ovalnosti obdelanec presegel tolerančne meje. Ovalnost je razlika največjega in najmanjšega izmerka istega premera. Če katerikoli preseže tolerančno mejo, je izdelek slab.

Merilno tipalo

Za dimenzijsko preverjanje uporabljamo še dva merila (slika 3.13, slika 3.14).



Slika 3.13: Merilo za FI64,3.

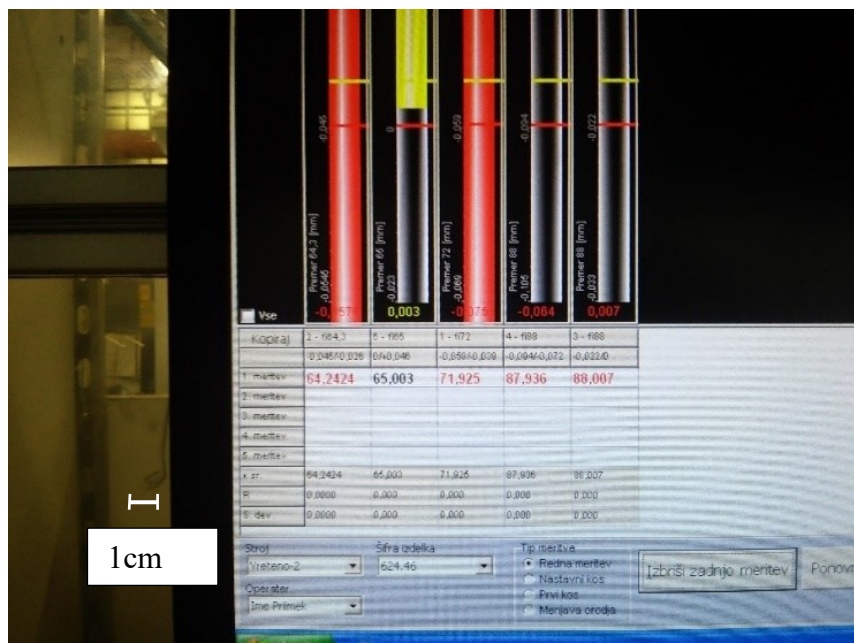


Slika 3.14: Merilo za FI65.

Obe merili delujeta po istem principu. Na obodu imata dve tipali (slika 3.13, slika 3.14, označeno z rdečimi puščicami), preko katerih izmerimo dano dimenzijo. Merilni tipali služita za merjenje notranjih premerov 64,3 mm (slika 3.13) in 65 mm (slika 3.14). Ko v obdelanca potopimo merilo, ga prav tako zavrtimo okrog svoje osi, da preverimo najmanjši in največji premer. Če hočemo preveriti stabilnost obdelovalnega procesa, je pomembno, da je zasuk obdelanca in merila v trenutku merjenja vedno isti.

Zaslon

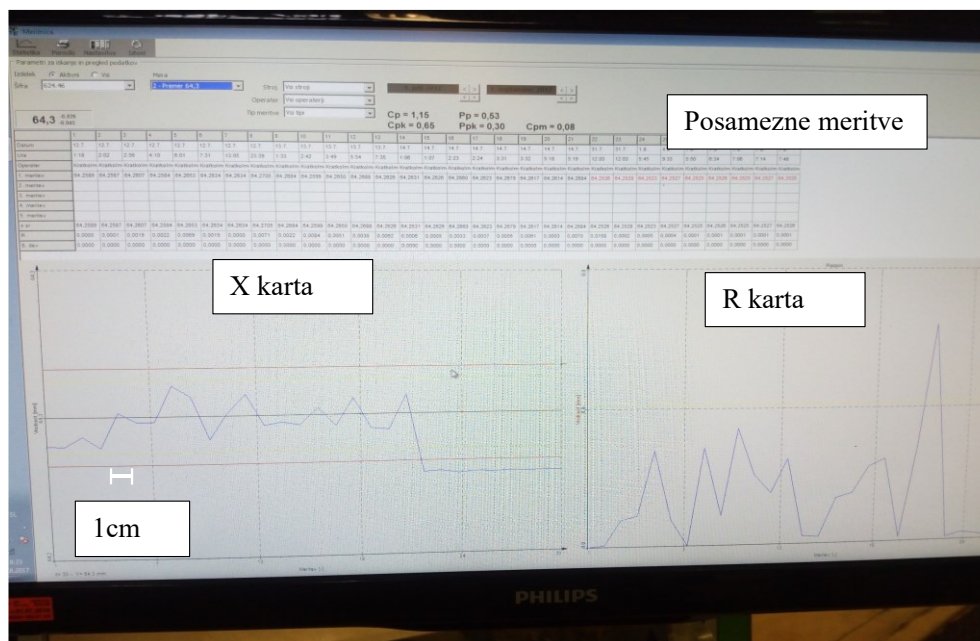
Zaslon služi za prikaz rezultatov merjenja (slika 3.15). Ko merimo določeno dimenzijo, se nam na zaslonu grafično in številsko izpisuje vrednost mere. Za vsak premer so določene tolerančne meje in če mera preseže toleranco, se stolpec, ki označuje merjeno dimenzijo, obarva rdeče. V nasprotnem primeru je stolpec zelen oz. rumen, če je presegel kontrolno mejo.



Slika 3.15: Prikaz izpisa merjenih dimenzij.

Programska oprema, ki spada k merilni postaji, nam omogoča, da sproti beležimo mere obdelancev. Najprej imamo osnovni zaslon, kjer vidimo meritev aktualnega obdelanca (slika 3.15). Ta prikaz je namenjen operaterjem, da lahko sproti ukrepajo v obdelovalnem procesu. To pomeni, da na podlagi zaporedoma pomejenih nekaj obdelancev, že lahko sklepa o naravnosti procesa in tudi ustrezno reagira.

Meritve, ki so shranjene, lahko vidimo tudi v drugem zavihku (slika 3.16). Ta del programa je predvsem namenjen inženirjem kakovosti in tehnologom, ki za daljše časovno obdobje spremljajo proces in sledijo njegovemu poteku.



Slika 3.16: Prikaz spremljanja meritev za daljše časovno obdobje.

4. Pregled obstoječega stanja proizvodnega procesa

Pregled obstoječega stanja je pomemben proces, ki nam da povratno informacijo o kakovosti proizvodnega procesa. V proizvodnem procesu imamo obdelovalni proces in merilni proces. Če pridemo do spoznanja, da kakovost naših izdelkov ni primerna, imamo lahko tri stanja:

- prvo stanje je, da je izdelek v resnici dober, ampak merilni sistem v njem ne kaže točnih rezultatov, s čimer ustvarjamo izmet, ki to v resnici ni
- drugo stanje je, da je obdelovalni proces neustrezen, kar nosi za posledico neprimeren izdelek
- tretje stanje je, da sta tako merilni proces kot obdelovalni proces slaba

V proizvodnem procesu se je povečal izmet, zaradi nestabilnosti obdelovalnega procesa. Izdelki pomerjeni na merilni postaji, niso kontinuirano zadostili kakovostnim kriterijem, zato je bilo potrebno preveriti obstoječe stanje in ustrezno ukrepati. Najprej preverimo, ali je merilni sistem v merilnem procesu ustrezen.

4.1. Analiza merilnega sistema

MSA je nabor tehnik, ki nam omogoča oceniti, kakšne so napake, ki jih doprinese merilni sistem. Ob razumevanju obsega merilnih napak si lahko odgovorimo na številna vprašanja: ali je merilna napaka dovolj majhna, da je merilo uporabno za klasifikacijo izdelka kot dobrega oz. slabega, znotraj oz. izven tolerance, ali je merilo zadostno zaupljivo, da ustrezno prepozna neskladne obdelance.

Da smo ugotovili, ali merilni sistem v merilnem procesu ustreza, smo izvedli analizo merilnega sistema.

4.1.1. Zajem meritev za MSA

Preden smo začeli z analizo merilnega sistema, je bilo zagotovljeno sledeče:

- merili smo trije merilci,
- merili smo deset vzorcev,
- vsak vzorec je bil pomejen trikrat,
- vzorci so pokrivali celotno širino raztrosa (kosi so bili z obeh vpenjalnih glav, z različnih livarskih gnezd)

Zajem meritev je potekal tako, da se je pred začetkom merjenja umerila merilna oprema. Nato je prvi merilec pomeril deset vzorcev, ki so bili označeni s številkami od ena do deset. Ko je prvi merilec zaključil in preden je začel z merjenjem drugi merilec, se je merilna oprema zopet umerila. Umerjanje merilne opreme je potekalo vsakič pred začetkom nastopa novega merilca. Ko je še tretji merilec pomeril vseh deset vzorcev, je zopet prvi merilec začel z merjenjem. Vsak merilec je deset vzorcev pomeril trikrat.

Študijo P&P smo izvedli na tistih petih premerih obdelancev, ki se v merilnem procesu 100 % kontrolirajo:

- študija P&P za $\phi 64,3$
- študija P&P za $\phi 65$
- študija P&P za $\phi 72$
- študija P&P za $\phi 88e6$
- študija P&P za $\phi 88h6$

4.1.2. Analiza ponovljivosti in primerljivosti

Po končanem merjenju smo izvedli študijo ponovljivosti in primerljivosti (študija P&P).

Za analizo P&P sta poznani dve metodi, ki bi jih lahko uporabili, X-R metoda in metoda ANOVA (analiza variance).

X-R metoda se uporablja pogosteje, ker izračuni izhajajo iz kontrolnih kart, zaradi česar je tudi bolj preprosta. Metoda ANOVA pa je bolj natančna, ker izvede kalkulacije povezav med merilci in vzorci. Komponente variacije so pri metodi ANOVA bolje ocenjene od razpona, ki se uporabljajo pri drugi metodi, zato smo za analizo uporabili metodo ANOVA. Rezultate smo analizirali v Minitab-u, ki vsebuje programski paket za statistično obdelavo podatkov.

Razlaga diagramov

Vsaka študija P&P je sestavljena iz šestih diagramov. Prvi diagram prikazuje komponente variacije, kjer stolpcični diagrami prikazujejo vire variacij. Če je variacija merilnega sistema nesprejemljiva, je potrebno analizirati ponovljivost in primerljivost merilnega sistema za njegovo izboljšanje.

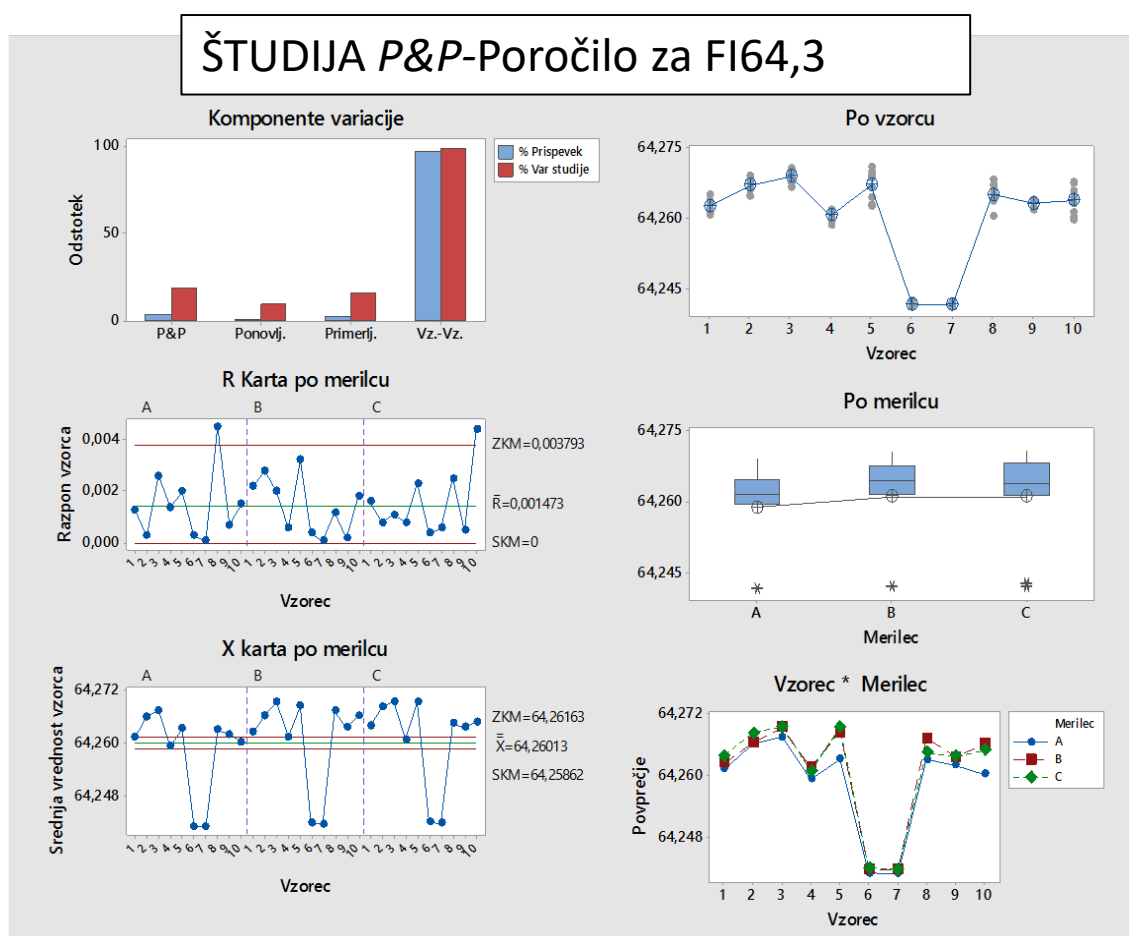
Diagram "Po vzorcu" prikazuje ponovljivost. S tem analiziramo variacijo, ko isti merilec pomei isti vzorec večkrat.

Iz diagrama "Po merilcu" analiziramo primerljivost. To je analiza variacije, ko različni merilci pomerijo isti kos.

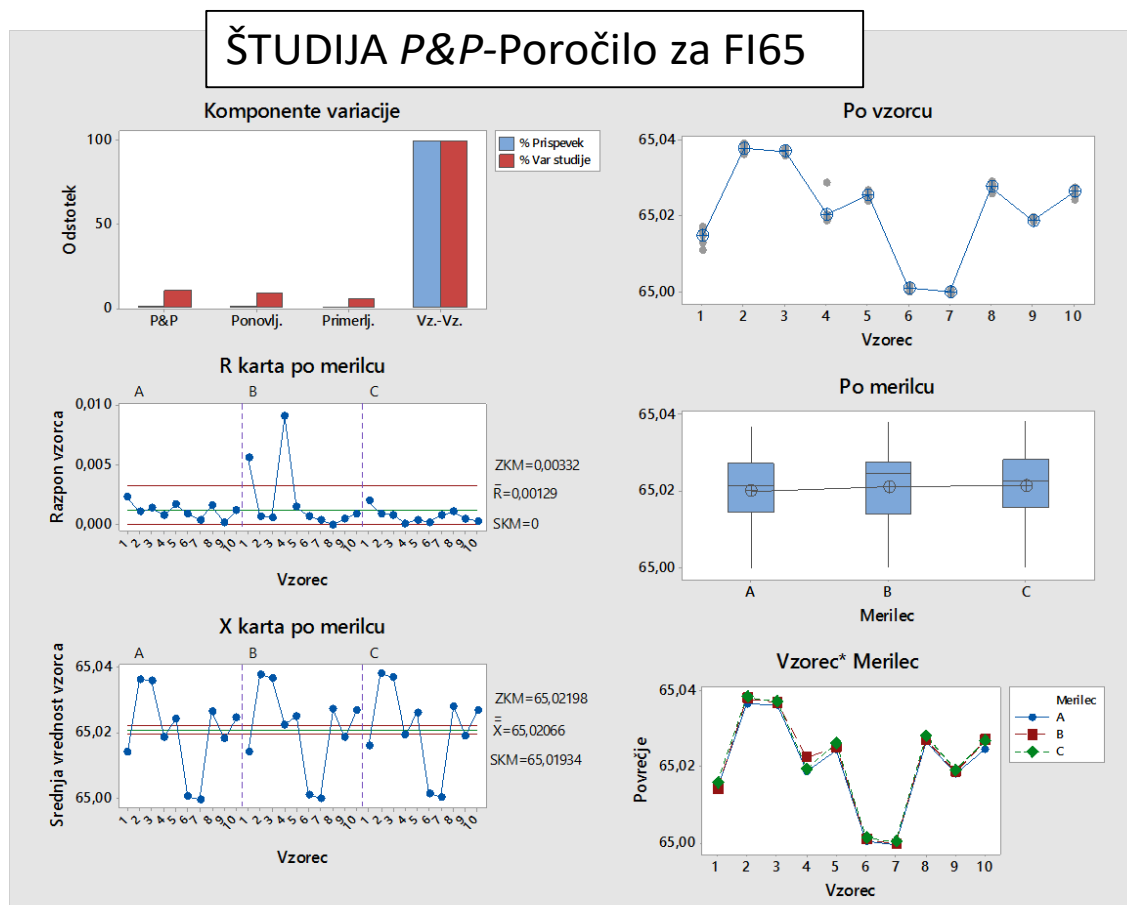
Splošna pravila, ki se uporabljajo za določevanje sposobnosti merilnega sistema na podlagi celotne procesne variacije:

- <10 % - sprejemljivo
- 10 % - 30 % - mejno
- >30 % - nesprejemljivo

Način merjenja in analizo študije *P&P* lahko razdelimo na dva dela. V prvem delu merimo premere z merilnim tipalom, ki ga vodimo mi, v drugem pa merimo obdelanca preko tipal, ki jih sprožimo z gumbom. K prvemu delu spadata notranja premera 64,3 mm in 65 mm, k drugemu delu pa spadajo notranji premer 72 mm in zunanja premera 88e6 mm in 88h6 mm.



Slika 4.1: Študija *P&P* premera 64,3 mm.

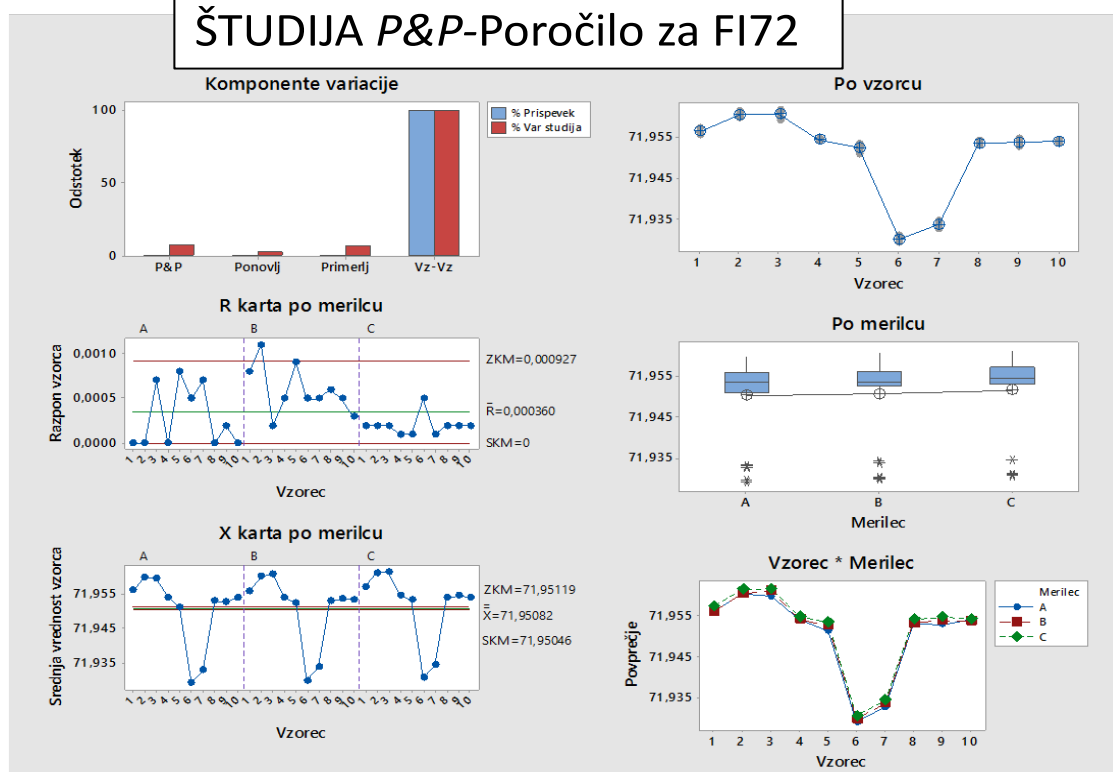


Slika 4.2: Študija P&P premera 65 mm.

Pri premerih 64,3 mm (slika 4.1) in 65 mm (slika 4.2) je variacija večja od 10% (rumeno obarvano – preglednica 4.1). Že pred začetkom analize smo sklepali, da bosta ta dva premera variabilno najbolj vprašljiva, ker je merjenje v celoti odvisno od merilca. Pri zasuku merilnega tipala za samo pet stopinj, se meritev lahko razlikuje že za 2 μ m. Do take razlike pride zaradi ovalnosti obdelancev. Pred analizo merilnega sistema, je bilo dogovorjeno s kakšnim zasukom se bo merilo, ampak je v skupini treh merilcev, samo en merilec bil tisti, ki je imel izkušnje z merjenjem. Zaradi neizkušenosti merilcev je bilo pričakovano, da bo variacija pri merjenju premerov 64,3 mm in 64,3 mm večja.

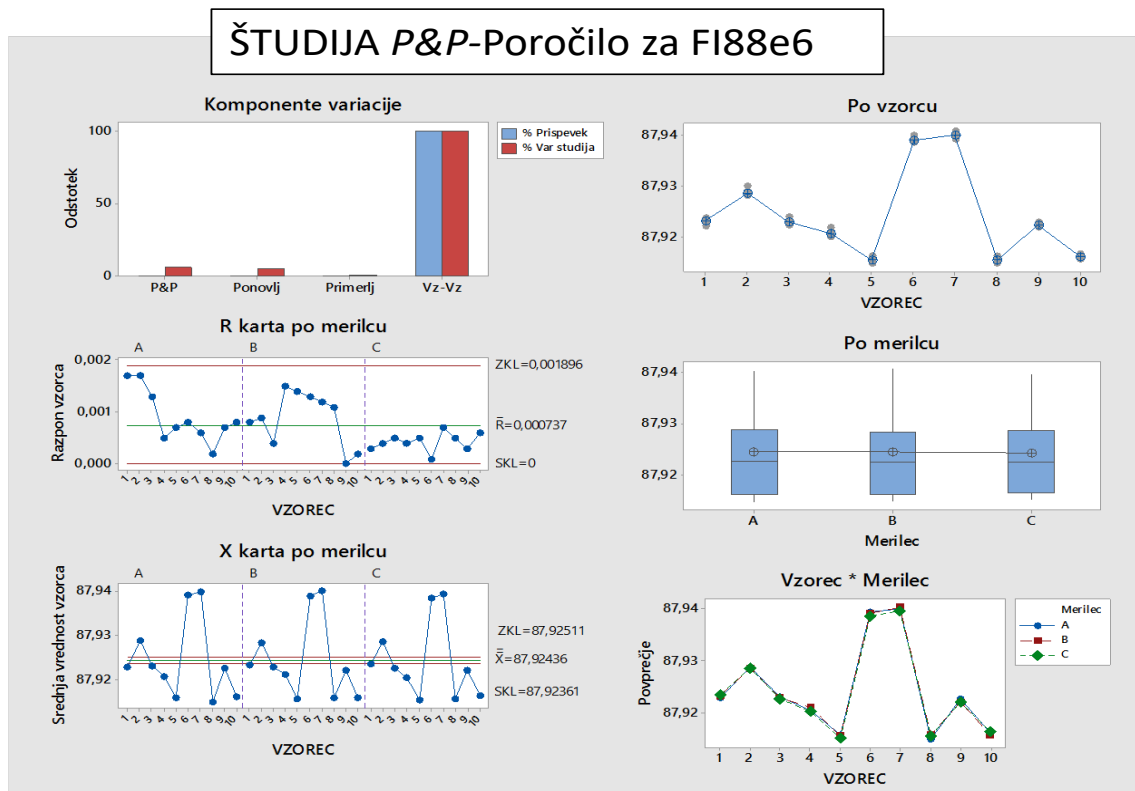
Iz študije P&P je jasno razvidno, da bi ob treh izurjenih merilcih imeli boljšo primerljivost in ponovljivost. Prav zaradi slabše primerljivosti pri premeru 64,3 mm (15,49 %), ki izkazuje razlikovanje med meritvami istega kosa pri različnih merilcih, je celotna variacija merilnega sistema slaba.

ŠTUDIJA P&P-Poročilo za FI72

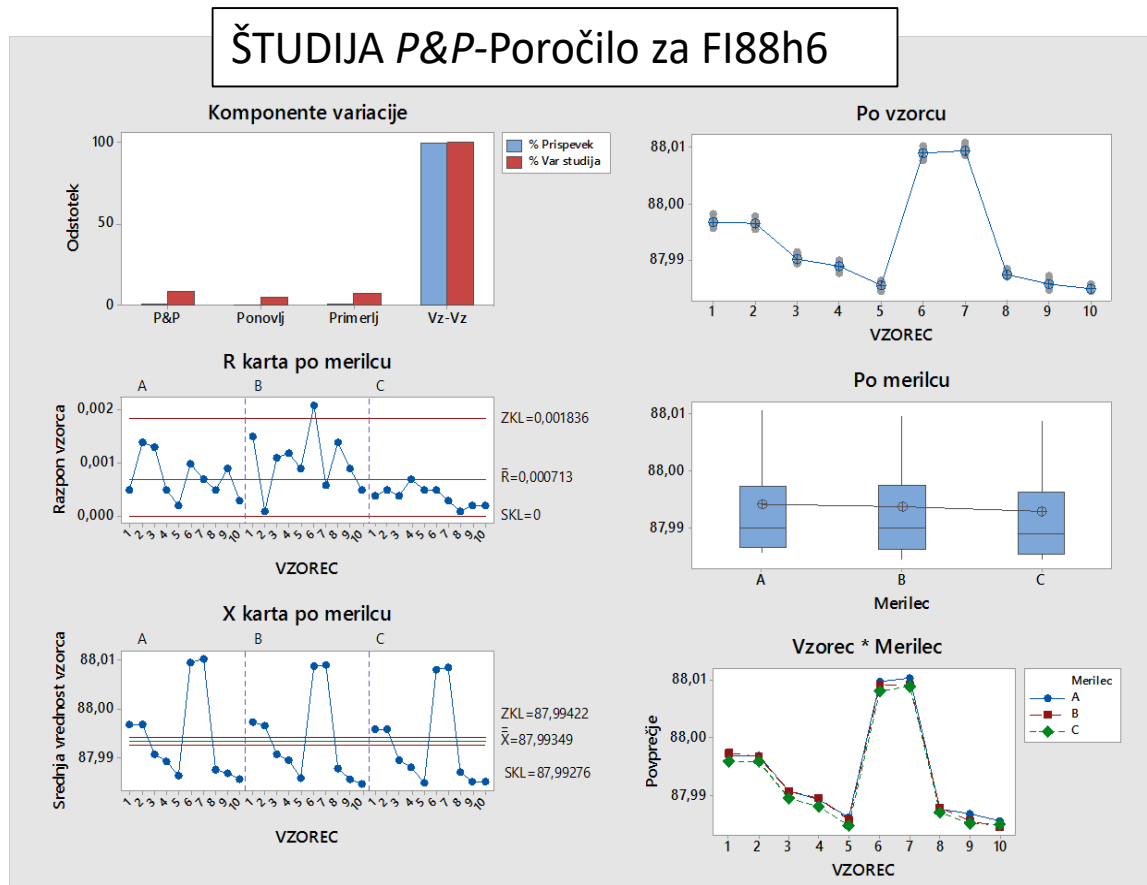


Slika 4.3: Študija P&P premera 72 mm.

ŠTUDIJA P&P-Poročilo za FI88e6



Slika 4.4: Študija P&P premera 88e6 mm.



Slika 4.5: Študija P&P premera 88h6 mm.

Študija P&P za preostale tri premere: 72 mm (slika 4.3), 88e6 mm (slika 4.4), 88h6 mm (slika 4.5) pokaže, da je sposobnost merilne naprave dobra. Variacija celotnega merilnega sistema je manjša od 10 %, kar kaže na sposoben merilen proces (zeleno obarvano v preglednici 4.1).

Prikaz sposobnosti pri teh premerih je znatno bolj relevanten kot pri premerih, ko merimo z merilnim tipalom. Razlog se skriva v tem, da merjenje omenjenih premerov poteka tako, da obdelanca postavimo v merilno mizo, ga zavrtimo in fiksiramo ob merilno pripravo. Po tem, ko je kos v tem položaju, pritisnemo na tipko, ki sproži tipala, ki pomerijo zunanji in notranji premer. Pri merjenju teh premerov je potrebno vedeti, da to poteka povsem neodvisno od izkušenosti merilca. Merilec postavi kos v edini položaj, ki je dovoljen in pritisne na tipko, ki sproži tipala. Iz tega sledi, da merilec ne more vplivati na meritve. To pomeni, da je merjenje teh premerov povsem odvisno samo od merilne naprave in ne od merilca in lahko na podlagi teh meritev sklepamo o sposobnosti naprave in njeni ustreznosti.

V študiji *P&P* moramo biti pozorni na več stvari. Na *X* karti moramo biti pozorni na ponavljajoč se vzorec med merilci. Za neenake vzorce iščemo razloge v ponovljivosti in primerljivosti. Ponovljivost preverimo v diagramu "Po vzorcu", primerljivost v diagramu "Po merilcu". V diagramu "Vzorec*Merilec" prekrijemo *X* karte po merilcu med seboj in opazujemo ponovljivost in primerljivost.

V preglednici 4.1 so prikazani rezultati, ki smo jih dobili z analizo merilnega sistema. Najpomembnejši podatek je v celotni variaciji merilnega sistema. Ta podatek podaja informacijo o sposobnosti merilnega sistema.

Preglednica 4.1: Prikaz rezultatov variacij analize merilnega sistema.

	Φ64,3	Φ65	Φ72	Φ88e6	Φ88h6
celotna procesna variacija merilnega sistema [%]	18,3	10,6	7,4	5,5	8,5
ponovljivost [%]	8,99	8,47	2,31	5,42	4,85
primerljivost [%]	15,49	6,92	6,8	0,87	7,01
po merilcu [%]	9,91	4,92	5,84	0,87	6,37
vzorec*merilec [%]	11,91	2,85	3,47	0,24	2,96

Študija *P&P* je pokazala, da je merilni proces sposoben in da moramo vzroke za nestabilnost proizvodnega procesa poiskati v obdelovalnem procesu. Da najdemo vzrok za nestabilnost, s čimer bi lahko tudi definirali ukrepe za odpravo le-te, moramo najprej analizirati obstoječe stanje obdelovalnega procesa. Analizo obstoječega stanja se naredi na podlagi analize sposobnosti procesa.

4.2. Analiza sposobnosti obdelovalnega procesa

Po tem, ko smo analizirali merilni sistem, ki je v uporabi za kontrolo kosov, in smo ugotovili, da je ustrezen, smo analizirali sposobnost procesa. SPC je metoda, ki nam služi za ugotavljanje sposobnosti in stabilnosti procesa na podlagi dobljenih podatkov. Z metodo dobimo povratno informacijo o preteklem in trenutnem stanju procesa. Na podlagi obstoječega stanja pa lahko predvidevamo, kako se bo proces obnašal v prihodnosti in s preventivnimi ukrepi preprečimo njegovo destabilizacijo, ki vodi v proizvodnjo slabih izdelkov in povečanih stroškov.

4.2.1. Zajem meritev za SPC

Analizo sposobnosti procesa smo izvedli na CNC stružnici Mori Seiki. Pred zajemom meritev smo izdelali načrt o poteku testa. Test stabilnosti procesa je potekal od približno 7.30 do 12.30. Ob 9.30 se je obdelovalni proces ustavil, da bi ugotovili kako poteka obdelava takoj po zastoju. Z zastojem se je simuliral čas, ko operater odide na malico in se stroj po nekaj minutnem avtonomnem delovanju zaradi izpraznitve zalogovnika ustavi.

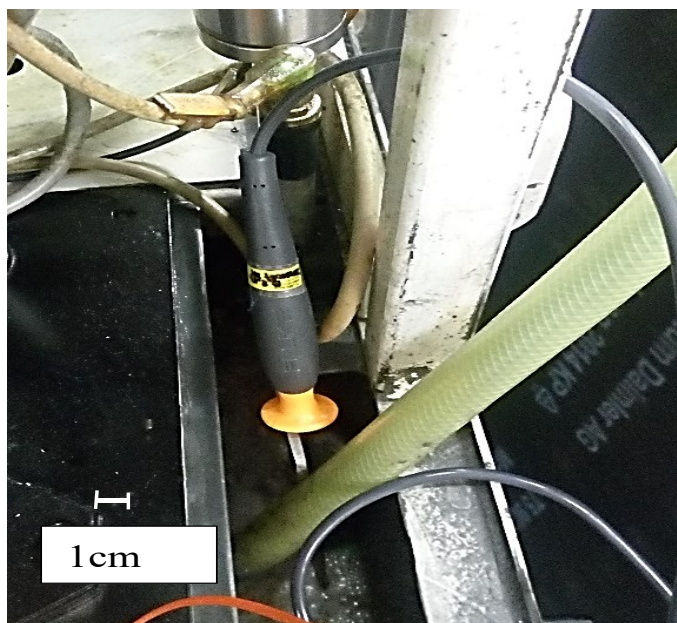
Pred nalaganjem v zalogovnik, so se surovci številsko označili v izogib napačnim povezavam med časom obdelave ter kasnejšimi meritvami.

Za strojem smo namestili digitalni termometer FLUKE 54 II B (slika 4.6), ki je omogočal merjenje temperature z dvema sondama.

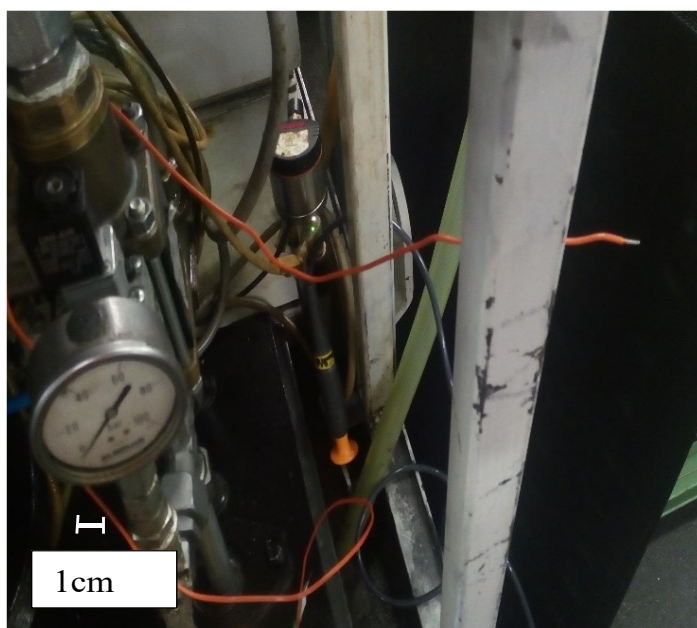


Slika 4.6: Digitalni termometer.

Ena sonda je bila potopljena v rezervoar emulzije (slika 4.7), druga pa je merila temperaturo zraka (slika 4.8). Namen merjenja temperature je bil ugotavljanje, morebitnega vpliva na mere obdelancev.



Slika 4.7: Merjenje temperature emulzije.



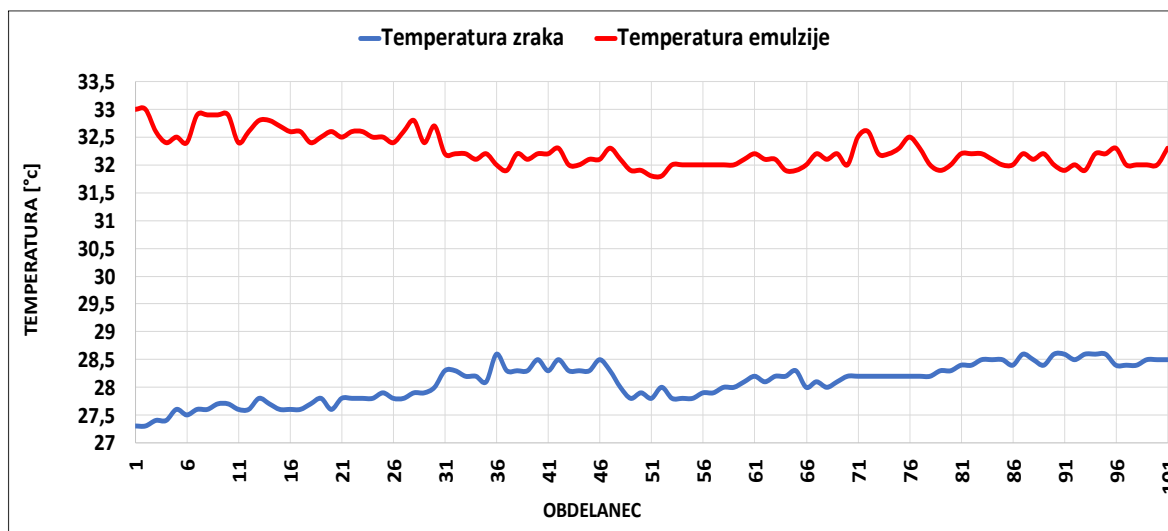
Slika 4.8: Merjenje temperature zraka.

Vseh 101 označenih obdelancev smo premerili na merilni postaji.

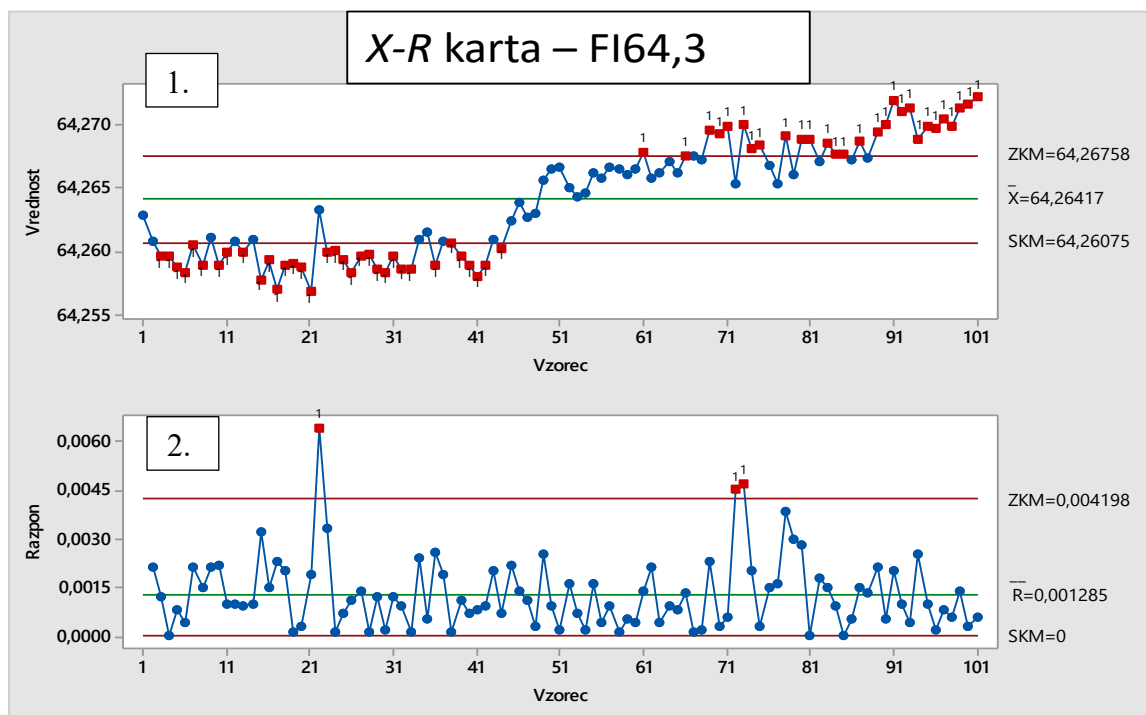
4.2.2. Analiza SPC

Po zajemu meritev smo izvedli analizo. Analizo sposobnosti procesa smo izvedli v programu Minitab, ki s svojimi številnimi funkcijami omogoča uporabniku preprosto uporabo.

Analiza je bila izvedena na tistih premerih obdelanca, ki se v rednem proizvodnem procesu 100 % kontrolirajo. Poleg SPC analize smo opazovali tudi potek temperature emulzije in zraka in njihov morebitni vpliv na potek obdelovalnega procesa.



Slika 4.9: Prikaz poteka temperature emulzije in zraka.



Slika 4.10: X-R karta meritev na premeru 64,3 mm.

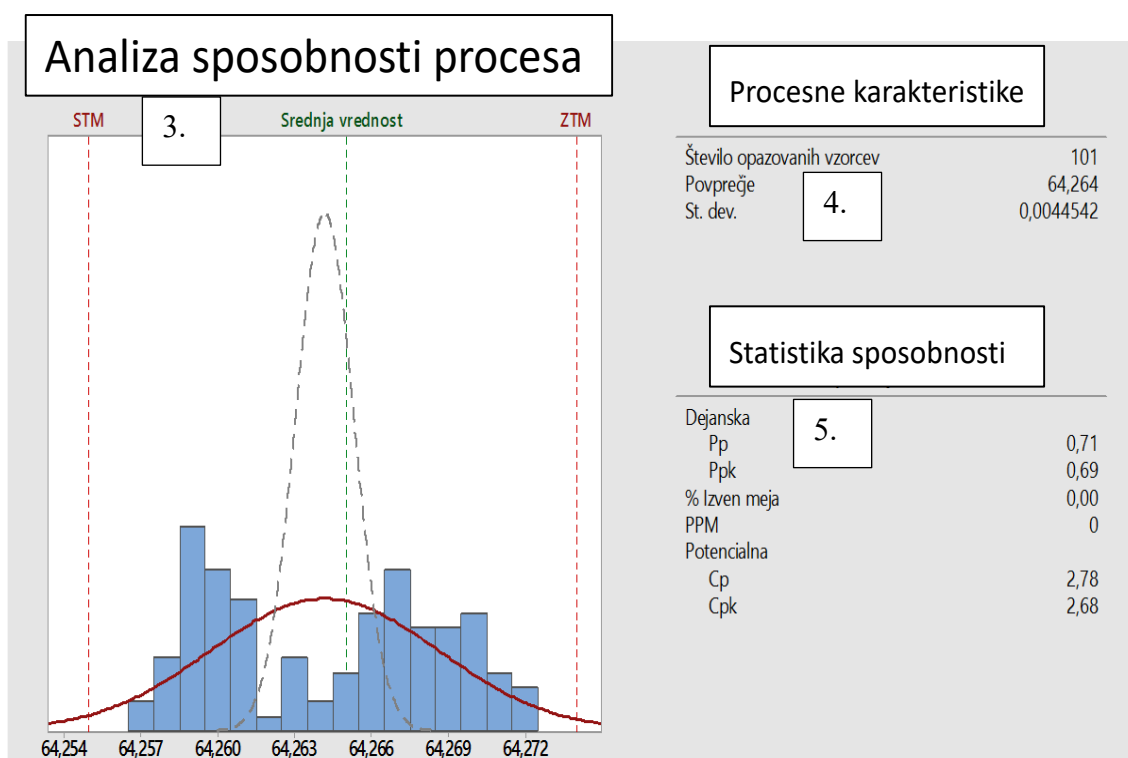
Na premeru 64,3 mm je podana razlaga nastalih diagramov iz katerih lahko sklepamo o sposobnosti procesa.

Oznaka 1 na sliki 4.10 prikazuje $\bar{X}$ karto. Na njej je razviden potek meritev dimenzij. Na karti sta vrisani še zgornja in spodnja kontrolna meja. Če je mera nad ali pod kontrolno mejo, je meritev obarvana rdečo. Iz $\bar{X}$ karte razberemo, ali se izdelek nahaja znotraj tolerančnih meja oz. predvidimo, kdaj izdelek ne bo več dober.

Pod $\bar{X}$ karto se nahaja R karta (oznaka 2 – slika 4.10). R karta pove, ali se je variacija lastnosti izdelka obdržala znotraj sprejemljivih meja. Spodnja kontrolna meja je vedno 0, ker se razpon med dvema meritvama gleda z absolutno vrednostjo.

Proces je bil do 40. kosa dokaj stabilen. Ni se nahajal znotraj kontrolnih meja, vendar pa je bil znotraj tolerančnih. Če proces kaže stabilnost in ni znotraj kontrolnih meja, pomeni, da je že ob samem zagonu bila napaka, ker stroj ni bil ogret na delovno temperaturo oz. se ni preverilo začetnih obdelancev po zagonu, na podlagi katerih se potem izvede korekcija. Iz $\bar{X}$ karte je vidno, da bi že majhna korekcija orodja, ki postruži $\phi 64,3$ v višini parih mikrometrov, dosegla, da bi bile meritve tudi znotraj kontrolnih meja.

Iz R karte je vidno, da meritve niso bistveno nihale. Po 40. kosu pa je vidno, da je prišlo do drsenja meritev k zgornji kontrolni meji in čez. Pred začetkom tega dela, smo obdelovalni proces zaustavili, da bi opazovali delovanje stroja ob zagonu po zaustavitvi. Po zagonu se vidi, da meritve drsijo proti in čez zgornjo kontrolno mejo. Če bi obdelovalni proces pustili teči še naprej, bi meritve presegale tudi tolerančno mejo.



Slika 4.11: Analiza sposobnosti za premer 64,3 mm.

Histogram analize sposobnosti procesa prikazuje normalno porazdelitev vrednosti. Na njem so zarisane tri linije, ki označujejo zgornjo in spodnjo tolerančno mejo ter željeno srednjo vrednost.

V predelu karakteristik procesa (oznaka 4-slika 4.11) se izpišejo podatki o meritvah (število vzorcev, povprečje meritev in standardna deviacija).

V predelu statistike sposobnosti procesa (oznaka 5-slika 4.11) se nahajajo indeksi, ki popisujejo sposobnost procesa. Indeks sposobnosti C_p se nanaša na sivo, črtkano porazdeljeno linijo, ki prikazuje idealno porazdelitev, C_{pk} pa še upošteva odmik od srednje vrednosti. Ta dva indeksa kažeta, kako bi proces lahko bil sposoben. Dejanska sposobnost procesa pa se skriva v indeksu P_p in P_{pk} . Indeks se nanašata na polno rdečo linijo, ki ponazarja dejansko porazdelitev meritev. V idealnem primeru bi bili vsi 4 indeksi enaki. V podatkih imamo še odstotek, ki pove, koliko meritev je izven tolerančnih meja in *ppm*, ki pove, koliko kosov to pomeni na milijon izdelanih.

Iz diagramov analize premera 64,3 mm je vidna velika razpršenost meritev okrog srednje vrednosti. Povprečje meritev se ne razlikuje bistveno od zelene srednje vrednosti, a je njihova porazdelitev okrog povprečne vrednosti slaba, kar prikazuje standardna deviacija, ki znaša 4 μ m.

Indeks dejanske sposobnosti procesa P_{pk} je 0,69, kar za nas ni sprejemljivo. Četudi ni obdelancev, ki bi bili izven tolerančnih meja, bi ob nadaljevanju obdelave kmalu dobili slabe izdelke.

Preostale SPC analize premerov se nahajajo v prilogi (glej priloga A: Statistični nadzor procesa obstoječega stanja).

$\bar{X}$ in R karta (glej priloga A: slika A.3) pri merjenju premera 65 mm pokažeta podobno stanje, kot je pri premeru 64,3 mm. Če primerjamo število kosov, ki so v oz. zunaj kontrolnih meja, je število podobno, a je razlika v sposobnosti procesa večja.

Slika 4 v prilogi A prikazuje analizo sposobnosti. Pri meritvah notranjega premera 65 mm, smo že pred analizo pričakovali, da bodo rezultati boljši glede na indeks sposobnosti procesa. Razlog je v tem, da je širina tolerančnega območja tu dvakrat širša kot pri ostalih premerih in so zato meritve lahko še bolj razpršene. Boljši rezultat se kaže samo v indeksu sposobnosti P_{pk} , ki znaša 1,33. Standardna deviacija je 5 μ m, povprečje je od zelene srednje vrednosti odmaknjeno za 6 μ m.

Premjer 72 mm (glej priloga A: slika A.5, slika A.6) je notranji premer in ima zato potek dimenzij podoben premeroma 64,3 mm in 65 mm. 22. pomejen obdelanec ima nenaden skok čez zgornjo kontrolno mejo. Glede na to, da so vsi prejšnji in kasnejši obdelanci pred zastojem pod kontrolno mejo, lahko sklepamo, da je prišlo do napake pri meritvi. Ker je premer prevelik, neočiščena površina ni pravi vzrok. Pravi vzrok je verjetno v napačnem zasuku obdelanca, ko je bil vložen v merilno mizo. Indeks sposobnosti procesa je tudi na tem premeru premajhen, kar pomeni, da obstoječe stanje ni zadovoljivo.

Na premerih 88e6 glej (priloga A: slika A.7, slika A.8) in 88h6 (glej priloga A: slika A.9, slika A.10) je potek meritev ravno obraten kot pri ostalih premerih, ki so notranji. Koeficienti sposobnosti in standardna deviacija so podobni kot pri ostalih premerih, torej nesprejemljivi.

Vzrok za to, da imata zunanja premera obraten potek meritev, je, da se notranji premeri stružijo na negativni strani od središča (gledano po X osi) kosa, zunanji pa na pozitivni strani. Iz dobljenih meritev sklepamo, da se je koordinatno izhodišče revolverja med zastojem nižalo in znižalo za toliko, kolikor je sprememba dimenzij premerov pred in po zastojem.

Da to drži, je vidno iz vseh X kart izvedenega testa, kjer se notranjim premerom premer poveča (revolver se nahaja bolj v minus položaju po X osi). Zunanji premeroma pa se premer zmanjša, ker je orodje zaradi spremenjenega položaja postružilo več materiala.

Preglednica 4.2: Prikaz rezultatov SPC analize pri preverjanju obstoječega stanja.

stat. veličine premer [mm]	$\bar{x}$ [mm]	σ [mm]	P_p	P_{pk}
Φ64,3	64,264	0,0044	0,71	0,69
Φ65	65,018	0,0046	1,65	1,33
Φ72	71,95	0,0040	0,83	0,73
Φ88e6	87,914	0,0043	0,85	0,64
Φ88h6	87,986	0,0049	0,74	0,55

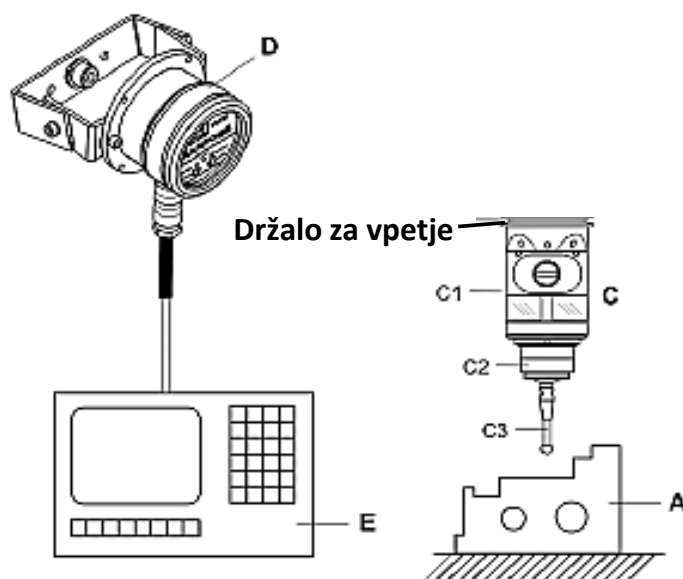
Preglednica 4.2 prikazuje statistične veličine testa, kjer smo pregledali obstoječe stanje obdelovalnega procesa. Iz preglednice je razvidno, da je obstoječe stanje nesprejemljivo. Koeficienti sposobnosti procesa P_{pk} , so vsi do 0,73 (razen pri premeru 65 mm, ki pa za opazovanje sposobnosti procesa zaradi širine tolerančnega polja ni relevantno) kar pomeni, da bi proizvedli več kot 35000 slabih kosov v milijonski seriji.

5. Izboljšanje stanja proizvodnega procesa

Na podlagi SPC analize obstoječega stanja procesa smo sklenili, da je obdelovalni proces struženja nestabilen in nesposoben. Obdelovalni proces v takem stanju je neprimeren za vse oblike proizvodnje (masovne in nemasovne). Za čimprejšnjo odpravo takega stanja, se je v podjetju sprejelo ukrepe za izboljšanje.

5.1. Uporabljeni korekcijski sistem

Podjetje je kupilo in v stroj integriralo sistem za korigiranje koordinatnih izhodišč orodij. Cilj pridobitve je bil, da bi vgrajeni modul samodejno med obdelovalnim procesom spremljal in po potrebi korigiral koordinatna izhodišča orodij.



Slika 5.1: Shematski prikaz korekcijskega sistema [21].

Korekcijski sistem (slika 5.1) sestavljajo:

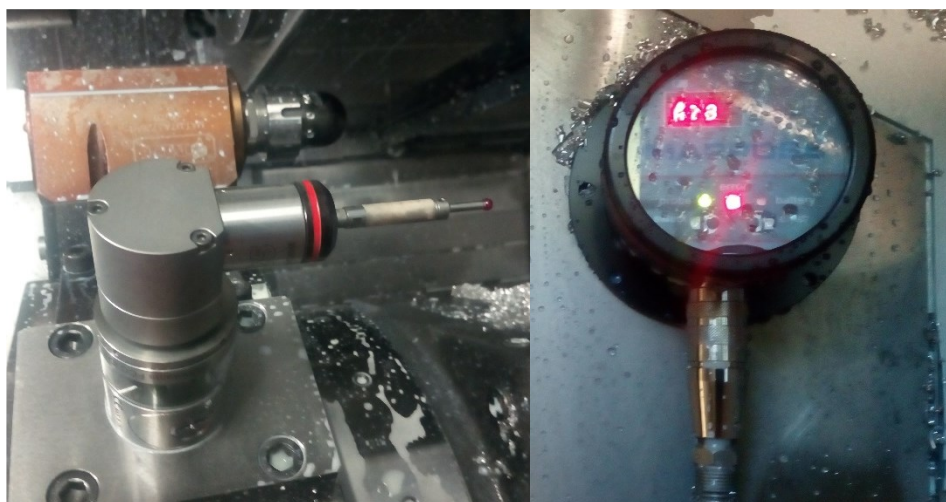
- oddajnik (C1)
- sonda (C2)
- tipalo (C3)
- sprejemnik (D)
- krmilnik (E)

Preglednica 5.1: Lastnosti modula za korigiranje [24].

TEHNIČNE LASTNOSTI	
dimenzije	FI46,6 x 56 mm
nivo tesnosti	IP67 (testirano pri 0,3 barih za 30 min)
temperaturni interval delovanja	0°C – 60°C
napajanje	2 x CR2 litijska baterija
smeri delovanja	$\pm X, \pm Y, \pm Z$
ponovljivost	0,5 μ m
merilna sila v X in Y osi	2 N
merilna sila v Z osi	12 N

Korekcijski sistem je dotični sistem, ki preko tipala in tipanja preverja, kje se nahaja v prostoru. Položaj revolverja in rezalnih orodij se vedno preverja samo po X koordinati, ker je X os glavna os gibanja rezalnih orodij pri obdelavi surovca. Položaj rezalnih orodij predstavlja položaj revolverja, ki se po koncu obdelovalnega cikla vedno pomakne v isti položaj.

Modul, na katerem je tipalo, se nahaja na revolverju in je vpet na enak način kot držala rezalnih orodij, sprejemnik, ki služi za prenos signalov iz modula v CNC krmilnik, pa je vgrajen v zgornji kot delovnega prostora (slika 5.2).



Slika 5.2: Vpet modul in sprejemnik.

Premikanje modula v delovnem prostoru se vrši z enakimi ukazi kot pri ostalih orodjih. V obdelovalni program je potrebno dodati še dodatne ukaze in spremenljivke za komuniciranje med korekcijskim sistemom in krmilnikom CNC stružnice.

Sistem deluje na način, da se pred začetkom obdelave tipalo pomakne do vpenjalne glave. S tem preveri, v katerem položaju je revolver, ko se je tipalo vpenjalne glave dotaknilo. Signal, ki se generira ob dotiku, prejme sprejemnik, le-ta pa ga naprej pošlje krmilniku. V signalu je zapis razlike obstoječega položaja revolverja in referenčne vrednosti njegovega položaja. Referenčna vrednost pomeni idealen položaj rezalnega orodja pri obdelavi. Dobimo jo takrat, ko je stroj ogret na delovno temperaturo in so obdelanci znotraj tolerančnega območja. Smatra se, da mora biti pot, ki jo opravi rezalno orodje od koordinatnega izhodišča in vse do točke začetka obdelave, vedno ista. Ko to razdaljo oz. končni položaj orodja dobimo, ko so obdelanci znotraj tolerančnega območja, pomeni, da smo dobili referenčno vrednost položaja orodja. Sklepamo lahko, da vedno, ko bo orodje v tem položaju oz. ko bo opravil tako pot od koordinatnega izhodišča do začetka obdelave, bodo obdelanci zadostili dimenzijskim tolerancam. Referenčno vrednost je potrebno določiti, ko se v modulu menjajo sestavna komponenta ali baterije.

Po zajemu referenčne vrednosti v programu nastavimo koliko zaporednih ciklov se naj preveri položaj rezalnih orodij in na vsake koliko ciklov se naj preveri položaj po tem, ko je število zaporednih ciklov merjenja že minilo.

Sistem deluje tako, da najprej pomeri pot in položaj revolverja. Dobljene vrednosti se primerjajo z referenčno vrednostjo. Na podlagi razlike med referenčno in dejansko vrednostjo, ki jo sprejemnik pošlje naprej v krmilnik, krmilnik samodejno korigira rezalna orodja v vrednosti te razlike. S korigiranjem rezalnih orodij je mišljeno korigiranje koordinatnega izhodišča revolverja. Po korekciji naj bi bilo koordinatno izhodišče enako referenčnemu. To pomeni, da bi po korekciji in obdelavi obdelanci morali biti dimenzijsko enaki obdelancem, ki so bili obdelani v času zajetja referenčne vrednosti.

Za preverjanje delovanja korekcijskega sistema je bilo potrebno izvesti več testov, s čimer bi ugotovili njegovo ustreznost. V magistrski nalogi je predstavljen glavni test.

5.1.1. Test delovanja korekcijskega sistema

Pogostost merjenja je edini parameter, ki je določen s strani uporabnika in se ga lahko spreminja poljubno. Nastavimo lahko, da korekcijski sistem izvede meritve vsak cikel, ampak to pomeni, da se čas cikla podaljša za 7 s, kar pri masivni proizvodnji kosov ni sprejemljivo.

Zaradi podaljšanja cikla smo se odločili, da nastavimo parametre tako, da bo sistem izvajal meritve in korekcije po tem, ko se je stroj ustavil za dalj časa (npr. 30 min). CNC stružnica se po 30-minutnem zastoju ohladi do te mere, da pri ponovnem zagonu potrebuje najmanj 10 ciklov obdelave, da se ogreje na delovno temperaturo. Ob tem se proizvajajo izmetni kosi, zato je bil glavni cilj integriranja korekcijskega sistema prav ta, da se število izmetnih kosov zaradi dimenzijskih odstopanj zmanjša oziroma izniči.

Test smo zastavili tako, da smo posnemali realni potek v proizvodnem procesu s to razliko, da se je po 30-minutnem zastoju zagnal korekcijski sistem.

Test lahko razdelimo na tri dele. V prvem delu je proizvodni proces potekal nemoteno. Ta del testa je potekal od 7.15 do 9.30, obdelalo se je 49 surovcev. Potem smo s procesom

zaključili za 30 min. Drugi del testa je potekal od 10.00 do 10.45, v tem časovnem intervalu smo obdelali 19 surovcev z vklopljenim korekcijskim sistemom. V tretjem delu pa smo zopet izklopili korekcijski sistem in obdelali 17 surovcev, saj smo predpostavili, da se je po devetnajstih ciklih obdelave stružnica že zadostno ogrela.

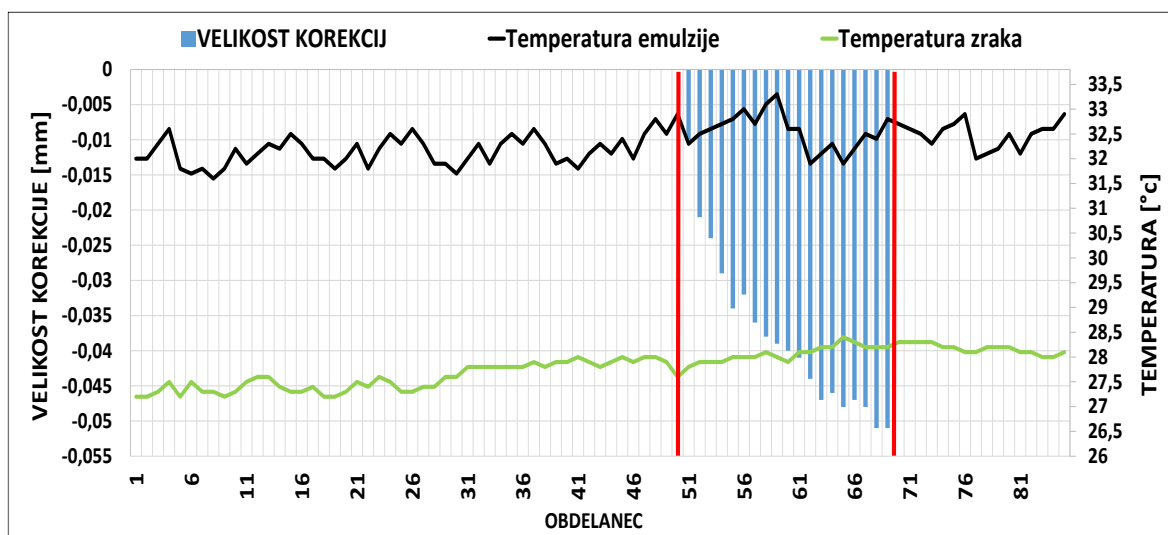
Med testom smo na enak način kot pri testu preverjanja obstoječega stanja beležili temperaturo zraka in emulzije.

Ko so se obdelanci odlagali na izhodni trak, smo jih številsko označevali in jih polagali v za to namenjeno košaro, kjer se je njihova temperatura ustalila na sobno temperaturo.

5.1.2. SPC analiza testa

Po izvedenem testu smo izvedli SPC analizo testa. Analiza je bila opravljena na tistih premerih, ki se v proizvodnem procesu 100 % kontrolirajo.

Poleg SPC analize smo opazovali tudi potek temperature emulzije in zraka ter njihov morebitni vpliv na potek obdelovalnega procesa (slika 5.3).



Slika 5.3: Prikaz poteka temperature emulzije in zraka ter korekcij.

Graf (slika 5.3) je sestavljen iz dveh linijskih diagramov in enega stolpičnega. Prva rdeča črta predstavlja 30-minutni odmor v obdelovalnem procesu, druga rdeča črta pa predstavlja ponovni zagon stružnice po tem, ko smo izklopili sistem za korigiranje. Linijski črti predstavljata potek temperature emulzije (črna linija) in potek temperature zraka (zelena linija). Vrednost posamezne temperature je bila odčitana pred začetkom vsakega cikla in je zabeležena na desni ordinati. Že pred testom smo sklepali, da se bosta temperaturi počasi dvigali, kar je vidno tudi iz grafa. Porast temperature skozi test je manjši od 1° C, zato lahko sklepamo, da temperatura ni imela vpliva na rezultate testa.

Stolpični diagram predstavlja velikost korekcij, ki jih je korekcijski sistem izvedel v času vključitve. Posamezen stolpec prikazuje posamezno korekcijo koordinatnega izhodišča, ki je bila izvedena pred vsakim ciklom obdelave. Vrednost korekcije je na levi ordinati.

Že iz tega grafa lahko sklepamo, da je v sistemu za korigiranje napaka. Preden se je sistem zagnal, je obdelovalni proces miroval 30 minut in se v tem času tudi ohladil. Logična posledica bi bila, da bi ob zagonu korekcijski sistem moral izvesti veliko korekcijo v višini do petih stotink milimetra (toliko namreč običajno odstopajo obdelanci ob ponovnem zagonu) in potem ob vsakem ciklu zmanjševati korekcijo proti vrednosti 0 μm . Iz grafa je lepo razvidno, da se korekcije samo še povečujejo, iz česar se lahko sklepa, da se dimenzije obdelancev oddaljujejo od tolerančnega območje.

Poteki dimenzij obdelancev so razvidni iz grafov v prilogi B (glej priloga B: Statistični nadzor procesa po vgradnji korekcijskega sistema).

Iz $\bar{X}$ -kart je razvidno, da je že stabilnost procesa vprašljiva, ker so številni obdelanci izven kontrolnih meja. Pri premeru s širšim tolerančnim območjem to ni tako očitno, medtem, ko je pri ostalih premerih tendenca gibanja mer k izhodu iz tolerančnega območja očitna.

Po dveh urah se je obdelovalni stroj zaustavil za 30 min, kar označuje prva rdeča vertikalna črta (slika 5.3). Po zaustavitvi se je vklopil sistem za samodejno korigiranje. Glede na to, da je stroj miroval 30 min, bi morala biti pri prvem ciklu korekcija večja od stotinke milimetra. Razloga za to, da ni bila velika sta lahko dva, ali se stroj dejansko ni ohladil ali pa je prišlo do napake pri kontaktu tipalo korekcijskega modula-vpenjalna glava. Če ne bi vklopili korekcijskega sistema in normalno zagnali obdelovalnega procesa, bi videli, da so obdelanci izven tolerance zaradi neogretega stroja. Torej lahko na podlagi prve korekcije, ki je bila majhna, sklepamo, da je prišlo do napake pri kontaktu. V naslednjih ciklih se je korekcija večala in večala, kar ni smiselno. Velikost korekcij bi morala limitirati k 0 do plus minus 4 μm . Iz grafov pa je lepo vidno, da je, preden smo dosegli št. 20 ciklov, korekcija bila vedno večja. Iz tega smo že ob testu sklepali, da so mere obdelancev neustrezne, kar pa je lepo vidno iz vseh $\bar{X}$ kart. Linija na kartah, ki prikazuje potek dimenzij obdelancev, se giblje vzporedno z opravljenimi korekcijami. Druga rdeča vertikalna črta (slika 5.3) prikazuje ponovno zaustavitev stroja in ročno korigiranje, da je proces potem lahko potekal nemoteno. Test ni potekal v skladu z našimi željami. Sklepamo lahko, da je prišlo ali do napake pri procesu merjenja, ko se je merilni trn dotaknil vpenjalne glave ali pa v komunikaciji med korekcijskim sistemom in obdelovalnim strojem.

V spodnji preglednici so razvidne statistične veličine opravljenega testa.

Preglednica 5.2: Prikaz rezultatov SPC analize po vgradnji korekcijskega sistema.

stat. veličine premer [mm]	$\bar{x}$ [mm]	σ [mm]	P_p	P_{pk}
Φ64,3	64,260	0,0143	0,22	0,12
Φ65	65,018	0,0174	0,44	0,35
Φ72	71,939	0,0165	0,2	-0,03
Φ88e6	87,9200	0,0163	0,22	0,16
Φ88h6	87,991	0,0161	0,23	0,19

Iz preglednice 5.2 in izračunanih statističnih veličin je razvidno, da vgrajeni sistem ni pripomogel k izboljšanju sposobnosti procesa. Dejanski koeficient sposobnosti procesa P_{pk}

je prenizek in jasno kaže na nesposobnost procesa. Standardna deviacija znaša več kot 0,015 mm kar predstavlja 75 % tolerančnega območja. Zgornja preglednica kaže na nesprejemljivo stanje procesa, če vključimo korekcijski sistem, kar pomeni, da z njim obstoječega stanja nismo izboljšali.

Izvedeni testi kažejo na to, da je točnost in ponovljivost stroja slaba, zato se je podjetje odločilo, da bo umerilo stroj in preverilo njegovo točnost. V primeru slabe točnosti bi lahko že našli enega izmed morebitnih razlogov za nesposobnost obdelovalnega procesa.

5.2. Umerjanje obdelovalnega stroja z laserjem

Po preverjanju obstoječega stanja obdelovalnega procesa in po vgradnji sistema za samodejno korigiranje koordinatnega izhodišča še vedno nismo prišli do zelenih rezultatov. Sposobnost procesa se po vgrajenemu sistemu ni izboljšala, prav tako pa nismo dosegli boljše stabilnosti.

Ker v razmaku nekaj ciklov dobimo obdelance, pri katerih se opazovane dimenzije razlikujejo, pomeni, da ima lahko CNC stružnica problem s točnostjo in ponovljivostjo. Pod problemom točnosti stroja mislimo, da dimenzije obdelancev niso okrog vrednosti, ki je podana v obdelovalnem programu, pod problemom ponovljivosti pa je mišljeno, da stroj ni sposoben zagotavljati, da bi obdelanec imel vedno enake dimenzije premera.

Preverjanje točnosti in ponovljivosti smo izvedli z laserskimi meritvami.

5.2.1. Preverjanje točnosti in umerjanje stroja

Preglednica 5.3: Osnovni podatki laserskih meritev.

ime stroja in tip	MORISEIKI NZ1500T2Y2, CNC stružnica
krmilnik	FANUC 31i
merilna oprema	ML 10 Gold Standard Renishaw
PARAMETRI TESTIRANJA	
merjene osi	X
koef. temp. raztezka za enkoder	$11,7 \mu\text{m}/(\text{m}^\circ\text{C})$
dolžina merjenja v X -osi	210 mm
podajalna hitrost	2000 mm/min
korak meritve za X os	10 mm

Za merjenje točnosti in natančnosti je bil uporabljen laserski sistem ML10 Gold Standard (). Sistem je zasnovan za vrednotenje natančnosti pozicioniranja. Z visoko natančnostjo enofrekvenčnega laserskega vira, ki vsebuje elektroniko za stabilizacijo žarka, interpolacijo in šteje interferenčnih prog, lahko z nanometrsko ločljivostjo merimo velikost napak oz. odstopanj na obdelovalnih strojih in koordinatnih merilnih napravah. S pomočjo programskega paketa se nato iz meritev odstopkov izdelajo kompenzacijske preglednice

odstopanj, ki se s podatkovnim kablom avtomatsko ali ročno lahko vnesejo v krmilnik stroja [25].



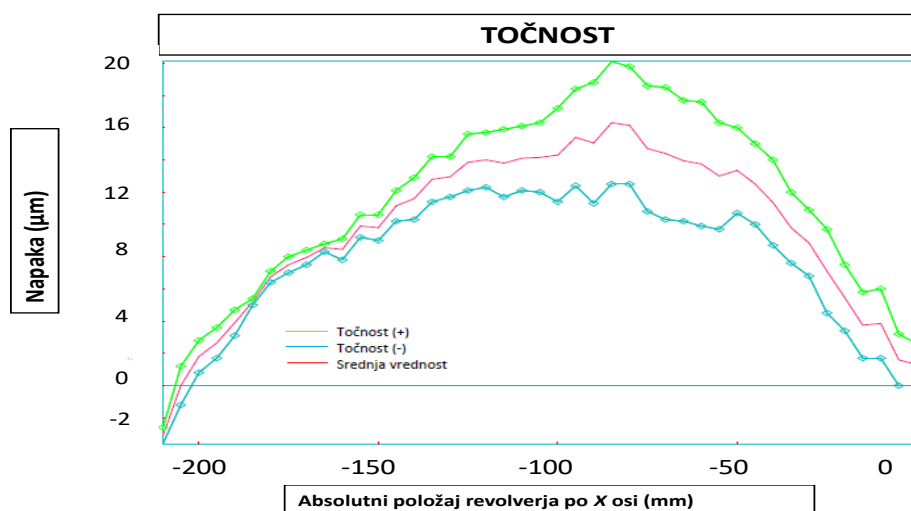
Slika 5.4: Laserski sistem ML10 Gold Standard [26].

Pri meritvah z laserskim sistemom je potrebno laserski žarek poravnati z osjo obdelovalnega stroja. Sistem sestoji iz laserskega izvora, kompenzacijske naprave, fiksne optike in gibljive optike.

Pri obeh meritvah je bila optika postavljena na naslednji način: stacionarni interferometer je bil postavljen na glavnem vretenu, gibljivi reflektor pa na mizo stroja. Reflektor se je pomikal z določenim korakom vzdolž posamezne osi. Na vsaki poziciji je bil programiran premor 4 s za zajem meritve. V skrajnih legah meritve je bil vstavljen odmik 1 mm za zajem vpliva zračnosti. Meritve osi so potekale v enem prehodu. Kompenzacijska naprava (EC 10) zagotavlja natančno merjenje linearnega pomika ($0,7 \mu\text{m/m}$) s kompenzacijo vplivov okolja (temperatura zraka in materiala, relativna vlažnost in zračni tlak).

5.2.1.1. Rezultati meritve

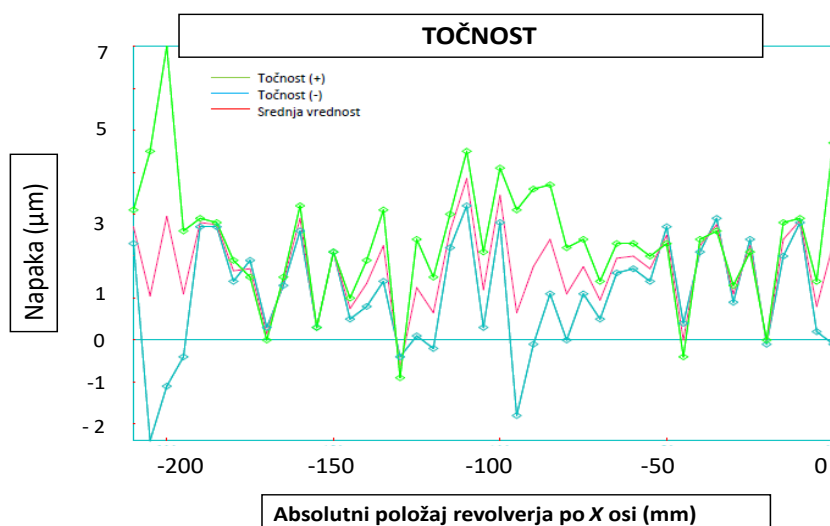
Najprej smo preverili obstoječe stanje pozicijske točnosti. Dobili smo naslednji graf (slika 5.5).



Slika 5.5: Začetno stanje.

Pri preverjanju začetnega stanja smo dobili graf, ki kaže veliko odstopanje od ničelne lege. Surovec se obdeluje v območju od -80 mm do -180 mm, kar je ravno v območju največje napake. Na podlagi te napake so bile v krmilnik vnesene kompenzacije. Po vnesenih kompenzacijah, smo zopet preverili stanje točnosti stroja.

Stanje stroja po vnesenih kompenzacijah je prikazano na naslednjemu grafu (slika 5.6).



Slika 5.6: Stanje po kompenzaciji.

Iz predstavljenih rezultatov je razvidno, da se je pozicijska točnost stroja v X osi izboljšala iz začetnih 29 µm na 9 µm. Dejansko izboljšanje je iz 29 µm na 4,5 µm, vendar je v rezultat končne točnosti zajeta tudi histereza pri 200 mm, ki vpliva na celotno točnost, ne vpliva pa na točnost v območju, kjer poteka strojna obdelava. V osi je prisotna zračnost v višini približno 1 µm.

5.2.2. Statistična analiza procesa po umerjanju

Po preverjanju točnosti stroja in kasnejšemu umerjanju smo izvedli SPC analizo. Zajeli smo meritve na 101 obdelancu in preverili koeficiente sposobnosti procesa P_{pk} . Pričakovali smo, da se je sposobnost procesa izboljšala na podlagi umerjanja in vnesenih kompenzacij. Analize meritev so predstavljene na grafih v prilogi C (glej priloga C: Statistični nadzor procesa po umerjanju CNC stružnice).

Preglednica 5.4: Prikaz rezultatov SPC analize po umerjanju.

stat. veličine premer [mm]	$\bar{x}$ [mm]	σ [mm]	P_p	P_{pk}
Φ64,3	64,260	0,0024	1,3	0,74
Φ65	65,012	0,0024	3,18	1,63
Φ72	71,952	0,0014	2,33	2,18
Φ88e6	87,919	0,0038	0,96	0,81
Φ88h6	87,982	0,0037	0,99	0,34

X in R karte kažejo, da se je stabilnost procesa po umerjanju CNC stružnice izboljšala na vseh opazovanih premerih, a kljub temu izboljšanje stabilnosti procesa še vseeno ni zadostno. Na vseh X kartah iz tega testa so vidni nenadni skoki dimenzij v območja zunaj kontrolnih meja. Iz preglednice 5.4 je razvidno, da se zaradi nenadnih odstopanj tudi sposobnost procesa ni zadostno izboljšala na vseh premerih. Sposobnost procesa se je izboljšala na premerih 65 mm in premerih 72 mm, kjer je koeficient P_{pk} zavzel zadovoljivo in zeleno vrednost. Pri ostalih premerih je P_{pk} premajhen. 59. in 60. obdelanec, na premerih 88 mm, nista v skladu s prejšnjimi in kasnejšimi meritvami. Iz tega lahko sklepamo, da smo pri merjenju naredili napako. Napaka je bila verjetno storjena v nečistoči površine oziroma točke, kjer poteka merjenje. Če bi popravili ti dve meritvi, bi se tako stabilnost kot sposobnost procesa izboljšala.

Četudi vrednosti P_{pk} kažejo na izboljšanje sposobnosti procesa, tako kot standardni odklon, ki se je od prejšnjega testa občutno izboljšala, še vedno nismo v celoti dosegli zelenih rezultatov. Kljub temu da se je stroj umeril, imamo še vedno dimenzijska odstopanja. Na stroju smo preverili in odpravili napako točnosti, nismo pa potem preverili ponovljivosti stroja, ki bi na podlagi popravka točnosti verjetno bila tudi izboljšana.

Z umerjanjem stroja smo odkrili napako netočnosti in na podlagi tega tudi izboljšali stanje procesa. Koeficienti sposobnosti procesa P_{pk} so v primerjavi s stanjem pred izboljšavami višji. To pomeni, da se je sposobnost procesa izboljšala. Znatneje pa smo z umerjanjem zmanjšali standardno odklon, kar pomeni, da se je stabilnost procesa izboljšala.

Na potek obdelovalnega procesa vplivajo procesni parametri, ki smo jih v nadaljevanju spreminjali in poskušali ugotoviti velikost njihovega vpliva. Optimiziranje procesnih parametrov smo izvedli z metodo načrtovanja eksperimentov.

6. Optimizacija procesnih parametrov

Obdelovalni procesi so podvrženi različnim dejavnikom in vplivom različnih procesnih parametrov. V kakšni velikosti določeni procesni parametri vplivajo na obdelovalni proces, lahko ugotovimo preko izvajanja eksperimentov, kjer zaradi spreminjanja parametrov dobimo različne odzive. Eksperimenti se zato izvajajo z namenom raziskovanja in kasnejše optimizacije opazovanih procesnih parametrov.

6.1. Metoda načrtovanja eksperimentov

Metoda načrtovanja eksperimentov (angl. *DOE-Design of experiments*) je statistični model, ki sloni na matematični funkciji, s katerim popisujemo različne procese (znanstvene, inženirske). Pri izvajanju postopka spreminjamo več različnih vhodnih parametrov in opazujemo kateri parametri najbolj vplivajo na opazovani odziv in kateri parametri sploh ne vplivajo [4].

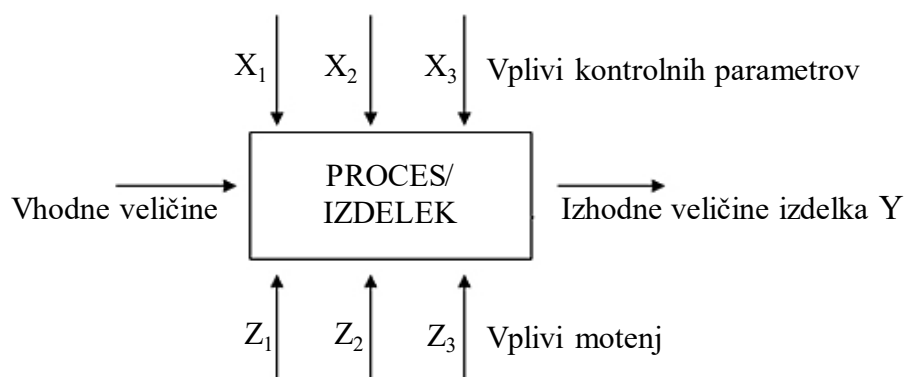
Metodo načrtovanja eksperimentov uporabljamo pri [4]:

- razvoju novega izdelka
- uvajanju nove tehnologije in procesa izdelave
- izboljšanju kakovosti izdelka in procesa
- stabiliziranju procesa

Načrtovanje eksperimentov izvajamo zaradi [4, 27, 28]:

- moderne metode optimizacije procesov
- manjšega števila potrebnih poskusov
- statistične zanesljivosti rezultatov
- upoštevanja vpliva interakcij in okolja
- iskanja faktorjev, ki vodijo k željeni vrednosti in imajo čim manjši raztros

Iskanje faktorjev si lahko predstavljamo na spodnjem modelu procesa, na katerega vplivajo različne spremenljivke kot vhodne veličine in iz katerega dobimo končni rezultat kot izhodno veličino (slika 6.1).



Slika 6.1: Model procesa z vhodnimi in izhodnimi spremenljivkami [29].

Metodologija je razdeljena na pet temeljnih faz [4]:

- planiranje
- načrtovanje
- izvajanje
- analiza
- potrditev

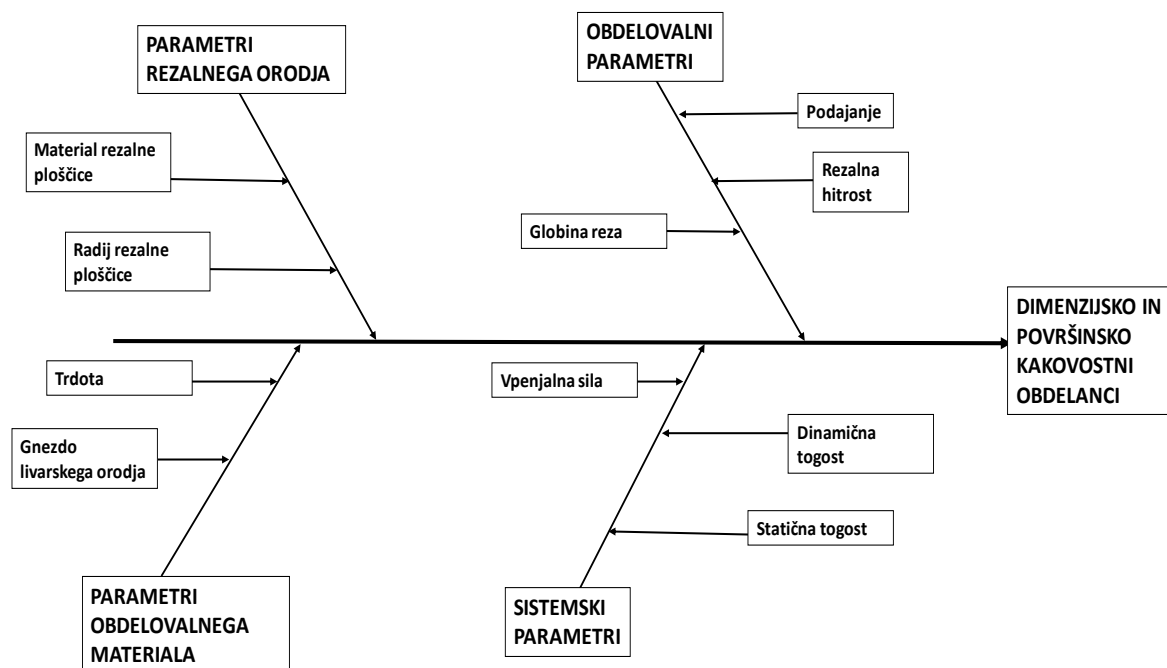
6.1.1. Planiranje eksperimenta

Planiranje eksperimenta izvajamo na slednji način [4]:

- določimo vzroke problemov,
- določimo odziv, ki ga merimo,
- določimo eksperimentalne parametre,
- klasificiramo parametre eksperimenta,
- določimo nivoje eksperimentalnih parametrov.

Vzroke problemov določimo s pomočjo vseh, ki so vključeni v proces, ki ga hočemo optimizirati. Orodje, s katerim najlažje in najhitreje izluščimo probleme v procesu, je diagram ribje kosti (slika 6.2).

V delu Enika in sodelavcev [30] je predstavljeno, da je ključno vlogo v obdelovalnem procesu imela neproduktna operacija vpenjanja kosa, zato je pomembno, da v diagram vzrokov vključimo čim več faktorjev, ki bi lahko imelo vpliv na opazovan odziv.



Slika 6.2: Ishikawa diagram za proces obdelave.

Odziv, ki ga opazujemo, je lahko kvantitativen (merljiv) ali pa kvalitativen (opisen). Pri eksperimentih je lažje, če opazujemo kvantitativne odzive, ker odziv popišemo numerično in je zato bolj jasno definiran, kot če ga opišemo kot dober/slab itd [4]. V našem primeru imamo dva merljiva odziva: ovalnost obdelancev in hrapavost.

Eksperimentalne parametre določimo na več načinov. Običajno jih določimo na podlagi inženirskega znanja, zgodovinskih podatkov, analiz vzrokov in posledic, "brainstorminga". V praksi lahko v začetni fazi izvedemo eksperiment, z namenom, da pridobimo ključne eksperimentalne parametre ali faktorje, ki bi bolj ali manj vplivali na končen rezultat [4].

Definirane eksperimentalne parametre moramo klasificirati na vplivne in šumne parametre. Vplivni parametri so tisti parametri, ki jih mi nadzorujemo. V našem procesu struženja so to podajanje, globina reza in vpenjalna sila. Šumni parametri so tisti parametri, ki jih ne moremo kontrolirati kot so npr. vlaga v zraku, temperatura, napake osnovnega materiala itd.. Za zmanjšanje le-teh moramo eksperimente ponavljati, jih izvajati naključno ali v blokih [4].

Število nivojev v eksperimentu je število vrednosti določenega parametra v eksperimentu. Od parametra je odvisno, koliko nivojev bo zavzel. Za numerične parametre (podajanje, globina reza, vpenjalni tlak) zadostujeta že dva nivoja, medtem ko za parametre, ki jih numerično ne moremo popisati (vrsta materiala), potrebujemo več nivojev [4].

Obliko eksperimenta, ki ga želimo izvesti, je potrebno določiti v fazi načrtovanja. Poznamo več oblik: faktorski in delni faktorski načrt, načrt s središčno zasnovo (angl. CCD- *Central composite design*), načrt Box-Behnken, ortogonalne matrike. Velikost načrta je odvisna od števila faktorjev in njihovih nivojev ter finančnih in operativnih sredstev. Pred izvajanjem eksperimenta moramo pripraviti preglednico iz katere je potek eksperimenta jasno razviden.

V preglednici je navedeno zaporedje eksperimentov in nivoji oz. vrednosti, ki jih posamezen parameter na določenem nivoju zavzame [4].

6.1.2. Izvajanje eksperimenta

Ko končamo z načrtovanjem eksperimenta, sledi njegova izvedba. Pred izvedbo eksperimentov moramo preveriti:

- ustrezno lokacijo za izvedbo (brez vplivov okolja: vibracije, vlažnost, T, ...),
- razpoložljivost materiala/delov, operaterjev, strojev potrebnih za izvedbo eksperimentov,
- upravičenost izvedbe eksperimenta glede na ceno.

Zaželeni koraki pri izvedbi eksperimentov:

- operater zadolžen za izvedbo mora pri eksperimentu biti vedno prisoten,
- spremljati je potrebno dogajanje med izvedbo eksperimenta in biti pozoren na neskladnosti, ki vodijo v nepravilne rezultate,
- vrednosti odziva naj se sproti pišejo v pripravljeno preglednico.

6.1.3. Analiza eksperimenta

V tej fazi analiziramo rezultate, dobljene v eksperimentih. Z analizo lahko ugotovimo:

- kateri so nastavljivi procesni parametri, ki vplivajo na učinkovitost procesa (opazovan odziv oz. merjeno izhodno veličino),
- kateri so nastavljivi procesni parametri, ki vplivajo na variabilnost učinkovitosti procesa (nestabilnost procesa),
- nivoje za nastavljanje procesnih parametrov za doseg optimalne učinkovitosti procesa
- če je proces še mogoče izboljšati.

6.1.4. Potrditev eksperimenta

Po analizi rezultatov eksperimentov moramo opraviti še potrditev eksperimenta, katerega cilj je potrditev rezultatov, ki smo jih dobili z analizo. V primeru, da rezultati potrditvenega eksperimenta ne ustrezajo, je potrebno izvesti še dodatne eksperimente, na podlagi katerih sklepamo o vzrokih za neustreznost potrditvenega testa.

Najprej izvedemo več potrditvenih testov. Iz rezultatov dobimo povprečje in standardno deviacijo iz katerih potem izračunamo statistični interval zaupanja (enačba 6.1) (z 99 % gotovostjo zaupanja) [31].

$$CI = \bar{y} \pm 3 * \left\{ \frac{S}{\sqrt{n}} \right\} \quad (6.1)$$

$\bar{y}$srednji odziv dobljen pri potrditvenih testih

Sstandardna deviacija

nštevilo potrditvenih testov

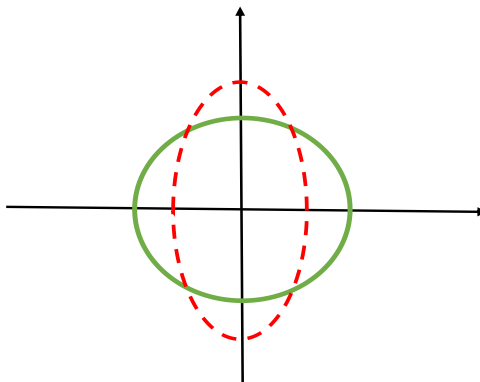
Ustrezen regresijski model je tisti model, katerega rezultati se nahajajo znotraj statističnega intervala zaupanja. Če se ne nahaja znotraj intervala, je prišlo do napake, za katero je lahko več vzrokov:

- oblika eksperimenta ni bila ustrezno izbrana
- odziv eksperimenta ni bil pravilno izbran
- šumni faktorji nad katerimi nimamo kontrole, so imeli prevelik vpliv
- zgodila se je napaka v izvedbi eksperimenta
- prišlo je do napake pri merjenju odziva

6.2. Izbira odzivov in procesnih parametrov

V fazi načrtovanja eksperimenta smo določili, katere parametre bomo skozi eksperiment spreminjali. Parametri so bili izbrani na podlagi izbora merjene izhodne veličine. Merjeni izhodni veličini sta bili dve:

- **Ovalnost ali nekrožnost:** to je nepravilna oblika merjenega premera na obdelancu (slika 6.3)



Slika 6.3: Prikaz ovalnosti.

Zeleno obarvana krožnica (Slika 6.3) je idealen primer, kjer je ovalnost $0 \mu\text{m}$. Rdeča prekinjena krožnica (Slika 6.3) pa je realen primer ovalnosti, ki je večja od $0 \mu\text{m}$. Do pojava ovalnosti pride, ker vpenjalne čeljusti ne vpnejo surovca enakomerno po obodu. Enakomerno vpetje ni mogoče zaradi nesimetrične oblike surovca. Ovalnost smo merili na merilni postaji poleg obdelovalne celice (Slika 3.11). Velikost ovalnosti smo dobili iz razlike med maksimalno in minimalno pomejenim premerom.

- **Hrapavost:** kot odziv smo merili hrapavost z namenom kontrole eksperimenta. Na obdelancu je pomembno, da je dimenzijsko znotraj tolerančnega območja in da je kakovost površine primerna. Če bi spreminjali procesne parametre neozirajoče se na potek kakovosti površine, bi bila izvedba eksperimentov zamen.

Hrapavost smo merili na merilniku hrapavosti Mitutoyo (slika 6.4).



Slika 6.4: Proces merjenja hrapavosti na merilniku hrapavosti Mitutoyo.

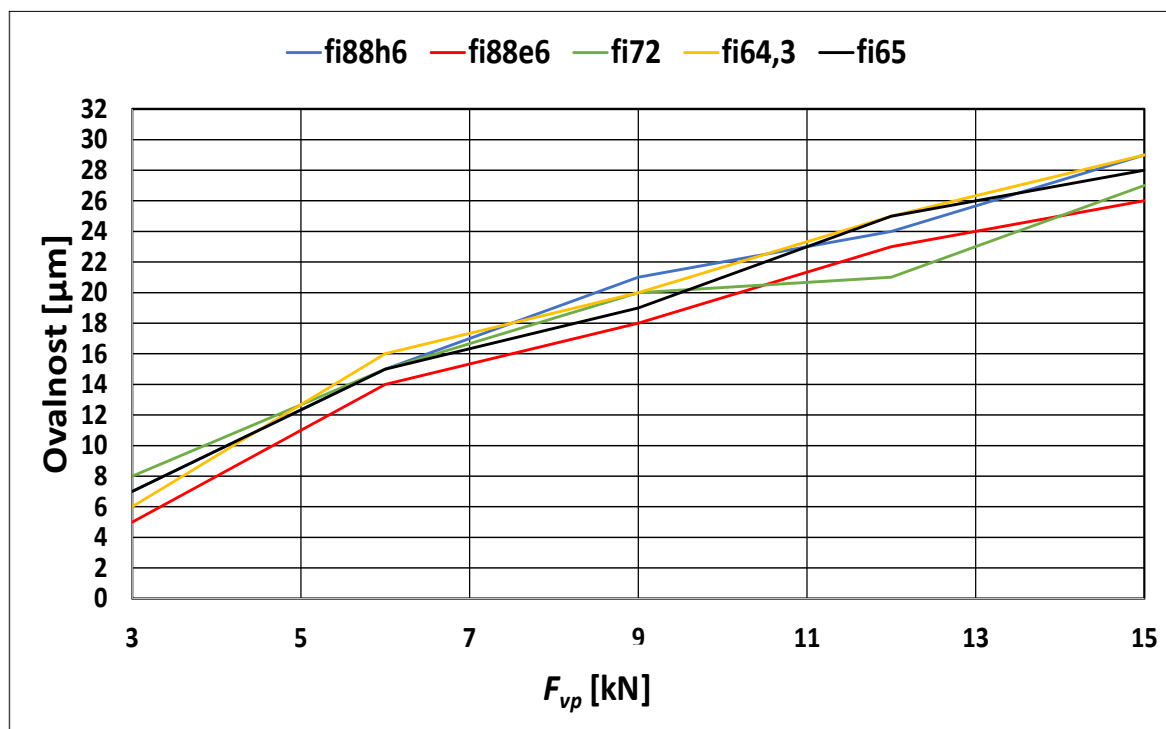
Maksimalna dovoljena hrapavost na obdelanih površinah je $R_z=10\text{ }\mu\text{m}$. V stanju pred izvedbo eksperimentov je bila hrapavost petkrat nižja od maksimalno dovoljene.

Na podlagi zgoraj opisanih merjenih izhodnih veličin, smo določili vhodne procesne parametre, kateri bi na izhodne veličine lahko vplivali:

- podajanje f_n [mm/vrt]
- globina reza a_p [mm]
- vpenjalna sila F_{vp} [kN]

K vplivnim vhodnim parametrom nismo dodali rezalne hitrosti, ker je vrtilna hitrost vretena, ki je z rezalno hitrostjo neposredno povezana, že na maksimumu. Dodali nismo tudi radija rezalne ploščice, četudi se vsi premeri na surovcu ne obdelujejo z orodji, katerih ploščice bi imele enak radij. Bistvo eksperimentov je, da najdemo tisti procesni parameter, ki najbolj vpliva na ovalnost. Iz teorije vemo, da na hrapavost površine vplivata podajanje f in radij rezalne ploščice r . Hrapavost je zgolj kontrolna izhodna veličina, ki bi ji s spreminjanjem radija dodali še en vhodni parameter, kar bi rezultiralo v večjem številu eksperimentov, ne pa v številu informacij, ki bi bile ključne za eksperiment.

Pred določitvijo nivojev in vrednosti parametrov, ki bi te nivoje zasedli, smo analizirali še, kako se pri enaki vpenjalni sili razlikuje ovalnost na vseh petih premerih (slika 6.5).



Slika 6.5: Ovalnost na vseh petih premerih.

S tem testom smo ugotovili, da vpenjalna sila deluje na vse premere tako podobno, da lahko eksperimente s spreminjanjem vhodnih parametrov izvedemo samo na enem premeru.

Preglednica 6.1: Interval priporočenih vrednosti parametrov f_n in a_p [32] in F_{vp} .

f_n [mm/vrt]	a_p [mm]	F_{vp} [kN]
0,05-0,5	0,06-3,5	3-20

Interval priporočenih vrednosti za f_n , in a_p je določen s strani proizvajalca orodij, za F_{vp} pa s strani dobavitelja vpenjalnih cilindrov. Maksimalne in minimalne vrednosti vhodnih parametrov v eksperimentu ne sovpadajo z intervalom iz preglednice 6.1.

Vrednosti, ki smo jih uporabili v eksperimentu, smo določili na naslednji način:

- **Podajanje:** Določili smo ga tako, da je vrednost maksimalnega podajanja taka, da je hrapavost od 3-4 μm izven dovoljenega območja. Določili smo ga s pomočjo enačbe, s katero dobimo teoretično hrapavost ob danih parametrih. Informacija, kako podajanje vpliva na ovalnost obdelanca, bo bila zajeta že prej in je zato nesmiselno, da se podajanje še povečuje. Minimalna vrednost podajanja pa je bila določena iz priporočil proizvajalca.
- **Globina rezanja:** Minimalna globina rezanja je bila določena iz priporočil proizvajalca. Maksimalna globina rezanja pa je bila določena na podlagi surovega dodatka, ki je 0,7 mm/steno. Globino rezanja smo zmanjšali za dve stotinki milimetra v primerjavi z dodatkom, zaradi stabilnosti obdelave.
- **Vpenjalna sila:** Vpenjalno silo reguliramo z nastavljanjem vpenjalnega tlaka. Z merilcem sile, opisanem v poglavju 3.1.1., smo določili minimalno in maksimalno silo.

Minimalna sila je bila določena pri 2700 vrtljajih na minuto in je bila tista sila, ki je merilnik še bil sposoben izmeriti. Znašala je 3 kN. Izkazalo se je, da je pri tej vpenjalni sili obdelava še stabilna, medtem ko je pri manjši vpenjalni sili že prišlo do vibracij surovca, zaradi prevelikega razprtja vpenjalnih čeljusti. Maksimalna sila je navzgor omejena z maksimalnim dovoljenim tlakom na vpenjalnem cilindru. Za eksperiment nismo izbrali tako velike sile, pač pa smo izbrali štirikratno vrednost minimalne sile in je znašala 12 kN.

Preglednica 6.2: Vrednosti vhodnih parametrov na posameznem nivoju.

nivo \ parameter	f_n [mm/vrt]	a_p [mm]	F_{vp} [kN]
-1	0,05	0,06	3
0	0,12	0,371	7,5
1	0,19	0,681	12

Potem ko smo določili vrednosti procesnih parametrov, ki zavzemajo dane nivoje, smo izvedli preliminarne preizkus.

6.3. Preliminaren preizkus

Bistvo preliminarne preizkusa je, da preverimo izbrane procesne parametre na vseh nivojih.

Preglednica 6.3: Načrt preliminarne testa.

	f_n [mm/vrt]	a_p [mm]	F_{vp} [kN]
1.test	0,05	0,06	3
2.test	0,12	0,371	7,5
3.test	0,19	0,681	12

Rezultati eksperimenta sledijo v naslednji preglednici 6.4.

Preglednica 6.4: Rezultati preliminarne testa.

	ovalnost [μm]	R_z [μm]
1.test	7	2,090
2.test	18	5,637
3.test	25	13,482

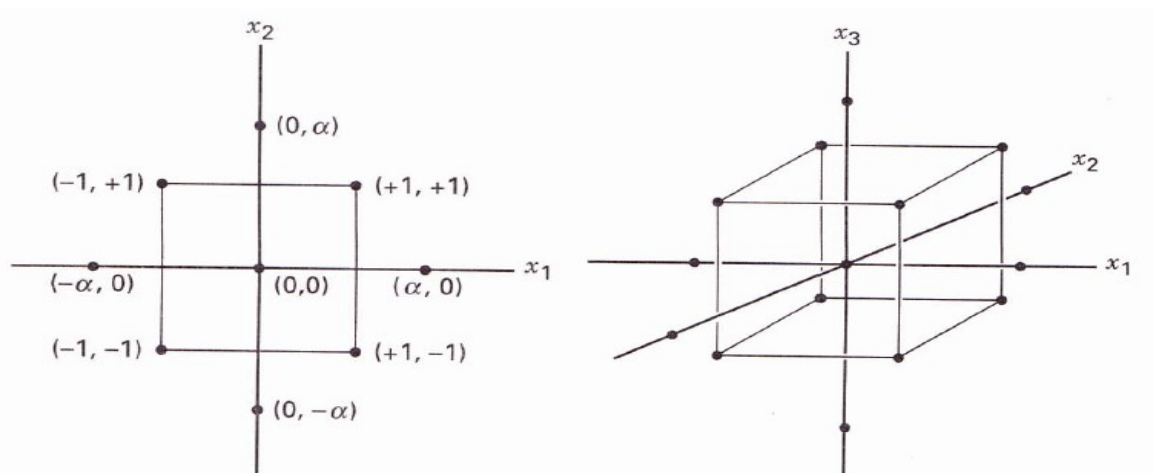
Iz preglednice 6.4 so razvidni rezultati. Na podlagi izkušenj in predvidevanj smo sklepali, da bo ovalnost med 5 in 30 μm ter hrapavost v velikosti do 15 μm . Med testi pri izvajanju ni bilo težav, zato lahko iz rezultatov preliminarne preizkusa sklepamo, da so bili procesni parametri in vrednosti procesnih parametrov na posameznih nivojih izbrani pravilno.

6.4. Načrt in izvedba eksperimenta

Načrt in kasnejša analiza izvedenega eksperimenta je bila opravljena s programskim paketom Design Expert, ki omogoča izbiro različnih modelov eksperimentov in karakterizacijo ter optimizacijo procesnih parametrov.

Za model eksperimenta smo si izbrali načrt eksperimenta s središčno zasnovo (angl. *CCD-central composite desgin*), ki spada k metodologiji odziva površine (angl. *Response surface methodology*). Cilj je, da poiščemo take vrednosti spremenljivk, da bo odziv površine optimalen.

CCD je faktorialni oz. delno faktorialni načrt s središčnimi in faktorialnimi točkami (Slika 6.6). Na sliki 6.6 so prikazane tudi osne točke (označene z 0 in α - vrstni red in predznak sta odvisna od tega na kateri osi je osna točka). V našem primeru osnih točk ni bilo, ker smo izbrali središčni načrt (angl. *Face centered*), kjer α zaseda mesto faktorialnih točk in je njena absolutna vrednost 1. Ker smo izbrali načrt s središčno zasnovo in središčno centriran, imamo procesne parametre na treh nivojih: -1 zaseda minimalno vrednost parametrov, 1 zaseda maksimalno vrednost, 0 pa zaseda srednjo vrednost parametra.



Slika 6.6: Predstavitev načrta s središčnimi in robnimi točkami [29].

Ker imamo tri vhodne parametre na treh nivojih, je nastal načrt z 20 testi, katerega potek je v spodnji preglednici 6.5.

Preglednica 6.5: Načrt eksperimentov.

test	F_{vp} [kN]	a_p [mm]	f_n [mm/vrt]
1	3	0,06	0,05
2	12	0,06	0,05
3	3	0,681	0,05
4	12	0,681	0,05
5	3	0,06	0,19
6	12	0,06	0,19
7	3	0,681	0,19
8	12	0,681	0,19
9	3	0,3705	0,12
10	12	0,3705	0,12
11	7,5	0,06	0,12
12	7,5	0,681	0,12
13	7,5	0,3705	0,05
14	7,5	0,3705	0,19
15	7,5	0,3705	0,12
16	7,5	0,3705	0,12
17	7,5	0,3705	0,12
18	7,5	0,3705	0,12
19	7,5	0,3705	0,12
20	7,5	0,3705	0,12

Na podlagi preglednice 6.5 smo izvedli eksperimente. Eksperimenti niso bili izvedeni v takem vrstnem redu, kot kaže zgornja preglednica. Naključni vrstni red, podan s strani programa Design Expert, ni bil upoštevan zaradi težavnosti določanja prave vpenjalne sile. Vpenjalna sila se je nastavljala z vrtenjem dušilke na vpenjalnem cilindru. Tlak vzpostavljen v cilindru se je spremljal na analognem merilcu tlaka. Če bi nastavljali različne tlake z vsakim testom, bi zagotovo storili napako, ker ne bi bili natančni pri nastavljanju in bi vpenjalna sila pri določenem eksperimentalnem nivoju zavzemala med seboj različne vrednosti. Potek eksperimenta je bil zato tak, da smo nastavili tlak, pomerili vpenjalno silo pri 2700 vrtljajih na minuto (vrtilna hitrost vretena v obdelovalnem procesu) ter nato izvedli vse eksperimente, ki so zahtevali silo na tem določenem nivoju.

Ko se je določen eksperiment izvedel, smo pomerili ovalnost na bližnji merilni postaji (slika 3.11) ter hrapavost na merilniku hrapavosti Mitutoyo (slika 6.4). Med izvedbo eksperimentov nismo opazili nobenih nenavadnih odstopanj, zato smo sklepali, da bodo rezultati v skladu s pričakovanji.

6.5. Analiza in vrednotenje rezultatov eksperimenta

Po izvedbi eksperimentov in zajemu meritev smo opravili analizo rezultatov. Meritve so prikazane v naslednji preglednici.

Preglednica 6.6: Prikaz rezultatov eksperimenta.

F_{vp} [kN]	a_p [mm]	f_n [mm/vrt]	ovalnost [μm]	R_z [μm]
3	0,06	0,05	7	2,072
12	0,06	0,05	25	2,369
3	0,681	0,05	7	2,473
12	0,681	0,05	20	3,661
3	0,06	0,19	6	13,303
12	0,06	0,19	23	12,99
3	0,681	0,19	7	14,422
12	0,681	0,19	24	13,32
3	0,3705	0,12	7	5,399
12	0,3705	0,12	23	5,824
7,5	0,06	0,12	19	5,525
7,5	0,681	0,12	17	5,493
7,5	0,3705	0,05	18	3,069
7,5	0,3705	0,19	18	13,817
7,5	0,3705	0,12	19	5,854
7,5	0,3705	0,12	18	5,912
7,5	0,3705	0,12	19	5,601
7,5	0,3705	0,12	19	5,893
7,5	0,3705	0,12	18	5,834
7,5	0,3705	0,12	18	5,423

Če primerjamo rezultate z preglednice 6.6 in preliminarni preizkus, vidimo, da so rezultati dovolj podobni, kar pomeni, da so eksperimenti v skladu z našimi pričakovanji.

6.5.1. Analiza regresijskih modelov

Za analizo rezultatov smo uporabili program Design Expert. ki na podlagi vpisanih vhodnih parametrov, omogoča analizo opazovanih izhodnih veličin. Na podlagi odziva programsko orodje ustvari matematični model, iz katerega se razvije regresijski model. Regresijski model se potem analizira s pomočjo analize variance (angl. Analysis of

variance –ANOVA). V naših eksperimentih smo spremljali dve izhodni veličini, kar pomeni, da smo dobili dva regresijska modela za analizo.

Za popis modela je bil izbran polinom drug stopnje. Ko je bila opravljena analiza variance, se je ovrednotilo posamezne regresorje modela. Regresorji so ovrednoteni numerično na podlagi naslednjih vrednosti koeficientov [29] :

- F vrednosti: Vrednost F primerja varianco modela z varianco napake. Cilj je, da je vrednost F čim večja, kar kaže na značilnost modela.
- R^2 : To je vrednost, ki popisuje velikost variacije okoli povprečja, ki je dobljeno preko modela. Vrednost mora biti čim bližje 1, minimalna sprejemljiva vrednost je 0,6. Koeficient R^2 kvantitativno opredeli kakovost regresijskega modela [33]
- $Adj-R^2$: To je nastavljen parameter, ki popisuje velikost variacije okoli povprečja, dobljenega preko modela in je prilagojen (angl. *Adjusted*) številu vplivnih parametrov v modelu.
- $Pred-R^2$: To je predviden parameter, ki popisuje velikosti variacije podatkov pridobljenih z modelom. Razlika med $Pred-R^2$ in $Adj-R^2$ je lahko največ 0.2. Če je razlika večja, model ni korekten. Pomembno je, da sta obe vrednosti blizu R^2
- S/N razmerje: To je razmerje med signalom in šumom. Večje je razmerje, večji vpliv ima signal nad šumom
- p vrednost: Vrednost p omogoča razvrščanje vplivnosti regresorjev, pri čemer najbolj vpliven regresor zavzame najmanjšo p -vrednost. Vrednost p mora biti manjša od 0,05. Na podlagi analize variance regresijskega modela lahko s 5 % tveganjem sklepamo, da so linearne in kvadratne stopnje modelov z regresorji statistično značilne. Z omejitvijo regresijskega modela zmanjšamo njegovo kompleksnost in povečamo kakovost napovedi.

V naslednji preglednici (preglednica 6.7) so prikazane vrednosti za oba regresijska modela - ovalnost in Rz . Parametri, katerih vrednost p je večja od 0,05, so bili zaradi nevplivnosti vzeti iz modela in v preglednici niso prikazani.

Preglednica 6.7: Vrednosti regresijskih modelov.

odzivna veličina	F vrednost	vplivni parametri	R^2	$Adj-R^2$	$Pred-R^2$	S/N
ovalnost	571,5	$F; a_p, f; F^*a_p; F^*f; a_p^*f; F^2$	0,997	0,995	0,984	66,937
Rz	756,1	$a_p, f; F^*f, f^2$	0,996	0,995	0,990	75,722

Obe odzivni veličini imata veliki F vrednosti, kar kaže na signifikantnost modelov, ni pa nujno, da so vsi parametri dejansko vplivni, ker so v regresijskem modelu. Možnost je, da so zajeti v modelu zgolj zato, ker so posamezni parametri v interakciji z drugim parametrom vplivni, ne pa parametri sami. Iz modela jih zato ne smemo vzeti, ker bi potem vplivali na njegovo hierarhičnost. Ostale vrednosti koeficientov kažejo na statistično značilnost obeh modelov.

V nadaljevanju sledi posamezna analiza regresijskih modelov za opazovani odzivni veličini.

6.5.2. Regresijski model ovalnosti

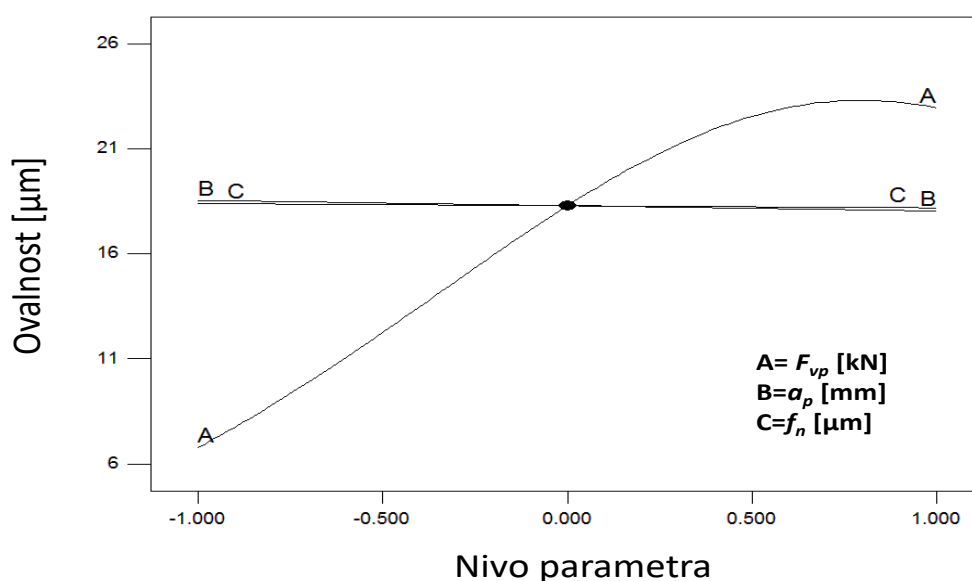
Regresijski model za ovalnost je viden iz naslednje enačbe.

$$\begin{aligned} \ln(\text{Ovalnost}) = & 0,96984 + 0,41758 * F_{vp} - 0,10949 * a_p - 1,72673 * f_n - \\ & 0,029946 * F_{vp} * a_p + 0,10043 * F_{vp} * f_n + 2,41462 * a_p * f_n - 0,018883 * 10^{-3} * F_{vp}^2 \end{aligned} \quad (6.2)$$

Preglednica 6.8: Prikaz p vrednosti za posamezne parametre.

	p -vrednost
model	< 0.0001
F_{vp}	< 0.0001
a_p	0.2179
f_n	0.6115
$F_{vp} * a_p$	0.0041
$F_{vp} * f_n$	0.0203
$a_p * f_n$	0.0008
F_{vp}^2	< 0.0001

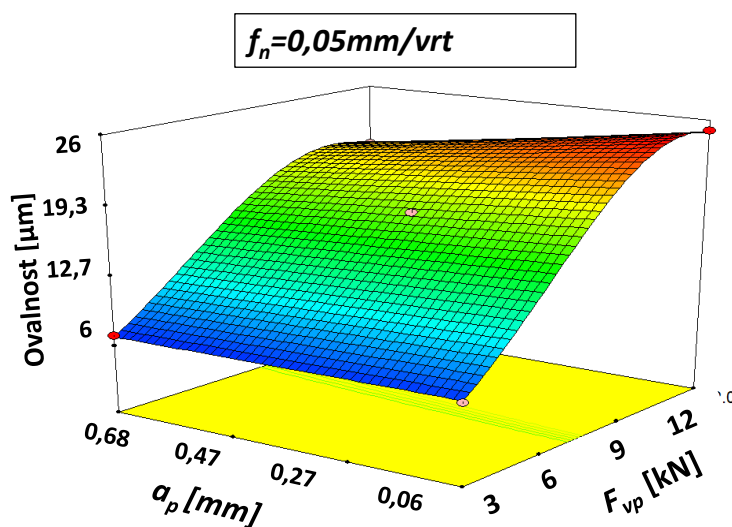
Iz zgornje preglednice vidimo, da p -vrednosti parametrov podajanja in globine reza presegajo želeno vrednost 0,05 in so še vedno uvrščene v model. Razlog je v temu, da ta dva parametra v medsebojni interakciji in interakciji z F_{vp} kažeta vplivnost na model, kar lahko vidimo iz preglednice 6.8. Če parameter ni kot samostojen vpliven v modelu, vpliven je pa v interakciji z drugim parametrom, ga ne moremo vzeti iz regresijskega modela, ker bi potem podrli njegovo hierarhičnost.



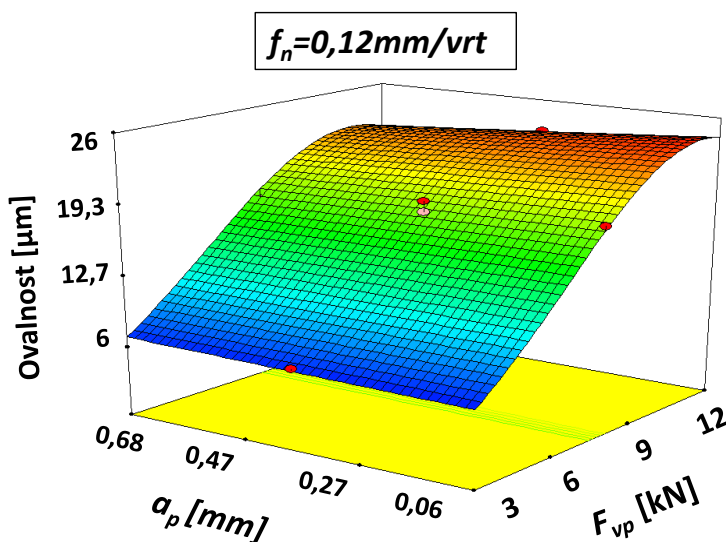
Slika 6.7: Vpliv vseh parametrov na ovalnost.

Slika 6.7 prikazuje, kako posamezen parameter vpliva na opazovano izhodno veličino. Iz grafa (slika 6.7) je vidno, da na ovalnost vpliva samo vpenjalna sila, podajanje in globina reza pa ne oz. minimalno. Lahko bi zaradi nevpliva na ovalnost, podajanje in globino reza vzeli iz regresijskega modela, vendar vrednost p pokaže, da njuna medsebojna interakcija vpliva, zato parametra ne odstranimo.

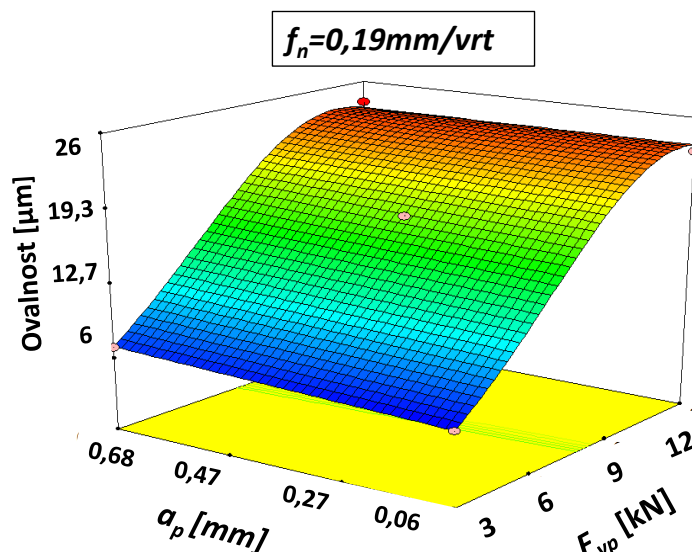
V nadaljevanju imamo tri grafe (slika 6.8, slika 6.9, slika 6.10), ki prikazujejo potek ovalnosti v odvisnosti od F_{vp} in a_p pri različnih vrednostih f_n .



Slika 6.8: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in globine reza a_p na ovalnost pri vrednosti $f_n=0,05$ mm/vrt.



Slika 6.9: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in globine reza a_p na ovalnost pri vrednosti $f_n=0,12$ mm/vrt.



Slika 6.10: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in globine reza a_p na ovalnost pri vrednosti $f_n = 0,19$ mm/vrt.

Iz zgornjih grafov je jasno razvidno, da je F_{vp} glavni parameter, ki vpliva na ovalnost, medtem ko a_p vpliva minimalno. Pri veliki F_{vp} in najmanjšemu f_n , je vpliv a_p največji. Tam se ovalnost zmanjša za 2-3 μm , vendar to nima pomena, ker je ovalnost že sama po sebi tako velika. Če bi se pri minimalni F_{vp} , ko je ovalnost 6 μm , na podlagi spreminjanja a_p ovalnost zmanjšala v velikosti 2-3 μm , bi pa to imelo pomen. Ker je F_{vp} najbolj vpliven parameter, moramo opazovati ostala dva parametra tam, kjer je F_{vp} optimalen. To je pri najnižji vrednosti, kjer vidimo, da ne glede na velikost f_n in a_p , ovalnost ostaja v rangi šestih μm .

Iz zgornjih grafov bi lahko sklepali, da bi za model odziva ovalnosti, lahko uporabili model, kjer bi nastopal samo F_{vp} . Če odvzamemo oba preostala parametra in vse člene, kjer parametra nastopata v interakciji, pa vseeno vidimo, da je model slabši. Zmanjša se S/N , kot tudi vsi R^2 parametri, zato je podan regresijski model tudi končni model za odziv ovalnosti.

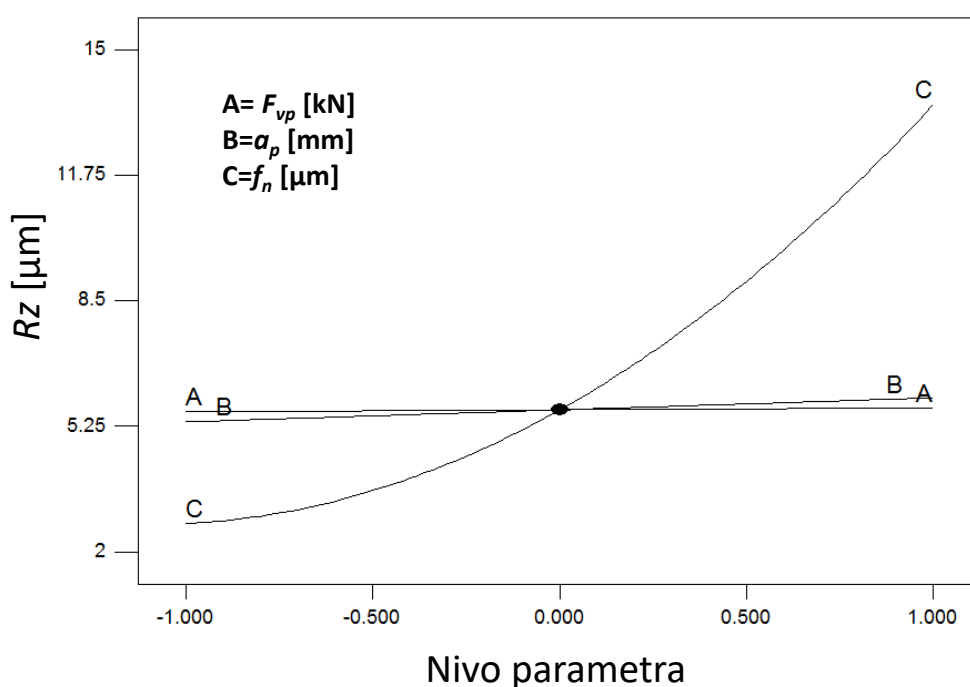
6.5.3. Regresijski model hrapavosti površine

Iz preglednice 6.7 je razvidno, da je regresijski model za hrapavost Rz ustrezen. Vse vrednosti posameznih koeficientov (F , R^2 , $Adj-R^2$, $Pred-R^2$ in S/N) kažejo na ustreznost modela.

$$Rz = 2.16363 + 0.14910 * F_{vp} + 1.00161 * a_p - 35.09476 * f_n - 1.15079 * F_{vp} * f_n + 504.85714 * f_n^2 \quad (6.2)$$

Preglednica 6.9: Prikaz p vrednosti za posamezne parametre.

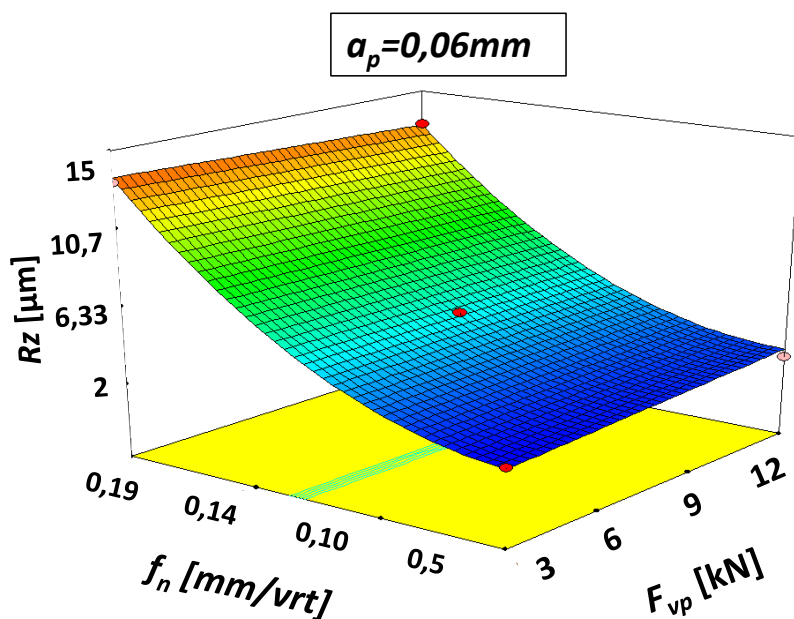
	p -vrednost
model	< 0.0001
F_{vp}	0.6026
a_p	0.0048
f_n	< 0.0001
$F_{vp} * f_n$	0.0036
f_n^2	< 0.0001



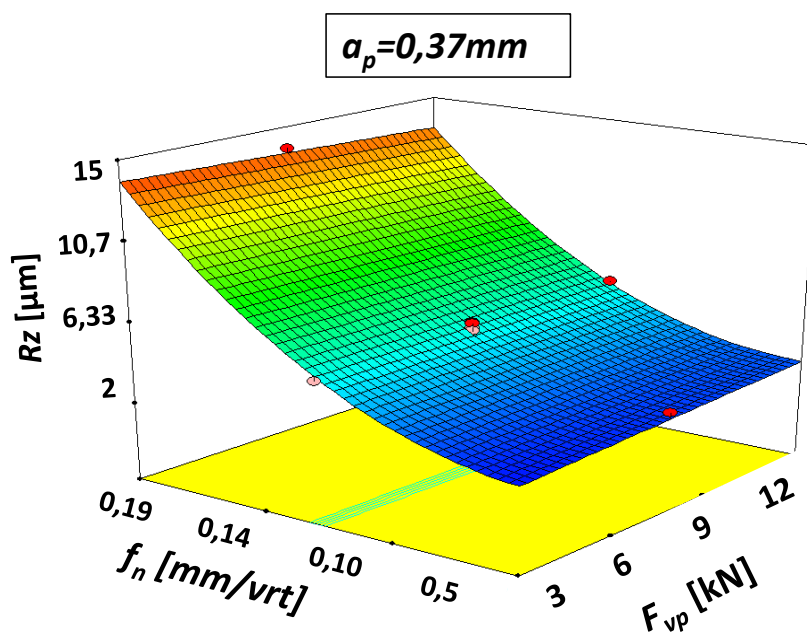
Slika 6.11: Vpliv vseh parametrov na hrapavost površine.

Na sliki 6.11 je prikaz poteka R_z v odvisnosti od različnih procesnih parametrov F_{vp} , f_n in a_p . Tako kot pri odzivu ovalnosti je tudi tu vidno, da ima glavni vpliv na opazovano odzivno veličino samo en parameter (f_n). Preostala dva parametra (F_{vp} , a_p) pa imata minimalen vpliv. Četudi imata minimalen vpliv, lahko iz preglednice 6.9 vidimo, da njuna medsebojna interakcija še vseeno vpliva na značilnost modela.

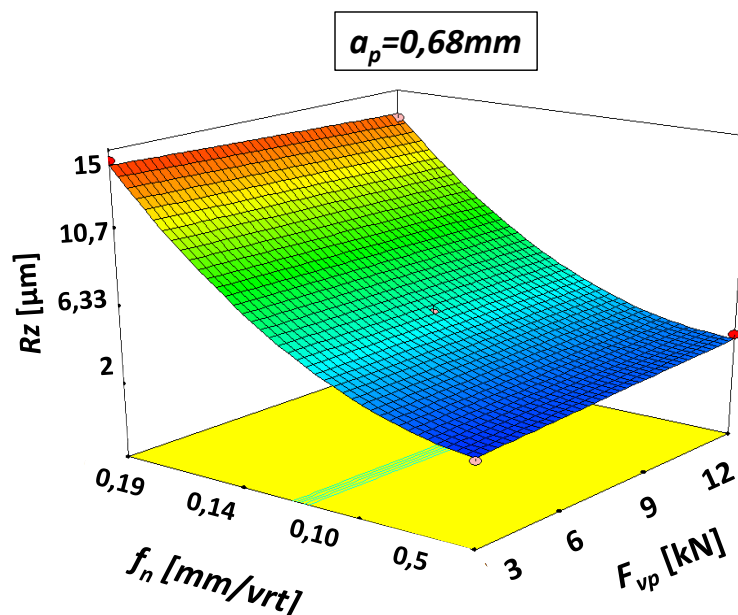
V nadaljevanju so 3 grafi (slika 6.12, slika 6.13, slika 6.14), ki prikazujejo potek Rz -ja v odvisnosti od F_{vp} in f_n pri različnih a_p .



Slika 6.12: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in podajanja f_n na Rz pri vrednosti $a_p = 0,06$ mm.



Slika 6.13: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in podajanja f_n na Rz pri vrednosti $a_p = 0,37$ mm.



Slika 6.14: Vpliv vpenjalne sile F_{vp} in podajanja f_n na Rz pri vrednosti $a_p = 0,68$ mm.

Iz teorije je znano, da imata na hrapavost največji vpliv podajanje in radij rezalne ploščice. Ker je bil radij rezalne ploščice enak pri vseh eksperimentih, smo pričakovali, da bo izmed treh vhodnih veličin parameter f_n najbolj vpliven na odziv hrapavosti, kar je tudi vidno iz zgornjih grafov.

6.6. Optimizacija parametrov

Ko smo zaključili z analizo regresijskih modelov in vplivnih procesnih parametrov, kjer smo s spreminjanjem njihovih vrednosti in njihovih kombinacij iskali čim boljši odziv opazovanih veličin, je sledila optimizacija parametrov.

Vrednosti procesnih parametrov smo optimizirali v območju nivojev od -1 do +1. Cilj optimizacije parametrov je bil, da minimaliziramo ovalnost.

Procesne parametre smo nastavili na naslednji način:

- F_{vp} : Minimalna dovoljena vrednost je bila nastavljena na 3 kN, manjša vpenjalna sila bi že predstavljala težavo pri vpetju. Maksimalna sila se bo samodejno omejila z nastavljanjem zelenega odziva ovalnosti.
- f_n : Nastavili smo območje med 0,1 in 0,19 mm/vrt. Manj kot 0,1 mm/vrt bi že lahko vplivalo na čas cikla. Zgornja vrednost ni pomembna, ker jo bomo omejili posredno z zelenim odzivom hrapavosti.
- a_p : Nastavili smo območje med 0,06 mm in 0,68 mm.
- Ovalnost: Želen odziv ovalnosti je minimalen.
- Hrapavost: Odziv Rz smo nastavili za območje med 0 in 5 μm .

Po vpisu kriterijev smo dobili naslednje parametre, ki smo jih preizkusili v potrditvenem testu.

Preglednica 6.10: Optimizirani procesni parametri in odzivni veličini.

F_{vp} [kN]	a_p [mm]	f_n [mm/vrt]	ovalnost [μm]	R_z [μm]
3	0,06	0,12	6,6	4,98

Na podlagi predlaganih procesnih parametrov smo opravili potrditveni preizkus.

6.7. Potrditveni preizkus

V preglednici 6.11 so prikazani rezultati potrditvenega preizkusa. Za potrditveni preizkus smo izvedli 10 testov.

Preglednica 6.11: Rezultati potrditvenega preizkusa.

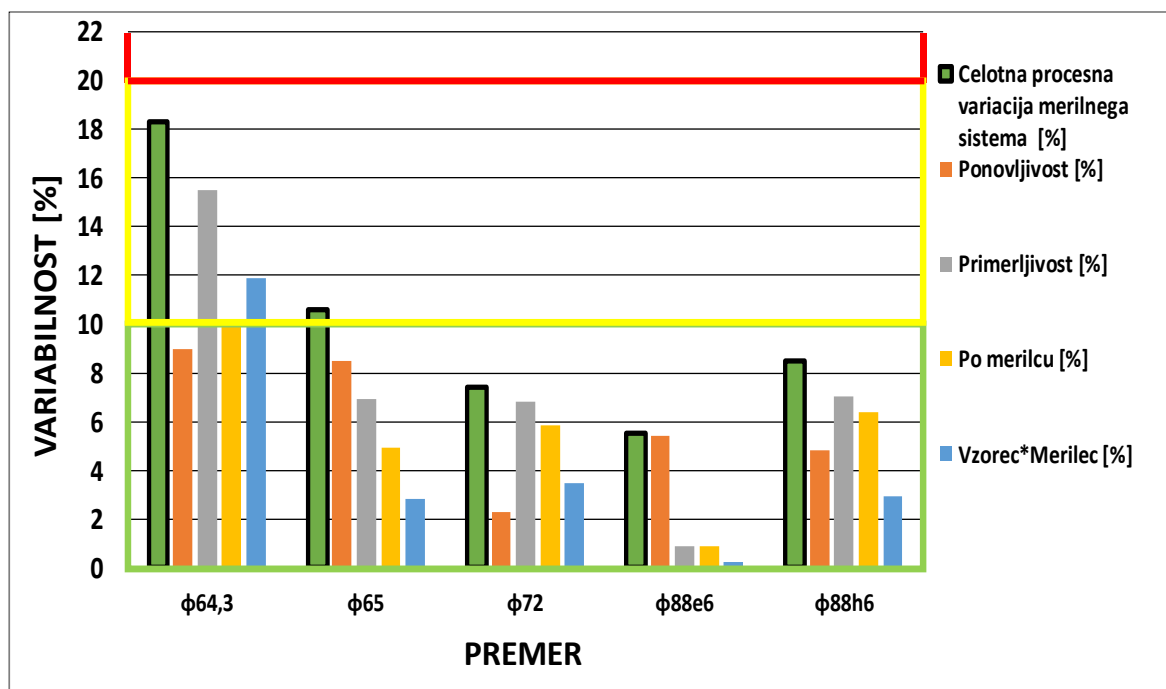
zap. kos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	povprečje
ovalnost [mm]	6	5	7	6	6	5	8	6	7	8	6,4
R_z [μm]	5,38	4,62	4,41	4,12	5,54	4,21	5,67	4,99	4,81	5,65	4,94

S potrditvenim testom smo dokazali, da je regresijski model ustrezen, saj je predlagana vrednost obeh odzivnih veličin znotraj intervala zaupanja, ki znaša:

- ovalnost [6 mm; 6,7 mm]
- R_z [4,754 μm ; 5,132 μm]

Cilj metode načrtovanja eksperimentov ni samo optimizacija procesnih parametrov. Glavni cilj je, da spoznamo, na kakšen način in v kakšni meri procesni parametri vplivajo na opazovano odzivno veličino. Pri naših eksperimentih smo spoznali, da na glavni problem (ovalnost kosa) najbolj vpliva vpenjalna sila, preostala dva parametra pa ne. Optimizacija parametrov bi bila ključna, če bi imeli možnost zmanjšanja vpenjalne sile. Možnosti zmanjšanja vpenjalne sile nimamo, preostala dva parametra na ovalnost vplivata minimalno, tako da je tudi optimizacija parametrov minimalna. Rezultati eksperimenta kažejo, da je potrebno zmanjšati vpenjalno silo. Vpenjalne sile pri obstoječem načinu vpetja ni mogoče zmanjšati, tako da je to minimalna ovalnost, ki jo lahko dosežemo. Način vpetja tudi predstavlja pomembno vlogo. Kos je vpet preko štirih vpenjalnih točk, kar smo preko eksperimentov spoznali, da ni idealno. Vpetje preko treh vpenjalnih točk bi bilo bolj simetrično in bi s tem tudi enakomernejše porazdelili vpenjalne sile po obodu. Enakomerna porazdelitev sil pa bi zagotovo vplivala na velikost ovalnosti.

7. Rezultati in diskusija



Slika 7.1: Analiza merilnega sistema.

Slika 7.1 prikazuje analizo, ki smo jo opravili na merilnem sistemu, na katerem poteka merilni proces izdelka. Študija *P&P* je bila opravljena z namenom preverjanja ustreznosti merilnega sistema.

Na grafu so z linijami označene meje, ki jih določuje kriterij za ocenjevanje ustreznosti merilnega sistema. Merilni sistem lahko razdelimo na 5 podsistemov, ker se posamezni premeri merijo na različne načine. Po pričakovanjih kažeta premera 64,3 mm in 65 mm najslabše rezultate. Vzrok je v načinu merjenja in ovalnosti obdelanca. Premera se merita z merilnim tipalom, ki ga operater ročno vstavi v obdelanca. Ovalnost na obdelancu je vzrok, da že minimalna rotacija tipala v obdelancu povzroči mikronska razliko v opazovani dimenziji. Meritve na obdelancih so izvajali trije merilci, kjer dva merilca nista imela izkušenj z merilnim procesom tega izdelka. Način merjenja, ovalnost obdelanca in

neizkušeni operaterji, so vzroki za procesno variacijo, ki znaša nad 10 %, kar je mejno sprejemljivo. Ponovljivost in primerljivost sta zaradi naštetih razlogov od vseh premerov najslabša. Če bi imeli izkušene merilce, bi odpravili težavo, ki nastopi ob načina merjenja in bi posledično tudi variacija celotnega merilnega procesa bila manjša od 10 %.

Premeri 72 mm, 88e6 mm, 88h6 mm po pričakovanjih kažejo boljše rezultate kot preostala dva premera. Premeri, katerih variacija merilnega procesa znaša manj od 10 %, imajo drugačen način merjenja. Merjenec ima omogočeno rotacijo okrog svoje osi v vložišču, vendar ne za celoten krog. To pomeni, da obstaja lega, kjer je merjenec fiksiran s strani oblike vložišča in merilčeve roke. Ta lega je lahko dosežena ne glede na izkušnost merilca. Ko je merjenec fiksiran, se sprožijo tipala, ki avtomatsko pomerijo dimenzijo. Prav zaradi opisanega načina merjenja je odstranjen vzrok neizkušenosti merilca in težavnosti načina merjenja, kar rezultira v procesni variaciji, ki znaša manj od 10 %.

Študija *P&P* je pokazala, da je merilni sistem v proizvodnem procesu ustrezen. Rezultati študije iz slike 7.1, kjer so prikazane vrednosti statističnih značilnosti, kažejo na njegovo sposobnost, četudi je celotna variacija merilnega sistema v procesu pri dveh premerih večja od 10 %. V rednem proizvodnem procesu je vedno prisoten izkušen operater/merilec, kar pomeni, da ustreznost in sposobnost merilnega sistema ni vprašljiva.

Nestabilnost obdelovalnega procesa je bila razlog za preverjanje obstoječega stanja. Ugotovili smo, da je merilni proces ustrezen, zato je bilo potrebno analizirati obstoječe stanje obdelovalnega procesa..

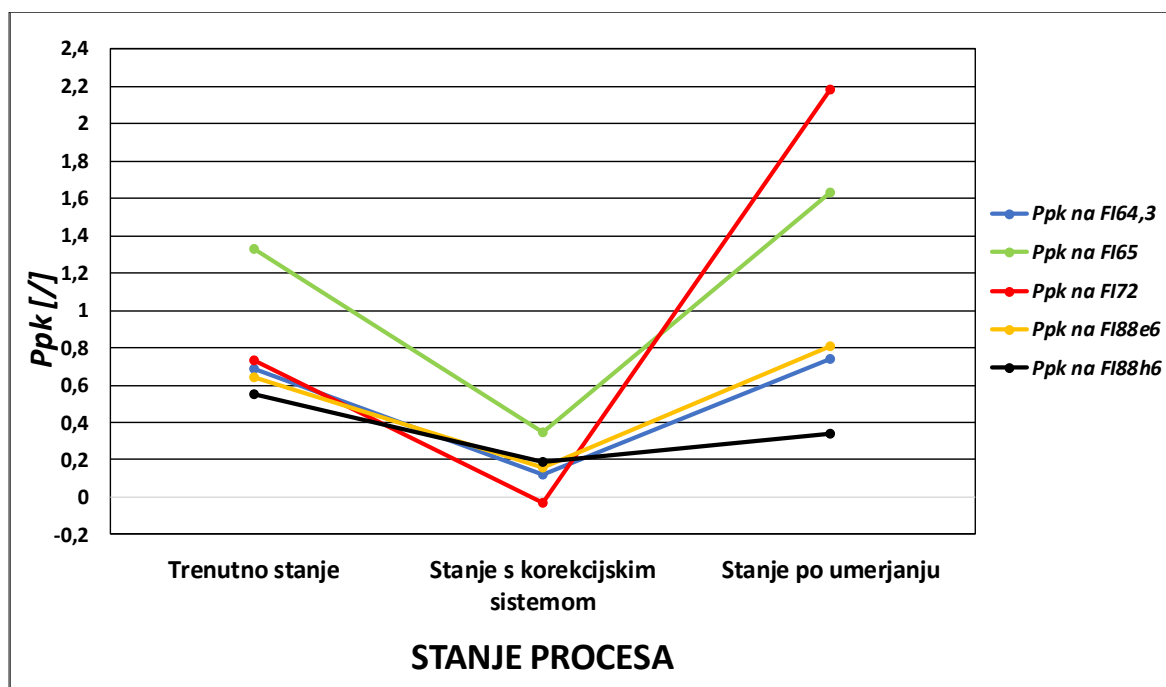
V poglavju Pregled obstoječega stanja proizvodnjega procesa - preglednica 4.2 so prikazani rezultati preverjanja obstoječega stanja obdelovalnega procesa. Vidimo lahko, da je indeks sposobnosti procesa P_{pk} za vse premere nezadovoljiv. Najboljši P_{pk} , je na premeru 65 mm, ker je tolerančno območje široko 0,04 mm. Širina tolerančnega območja pri ostalih premerih je 0,02 mm, kar rezultira v slabšem P_{pk} . P_{pk} na teh premerih prikazuje realno stanje obdelovalnega procesa, ki ni ustrezno. Koeficienti sposobnosti pod $P_{pk}=1$, predstavljajo 2700 ppm napak. V preglednici je vidno, da se vrednost koeficienta giblje med 0,55 in 0,73 in predstavlja več kot 70000 ppm napak, kar ni sprejemljivo. Iz standardnega odklona, ki je mera variabilnosti in kaže razpršenost okrog srednje vrednosti, vidimo, da so meritve okrog srednje vrednosti razpršene. Razpršenost meritev okrog srednje vrednosti kaže na nestabilnost obdelovalnega procesa.

Morebitno izboljšanje stabilnosti in sposobnosti procesa smo iskali v integraciji sistema za avtomatsko korigiranje koordinatnega izhodišča rezalnih orodij v CNC stružnico. Po vgradnji sistema smo zopet izvedli SPC analizo, katere rezultati so vidni v poglavju Izboljšanje obstoječega stanja - preglednica 5.2. Iz preglednice 5.2 vidimo, da vgradnja korekcijskega sistema ni prinesla zelenih rezultatov. Vrednosti statističnih veličin so slabše kot pri preverjanju obstoječega stanja. Standardni odklon je reda velikosti dveh stotink milimetra in vrednost P_{pk} kaže na popolno nesposobnost procesa, ko je bil korekcijski sistem vklopljen. Pomembno je vedeti, da smo opravili več testov z vklopljenim korekcijskim sistemom, po katerih smo sklepali, da bo sistem izboljšal stanje. Težava je, ker korekcijski sistem podaljša cikel, kar pa ne pride v poštev v masovni proizvodni. Bistvo vgradnje in glavnega testa je bilo, da sistem ob vklopu (maksimalno za 20 ciklov) ohrani dimenzije obdelancev znotraj tolerančnega območja, dokler se stružnica ne ogreje nazaj na delovno temperaturo. Cilj izdelave izdelkov, ki bi zadoščevali kakovostnim kriterijem, z vgradnjo ni bil dosežen, stabilnosti in sposobnosti procesa nismo izboljšali, zato smo se odločili, da preverimo točnost stroja.

Pri preverjanju točnosti stroja smo ugotovili, da je v osi X , v območju, kjer poteka obdelava surovca, pozicijska točnost od 20 do 30 μm . Zaradi slabe pozicijske točnosti, smo stroj umerili. Po umerjanju se je pozicijska točnost izboljšala na 4,5 μm . Sklepali smo, da se je na podlagi umerjanja stroja stabilnost in sposobnost obdelovalnega procesa izboljšala. Ko smo stroj umerili, smo izvedli SPC analizo, katere rezultati so vidni v poglavju Izboljšanje obstoječega stanja – preglednica 5.4

Iz preglednice 5.4 je razvidno, da se je po umerjanju stabilnost in sposobnost obdelovalnega procesa izboljšala. Izboljšanje stabilnosti je razvidno iz vrednosti standardnega odklona, kjer vidimo, da je bila razpršenost okrog srednje vrednosti manjša. Tudi koeficient sposobnosti procesa P_{pk} je večji od tistega pri preverjanju obstoječega stanja. Pri premeru 88h6 mm je P_{pk} nizek, ker je najverjetneje prišlo do napak pri dveh meritvah obdelancev. Dve meritvi sta povsem izven kontrolnih meja, kar botruje k nizkemu koeficientu sposobnosti. Če bi meritvi bili pravilni, bi bila vrednost P_{pk} za premer 88h6 mm podobna vrednosti pri premeru 88e6 mm. Premera se obdelujeta zaporedno z istim orodjem, zato lahko sklepamo, da bi bili vrednosti podobni P_{pk} (kot je razvidno tudi iz ostalih SPC analiz).

Slika 7.2 prikazuje potek vrednosti koeficientov sposobnosti procesa P_{pk} skozi različna stanja procesa.



Slika 7.2: Prikaz vrednosti P_{pk} v različnih stanjih obdelovalnega procesa.

Iz grafa vidimo, da se je končno stanje v primerjavi z začetnim stanjem izboljšalo. Povprečje koeficientov sposobnosti procesa je v primerjavi s povprečjem začetnega stanja večje za 19 %. Četudi je v taki meri izboljšanje, obdelovalni proces še ni zadostno stabilen in sposoben. Vzrokov za tako stanje procesa po več posegih je lahko več: starost CNC stružnice, obraba notranjih elementov (sklopa navojnega vretena in matice).

S posegi v CNC stružnico smo dosegli, da se je sposobnost procesa izboljšala. Nismo pa dali pozornosti na procesne parametre, ki lahko na različne načine vplivajo na obdelovalni

proces. Skozi celoten proces izboljšanja sposobnosti in stabilnosti procesa nas je spremljal problem ovalnosti kosa.

Najprej smo morali ugotoviti, kako procesni parametri vplivajo na ovalnost. Za ugotovitev vpliva smo uporabili metodo načrtovanja eksperimentov. Cilj metode načrtovanja eksperimentov ni samo optimizacija procesnih parametrov. Glavni cilj je, da spoznamo, na kakšen način in v kakšni meri procesni parametri vplivajo na opazovano odzivno veličino. Pred izvedbo eksperimentov smo vedeli, da vpenjalna sila vpliva na ovalnost, nismo pa vedeli, kako še prestali parametri vplivajo. Rezalno hitrost in radij rezalne ploščice smo iz eksperimentov izključili že pred začetkom. Preostale tri parametre pa smo spreminjali skozi eksperimente in opazovali, kako vplivajo na odzivni veličini. Glavna opazovana odzivna veličina je bila ovalnost, odzivna veličina hrapavosti pa se je opazovalo zato, ker je iz teorije znano, da na ta parameter vpliva tudi podajanje, ki smo ga v eksperimentih spreminjali.

Ko smo določili procesne parametre, ki smo jih potem spreminjali, in opazovane odzivne veličine, smo izbrali načrt eksperimenta. Izbrali smo načrt s središčno zasnovno, ki omogoča spreminjanje procesnih parametrov na treh nivojih. Po izdelavi plana eksperimenta, smo eksperimente izvedli.

Na podlagi rezultatov eksperimentov smo dobili graf (poglavje Optimizacija procesnih parametrov - slika 6.7), ki je v celoti povzel velikost vplivov posameznih procesnih parametrov na ovalnost.

Na sliki 6.7 je jasno razvidno, kako posamezni parametri (ne)vplivajo na ovalnost kosa. Cilj načrtovanja eksperimentov je bil dosežen s to ugotovitvijo, da parametra podajanja in globine reza ne igrata ključne vloge. V regresijski model sta vključena zato, ker njuna medsebojna interakcija in interakcija z vpenjalno silo vpliva na model. Minimalna ovalnost, ki smo jo dosegli, je okrog 6 μm . S spreminjanjem podajanja in globine reza se bi ovalnost spremenila za maksimalno 3 μm , pa še to v območju, kjer bi imeli veliko vpenjalno silo. Območje z veliko vpenjalno silo ne pride v poštev, ker je ovalnost prevelika. V območju z minimalno vpenjalno silo pa se ne glede na spreminjanje podajanja in globine reza ovalnost ne spremeni.

Poleg ovalnosti smo opazovali tudi odziv hrapavosti. Iz slike 6.11 (poglavje Optimizacija procesnih parametrov) je razvidno, da izmed treh procesnih parametrov samo podajanje vpliva na potek hrapavosti, preostala dva parametra pa ne. Ker podajanje praktično nima vpliva na ovalnost, ga lahko pri prihodnjih eksperimentih za zmanjšanje ovalnosti nastavimo na idealno vrednost (glede na hrapavost in čas obdelovalnega cikla) in izključimo iz eksperimenta.

Minimalna dovoljena vpenjalna sila je 3 kN. Ob tej sili je obdelovanec še zadostno vpet v vpenjalno glavo. Ko smo optimizirali procesne parametre, smo dobili vrednosti ovalnosti okrog 6 μm . Če bi zmanjševali vpenjalno silo, bi dobili tudi manjšo ovalnost, kar je naš cilj, vendar to ni mogoče. Vpenjalna sila je na minimalni vrednosti, to pomeni, da moramo iskati rešitve za ovalnost še drugje. Izkaže se, da bi lahko način vpetja surovca bil eden izmed glavnih razlogov za ovalnost. Surovec je vpet v štirih točkah, ki so nesimetrično glede na kos razporejene po obodu surovca. Nesimetrično vpetje vodi v neenakomerno porazdelitev vpenjalne sile, kar rezultira v neenakomerni deformaciji surovca ob vpetju. Tri-točkovno simetrično vpetje bi surovca deformiralo enakomerneje, kar bi povzročilo zmanjšanje ovalnosti kosa. Najdba vzroka in odprava oz. zmanjšanje ovalnosti pa je tudi bil eden izmed glavnih ciljev uporabe metode načrtovanja eksperimentov.

8. Zaključki

Nestabilnost in nesposobnost procesa sta bila glavna razloga za pregled in analizo proizvodnega procesa izdelka. Proizvodni proces smo razdelili na obdelovalnega in merilnega. Preden smo preverili stanje obdelovalnega procesa, je bilo potrebno preveriti stanje merilnega sistema oz. celotnega merilnega procesa.

Analiza merilnega sistema je bila opravljena na merilni postaji, na kateri poteka 100 % dimenzijska kontrola. Študija *P&P* je bila opravljena na petih merilih, ki merijo pet premerov. S študijo *P&P* smo dokazali da :

- je merilni proces sposoben in ustrezen,
- problem ovalnosti ovira nemoten merilni proces.

Po analizi merilnega sistema in ugotovitvi o njegovi ustreznosti je bilo potrebno analizirati obdelovalni proces. Najprej smo opravili statistično kontrolo procesa (angl. *SPC*) obstoječega stanja. *SPC* analiza je pokazala da:

- je obdelovalni proces nestabilen in nesposoben,
- na izračune koeficientov sposobnosti procesa P_{pk} vpliva tudi ovalnost izdelka.

Potem, ko je bila opravljena analiza *SPC*, je bil v stroj vgrajen sistem za samodejno korigiranje koordinatnih izhodišč orodij. Namen vgradnje je bila stabilizacija obdelovalnega procesa. Po vgradnji sistema smo opravili *SPC* analizo stanja procesa, iz katere je bilo ugotovljeno, da:

- korekcijski sistem ni stabiliziral procesa,
- je možna slaba točnost in natančnost stroja.

Po vgradnji korekcijskega sistema in opravljeni *SPC* analizi smo se odločili, da preverimo točnost stroja. S preverjanjem smo ugotovili, da je pozicijska napaka stroja bila 29 μm . Po umerjanju stroja se je napaka v območju, kjer poteka obdelava, zmanjšala na 4,5 μm . Predvidevali smo, da sta se na podlagi tega izboljšali stabilnost in sposobnost obdelovalnega procesa. Morebitno izboljšanje smo znova preverili z analizo *SPC*, ki je pokazala, da:

- se je z umerjanjem stabilnost stroja popravila,
- se je sposobnost procesa v primerjavi z začetnim stanjem izboljšala,
- ovalni izdelki vplivajo na sposobnost procesa.

Po treh *SPC* analizah smo prišli do sklepa, da smo izboljšali stanje obdelovalnega procesa, vendar nismo v celoti dosegli želenega cilja. Iz analiz smo prišli do sklepa in ugotovitev

glede nedoseganja cilja v celoti. Stabilizacija obdelovalnega procesa ni bila dosežena v celoti zaradi slednjih razlogov:

- starosti CNC stružnice
- obrabe notranjih elementov
- ovalnost izdelka

Za doseg končne želene stabilnosti in sposobnosti procesa bi v stroj morali vgraditi merilno letev, ki bi izključila vzroke starosti in obrabe stroja, s čimer bi dosegli boljšo natančnost stroja in stabilnost, ki si jo želimo.

Ovalnost izdelka je problem, ki je bil prisoten skozi vse analize procesa. Ovalnost v rangi 8 μm pomeni, da že zaradi deformacije kosa v taki vrednosti težko držimo dimenzije znotraj tolerančnega območja, saj 8 μm zavzema skoraj polovico območja. Da bi ugotovili glavne razloge za ovalnost, smo uporabili metodo načrtovanja eksperimentov. Spreminjali smo različne procesne parametre, da bi ugotovili velikosti vpliva na ovalnost in kasnejše optimizacije parametrov za zmanjšanje ovalnosti. Na podlagi spreminjanja parametrov smo prišli do naslednjih zaključkov:

- največji vpliv na ovalnost izdelka ima vpenjalna sila,
- podajanje in globina reza imata na ovalnost minimalen oz. nikakršen vpliv.

Cilj načrtovanja eksperimenta je bil tudi ta, da smo spoznali, da pri minimalni vpenjalni sili ne obstaja noben procesni parameter, ki bi lahko še dodatno zmanjšal ovalnost. Po ugotovitvah posameznih vplivov smo optimizirali procesne parametre. Po optimizaciji smo videli, da je vpenjalna sila tista, ki bi bilo potrebno še zmanjšati. Zmanjšanje vpenjalne sile pa ni več mogoče, ker bi bilo vpetje surovca prešibko in bi rezalne sile povzročile, da bi padel iz vpenjalne glave. Ugotovili pa smo, da bi način vpetja lahko bil eden izmed razlogov za ovalnost izdelka. Vpetje je 4-točkovno in nesimetrično po obodu kosa. To vodi v nesimetrično deformiranje, ki rezultira v ovalnosti. Če bi vpetje spremenili v 3-točkovno, bi deformacija bila bolj enakomerna s čimer bi tudi zmanjšali ovalnost.

Na podlagi vseh informacij pridobljenih iz analiz procesa in opravljenih eksperimentov, sta predlagana ukrepa nakup merilne letve, ki bi stabilizirala obdelovalni proces in sprememba vpetja surovca, ki bi zmanjšala ovalnost.

9. Literatura

- [1] Kuzman K.: Moderno proizvodno inženirstvo – priročnik, Grafis Trade, Grosuplje, Slovenija, 2010.
- [2] http://lab.fs.uni-lj.si/labod/assets/skripta-predavanj_pi_it1.pdf, dostopno 19.8.2017.
- [3] C. A. Rocha, et al. : *Evaluation of the wear mechanisms and surface parameters when machining internal combustion engine valve seats using PCBN tools*. Journal of Materials Processing Technology 145, 2004, str. 397-406.
- [4] G. G. Lakić, D. Kramar, J. Kopač: *Metal Cutting: Theory and Applications*. University of Banja Luka: Faculty of Mechanical Engineering, University of Ljubljana: Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka, Ljubljana, 2014.
- [5] J. Kopač: *Odrezavanje: Teoretične osnove in tehnološki napotki*. [samozal.] J. Kopač, Ljubljana, 2008.
- [6] P. D. Vos, J. Stahl: *Quality of the machined surfaces Best Practices*. Seco Tools AB, Fagersta, Sweden, 2014.
- [7] <https://http://egradivo.ecnm.si/ODR/struenje.html>, ogled 20.8.2017.
- [8] J. Kopač, M. Soković: Tehnika odrezavanja: Sodobna rezalna orodja. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1993.
- [9] LTH Castings. d.o.o, *Analiza merilnega sistema*, LTH Castings d.o.o., Vincarje 2017.
- [10] N.N. (2010) *Statistical process control . SPC - reference manual*, Ford/General Motors/Chrysler.
- [11] Božič S.: *Kakovost in zanesljivost proizvodnje*, Ljubljana, 2009, dostopno na: http://www.impletum.zavod-irc.si/docs/Skriti_dokumenti/Kakovost_in_zanesljivost_proizvodnje-Bozic.pdf, ogled 20.8.2017.
- [12] Ishikawa, Swift, 1995 str.33, Beauregard et al. 1992, st.6,7, ISO9004 – 4 Guidelines for quality improvement.
- [13] R. D. Reid, N. R. Sanders: *Operations Management: An Integrated Approach: Chapter 6 - Statistical Quality Control*. Wiley; 3 edition, 2007.

- [14] Montgomery D. C.: *Introduction to statistical quality control*, Seventh ed. Arizona State University 2001, John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- [15] Šoštar A.: Management kakovosti, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2000.
- [16] <https://www.intrafocus.com/2014/07/xmr-chart/>, dostopno 16.08.2017.
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Shewhart_individuals_control_chart, dostopno 17.08.2017.
- [18] <http://lab.fs.uni-lj.si/lazak/pedakosko-delo.html>, predavanje SPC, dostopno 18.08.2017.
- [19] Soković, M., D. Pavletić, R. Matković (2005) *Measuring-System Analysis for Quality Assurance in a Six-Sigma Process*, Journal of Mechanical Engineering 51(2005)9, 589-599.
- [20] <http://lab.fs.uni-lj.si/lazak/pedakosko-delo.html>, predavanje MSA, dostopno 18.08.2017.
- [21] N.N. (1995) *Measuring systems analysis . MSA - reference manual*, Ford/General Motors/Chrysler.
- [22] LTH Castings. d.o.o, *Statistični nadzor procesa*, LTH Castings d.o.o., Vincarje 2017.
- [23] <http://www.npd-solutions.com/proccap.html>, dostopno 19.8.2017.
- [24] Marpos S.p.A.: *World.wide Radio-transmission System USER MANUAL*, Italy, 2012.
- [25] H. Schwenke, W. Knapp, H. Haitjema, A. Weckenmann, R. Schmitt, F. Delbressine, *Geometric error measurement and compensation of machines- an update*. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 57(2)(2008), str. 660-675.
- [26] L. Čerče, D. Muženič, V. Rotar, D. Kramar, F. Pušavec: *Preverjanje natančnosti in in umerjanje CNC obdelovalnih strojev*, Industrijski forum IRT 2017.
- [27] Çalşkan, H., Kurbanoğlu, C., Panjan, P., Kramr, D.: *Investigation of the performance of carbide cutting tools with hard coatings in hard milling based on the response surface methodology*. The international journal of advanced manufacturing technology, 2013, vol.66, no. 5-8, 883-893.
- [28] Courbon, C., Kramar, D., Krajnik, P., Pusavec, F., Rech, J., Kopac, J.: *Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: An experimental study*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, No. 49, 1114-1125.
- [29] Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments*, Wiley, New York, 2005.
- [30] P. Eniko, M. Soković. D. Kramar: *Influence of non-productive operations on product quality. Influence of non-productive operations on product quality*. Strojniški vestnik, ISSN 0039-2480, Mar. 2016, vol. 62.
- [31] Jiju A.: *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, Butterworth-Heinemann, UK, 2003.
- [32] <https://www.beckerdiamant.de/en/technology/diamant/recommended-cutting-data.html>, dostopno 22.08.2017.
- [33] Taguchi G., Chowdhury S., Wu Y.: *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2005.

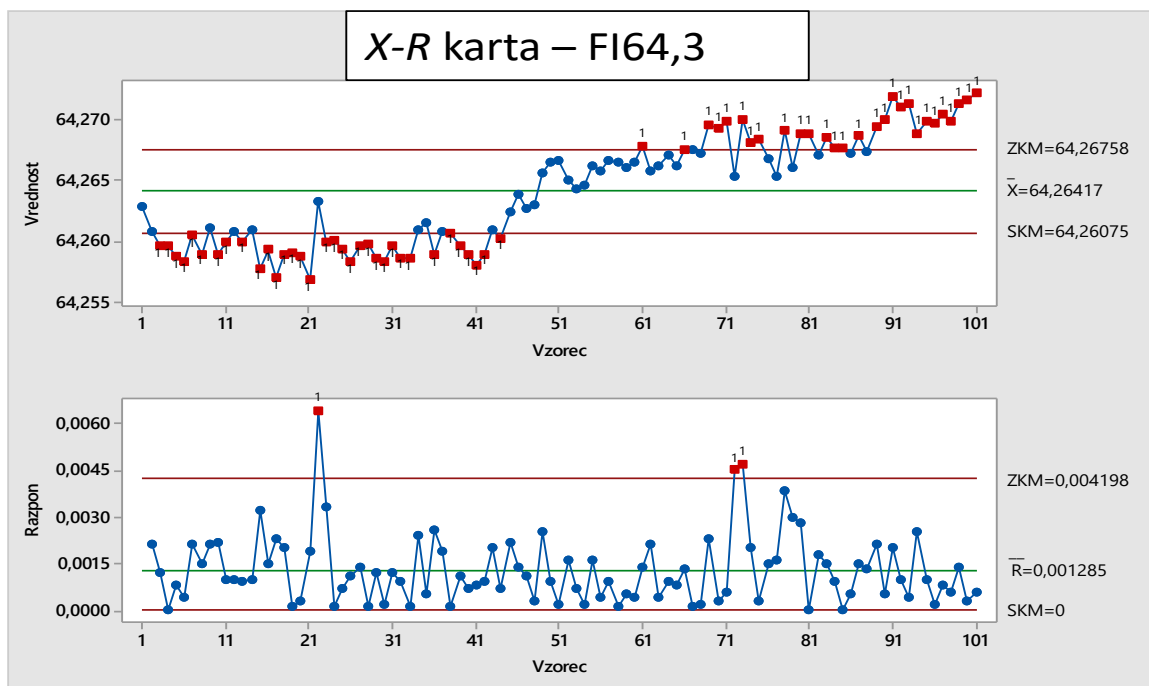
10. Priloge

Priloga A: Statistični nadzor procesa obstoječega stanja

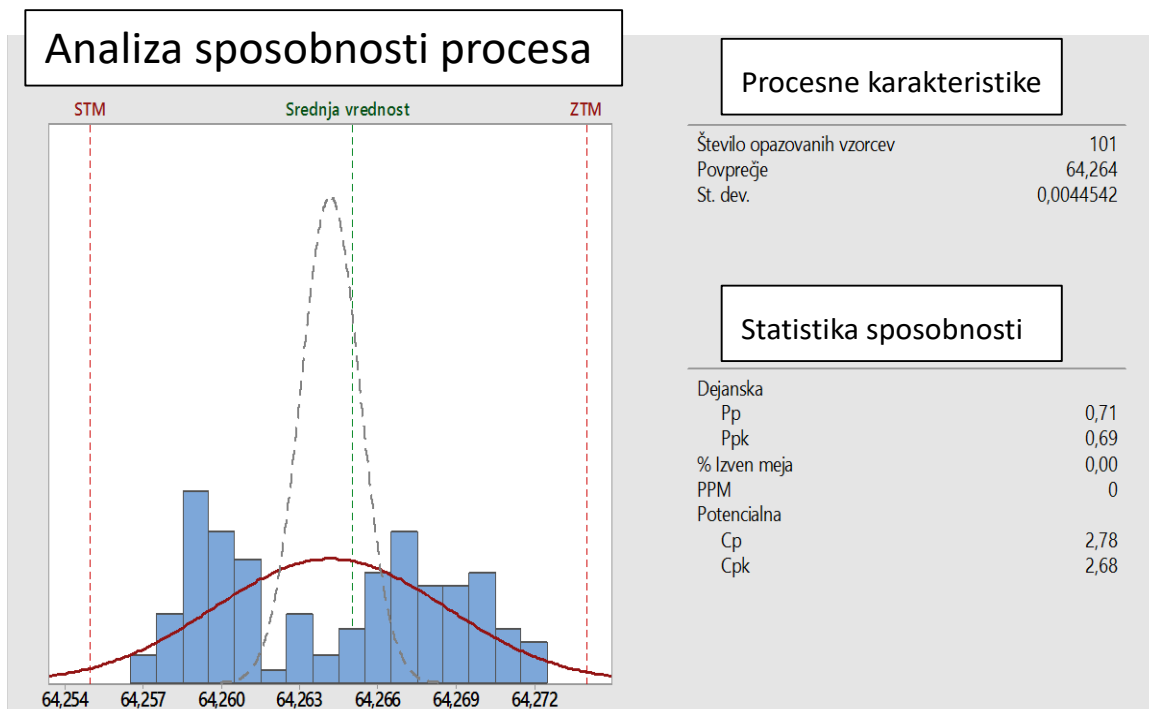
Priloga B: Statistični nadzor procesa po vgradnji korekcijskega sistema

Priloga C: Statistični nadzor procesa po umerjanju CNC stružnice

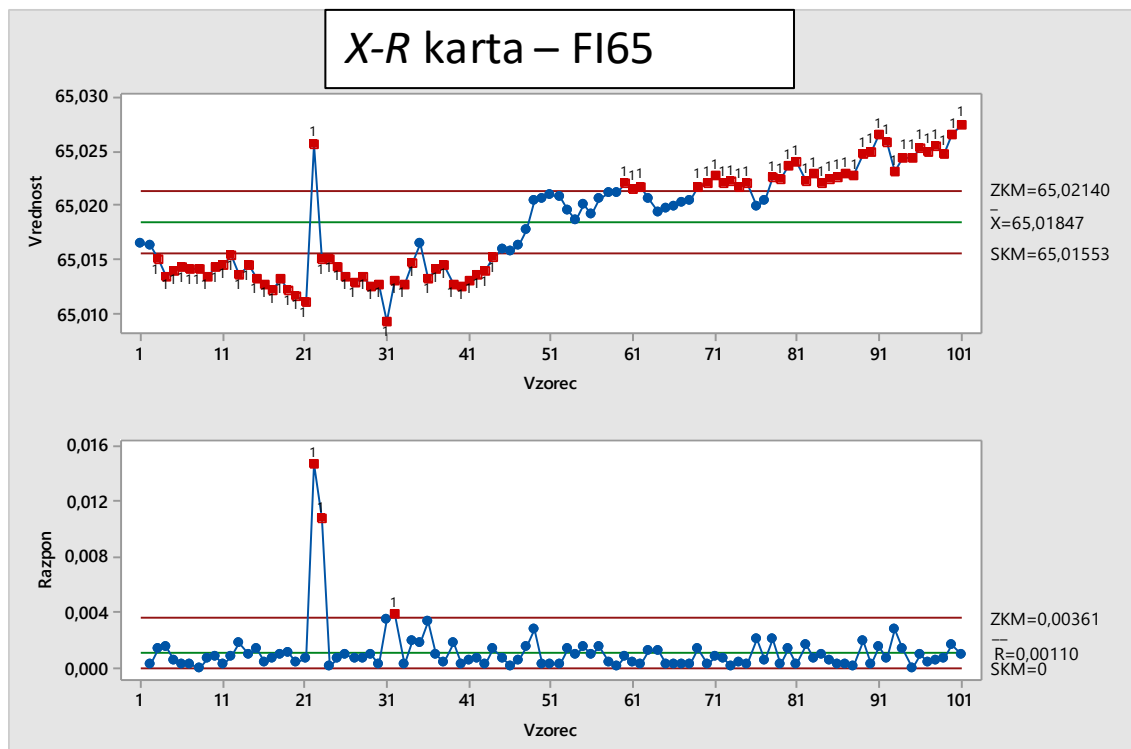
Priloga A: Statistični nadzor procesa obstoječega stanja



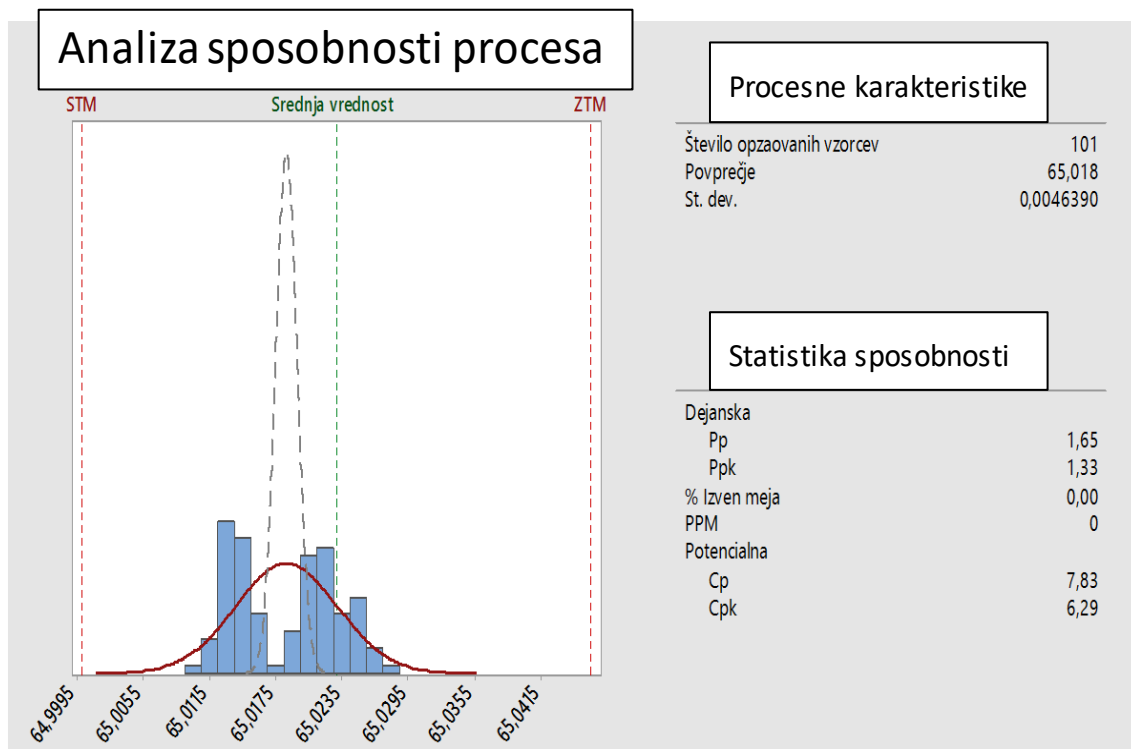
Slika A.1: X-R karta meritev na premeru 64,3 mm.



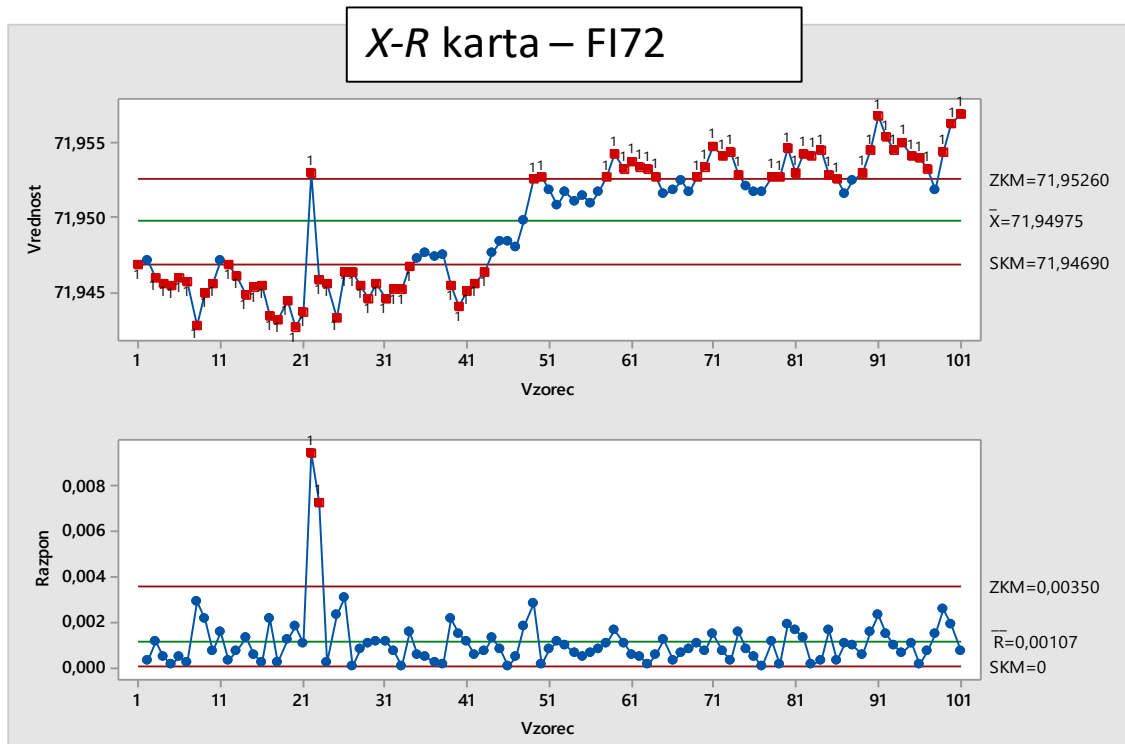
Slika A.2: Analiza sposobnosti za premer 64,3 mm.



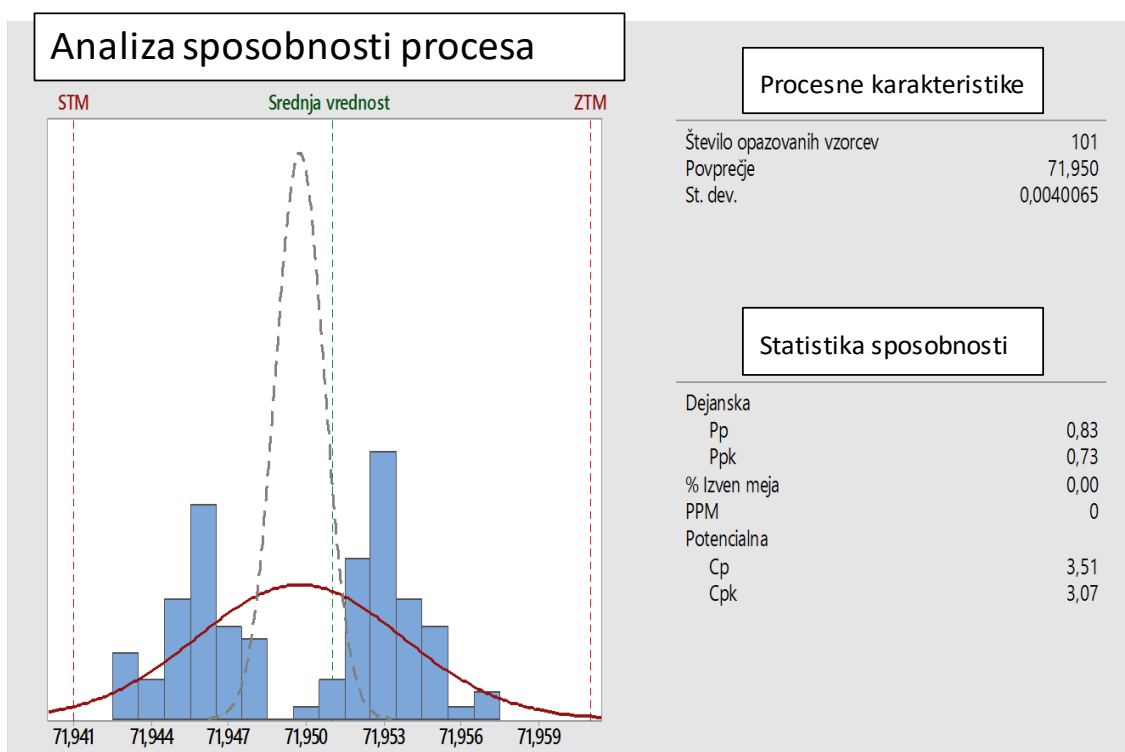
Slika A.3: X-R karta meritev na premeru 65 mm.



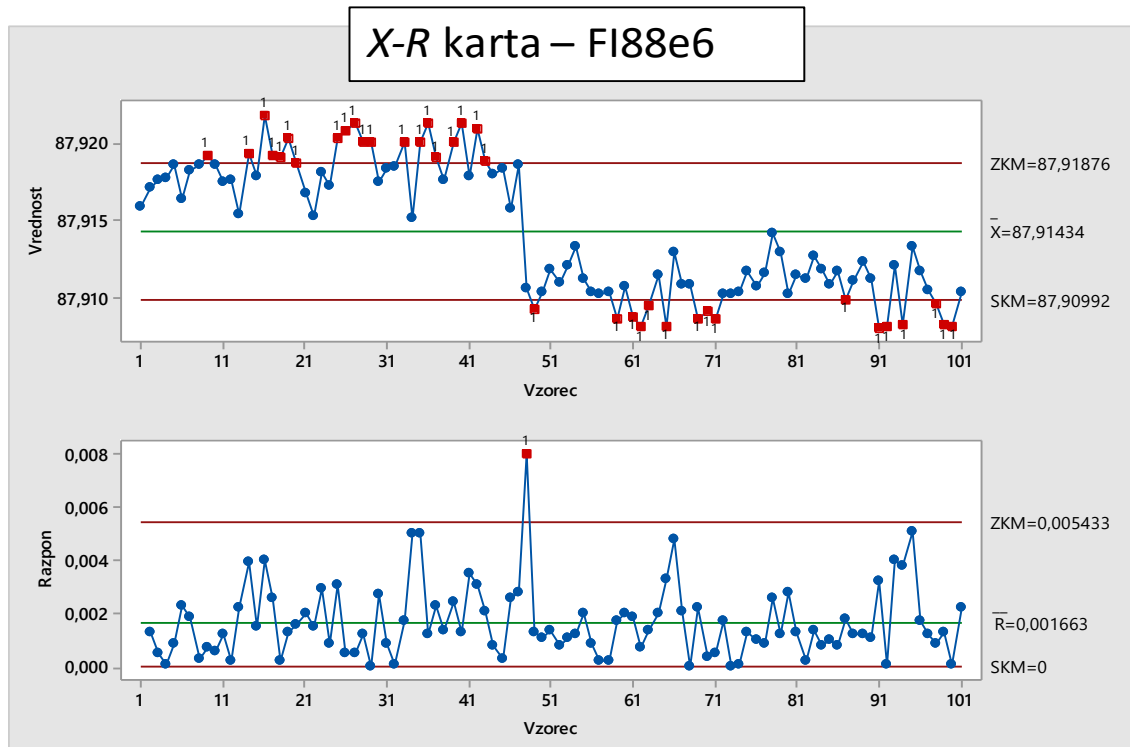
Slika A.4: Analiza sposobnosti za premer 65 mm.



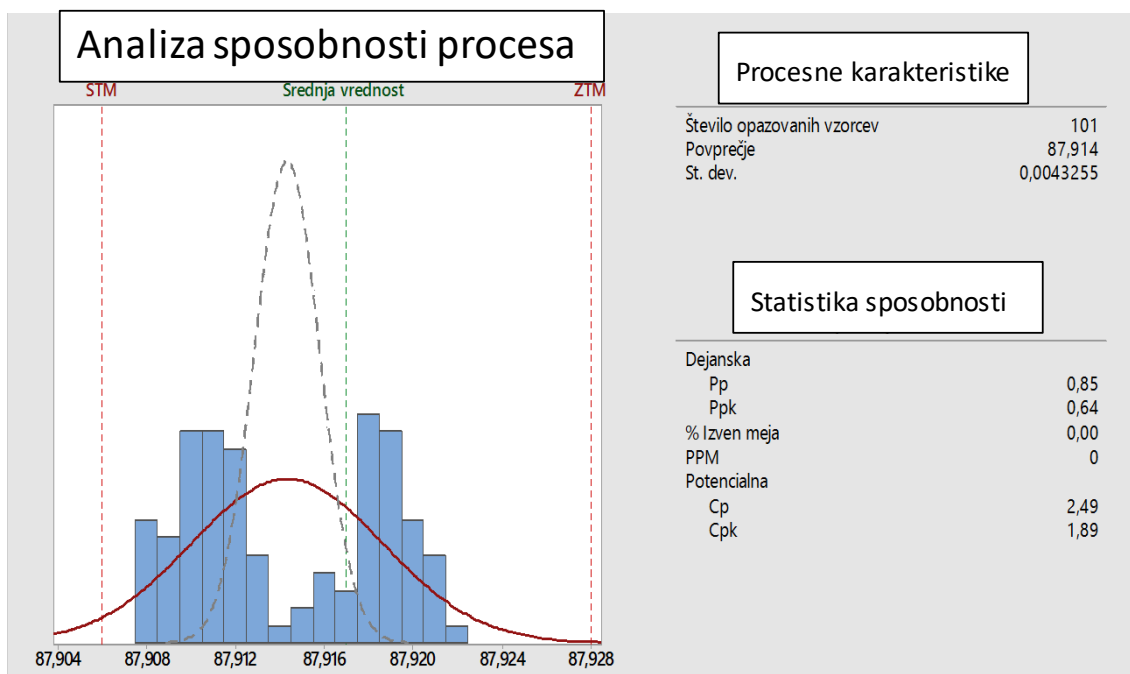
Slika A.5: X-R karta meritev na premeru 72 mm.



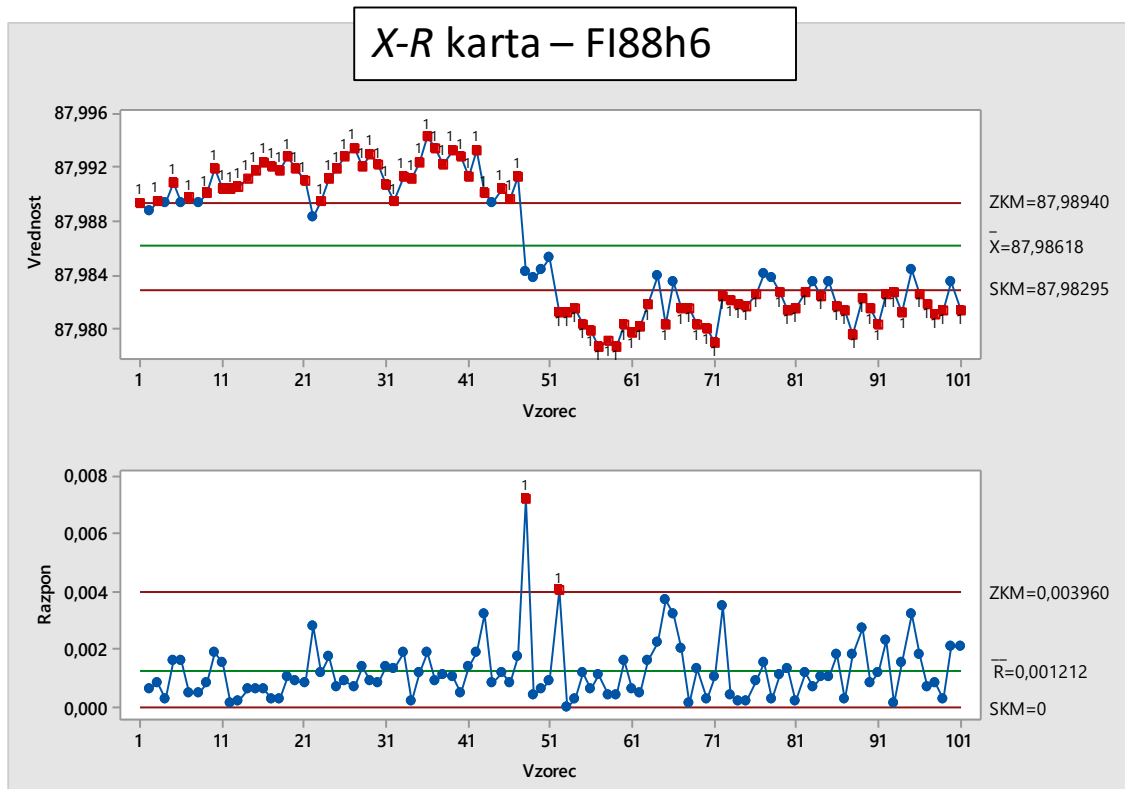
Slika A.6: Analiza sposobnosti za premer 72 mm.



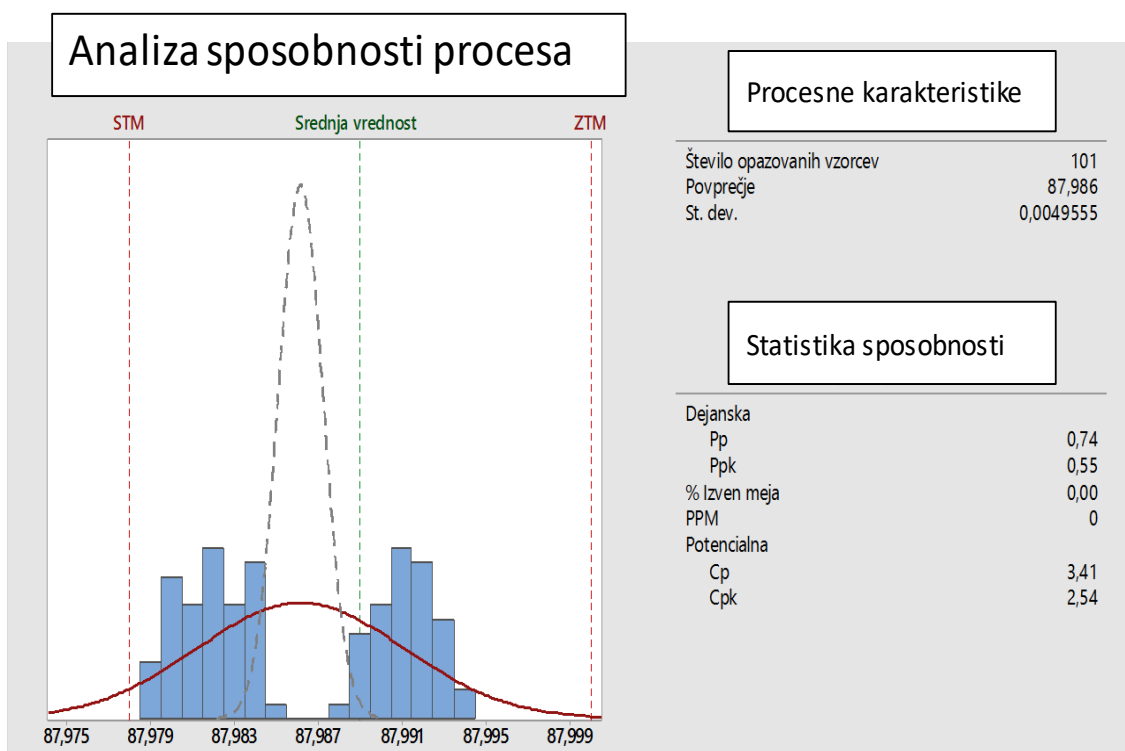
Slika A.7: X-R karta meritev na premeru 88e6 mm.



Slika A.8: Analiza sposobnosti za premer 88e6 mm.

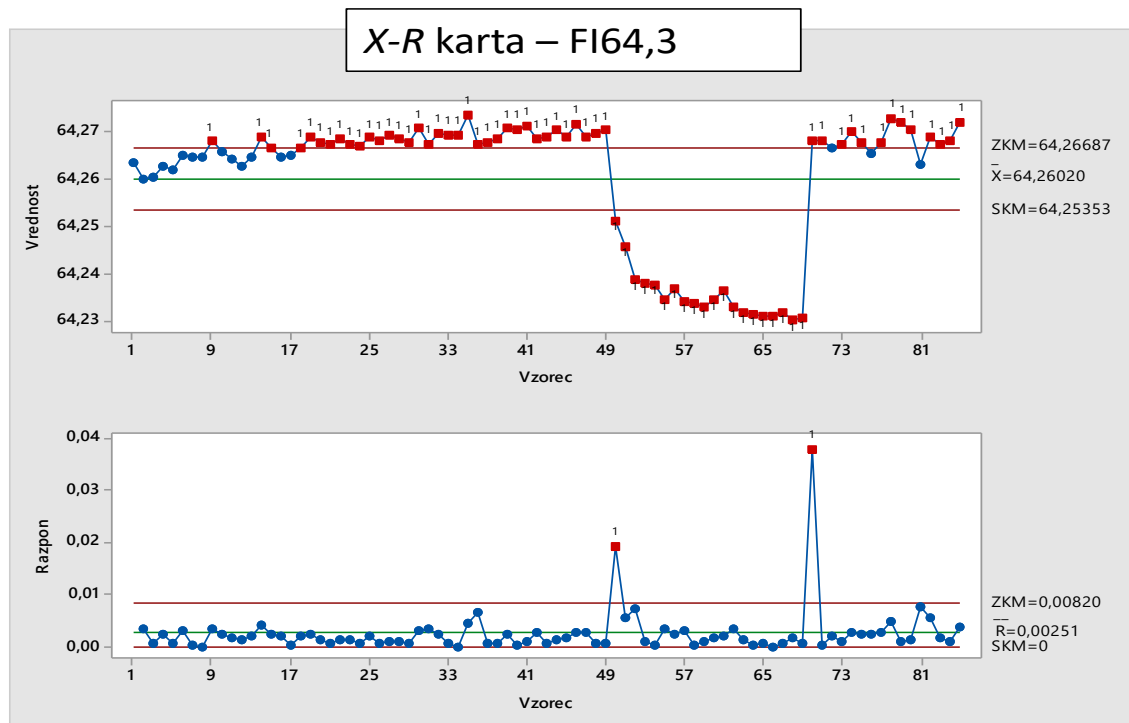


Slika A.9: X-R karta meritev na premeru 88h6 mm.

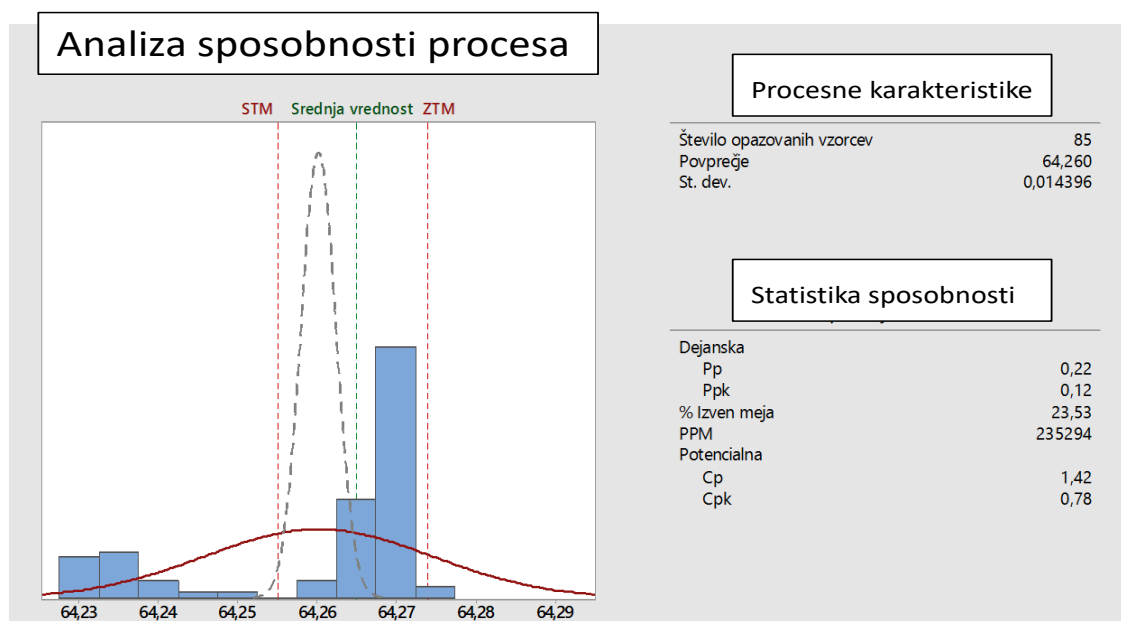


Slika A.10: Analiza sposobnosti za premer 88h6 mm.

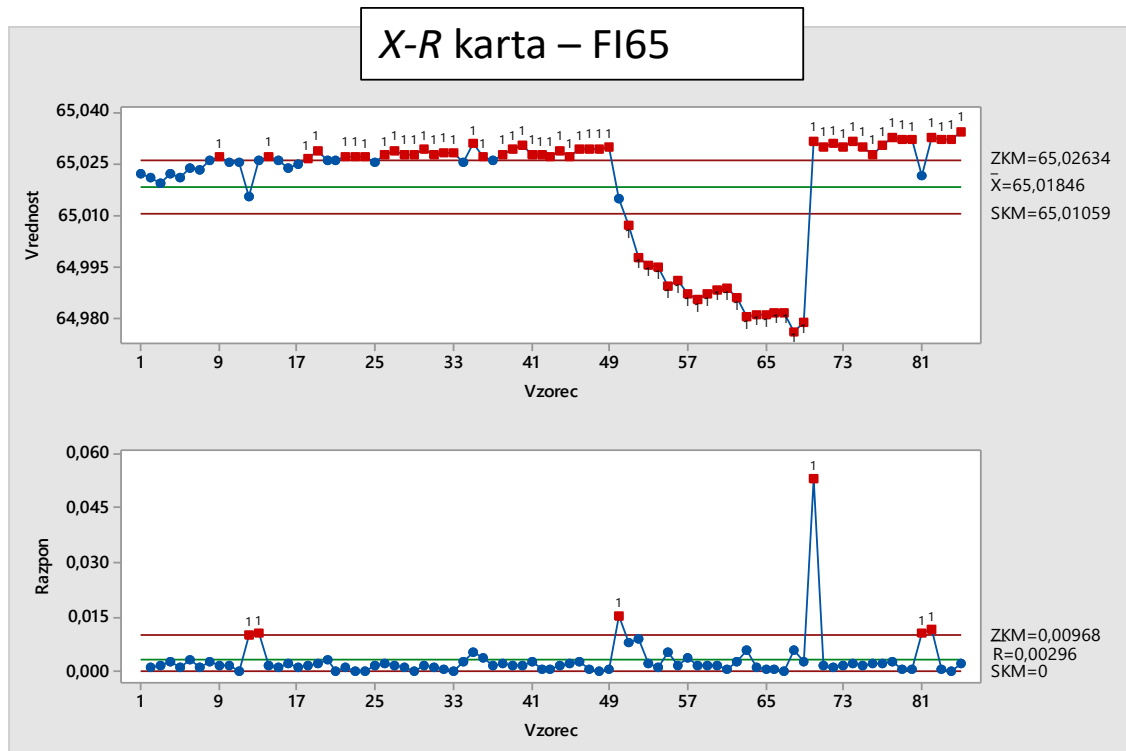
Priloga B: Statistični nadzor procesa po vgradnji korekcijskega sistema



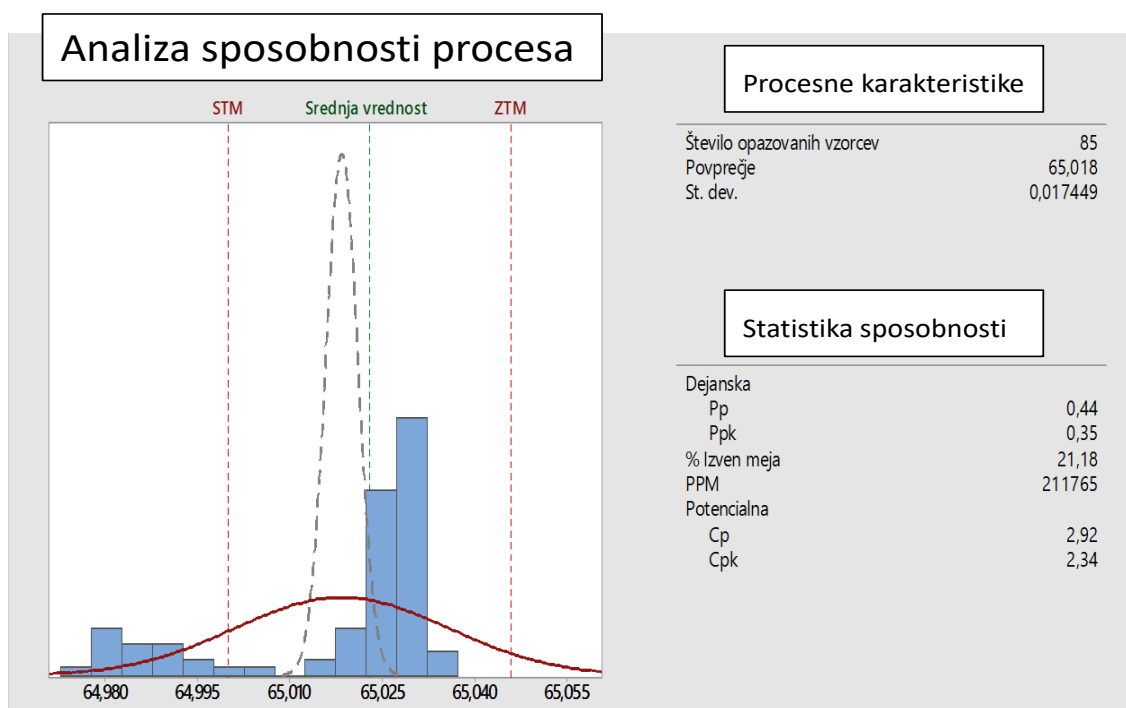
Slika B.1: X-R karta meritev na premeru 64,3 mm.



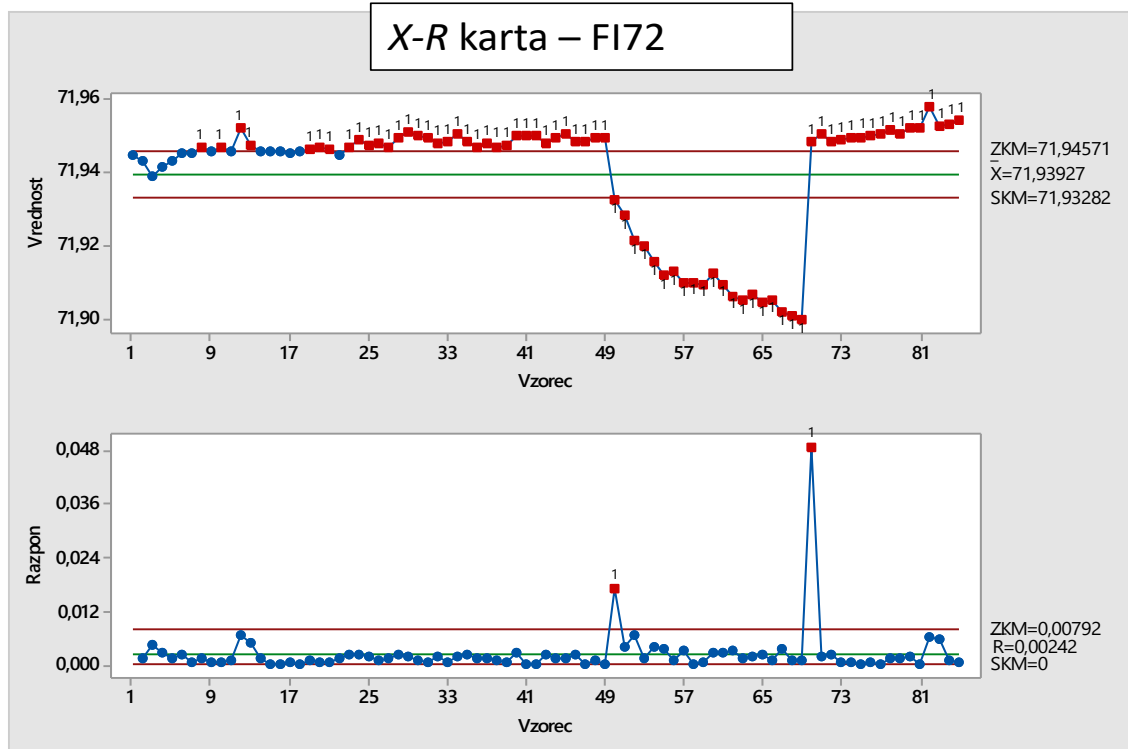
Slika B.2: Analiza sposobnosti za premer 64,3 mm.



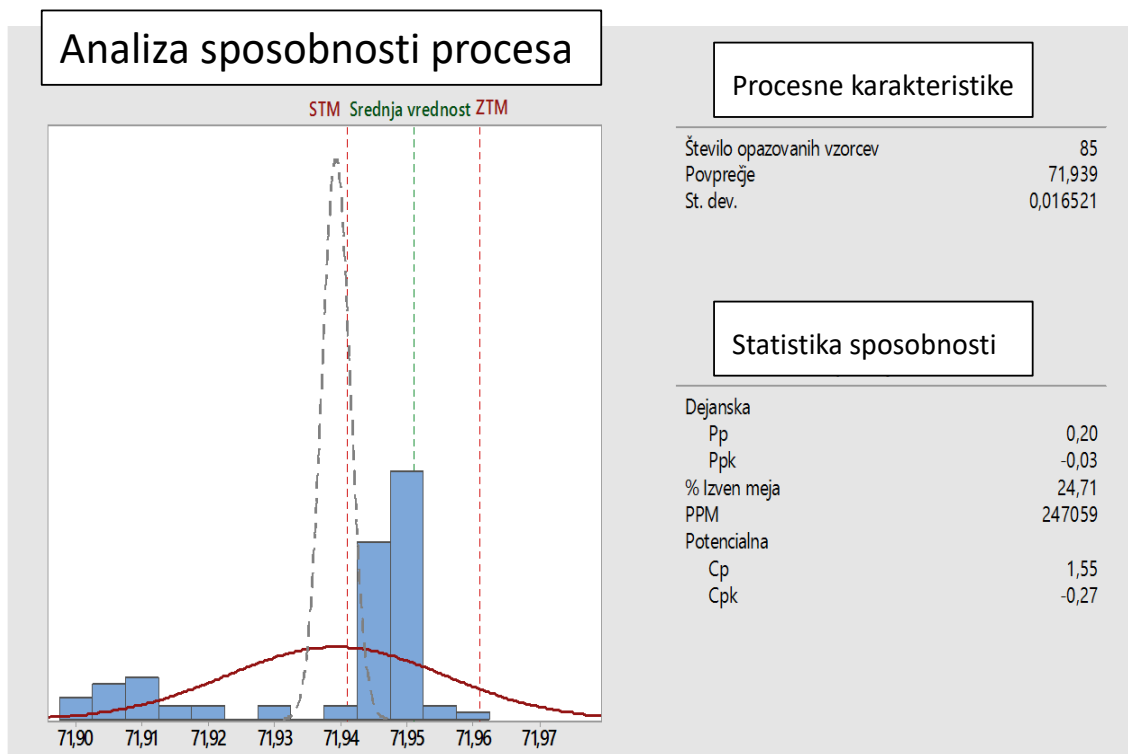
Slika B.3: X-R karta meritev na premeru 65 mm.



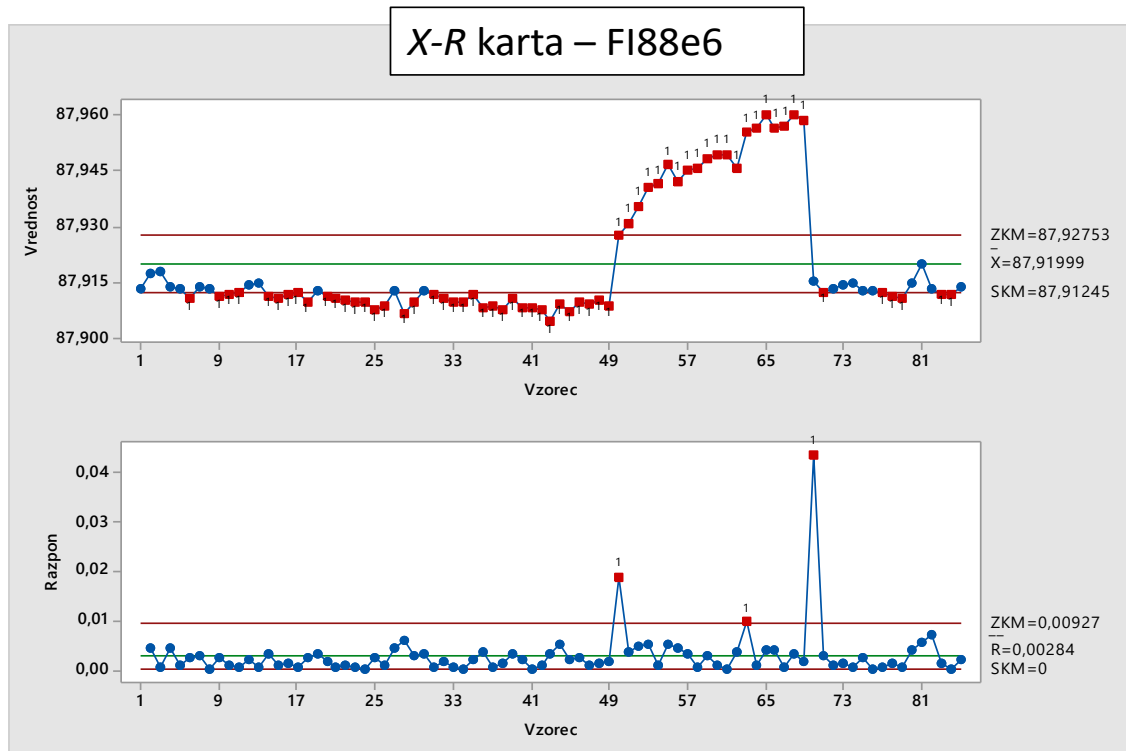
Slika B.4: Analiza sposobnosti za premer 65 mm.



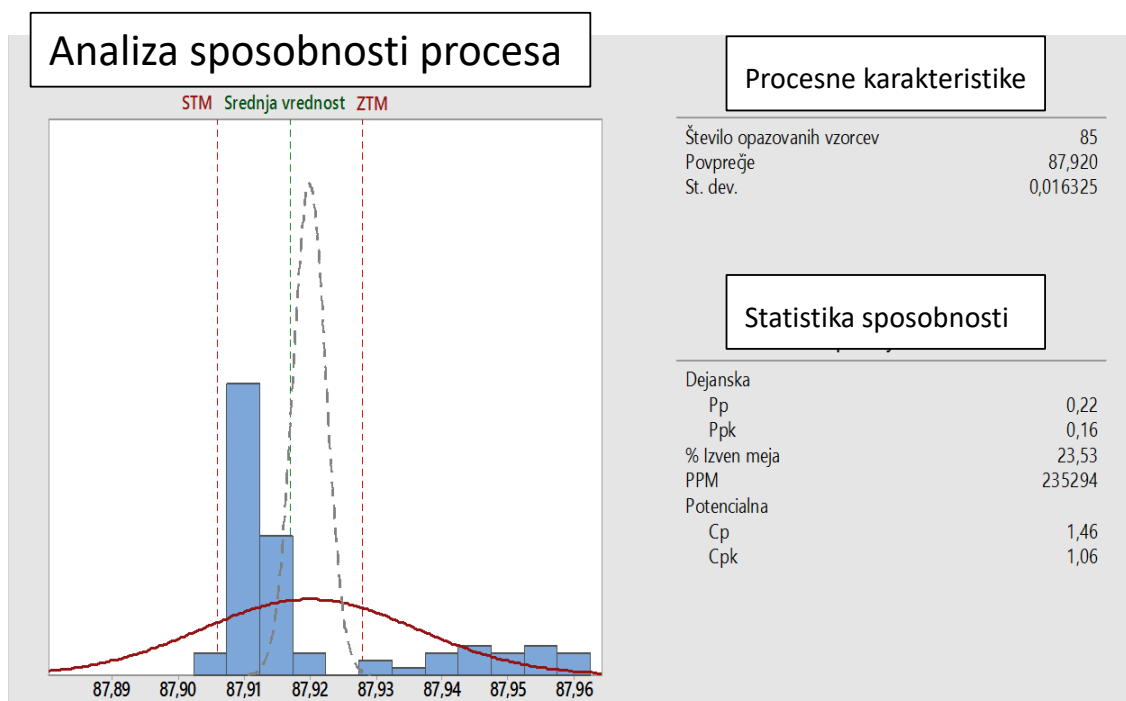
Slika B.5: X-R karta meritev na premeru 72 mm.



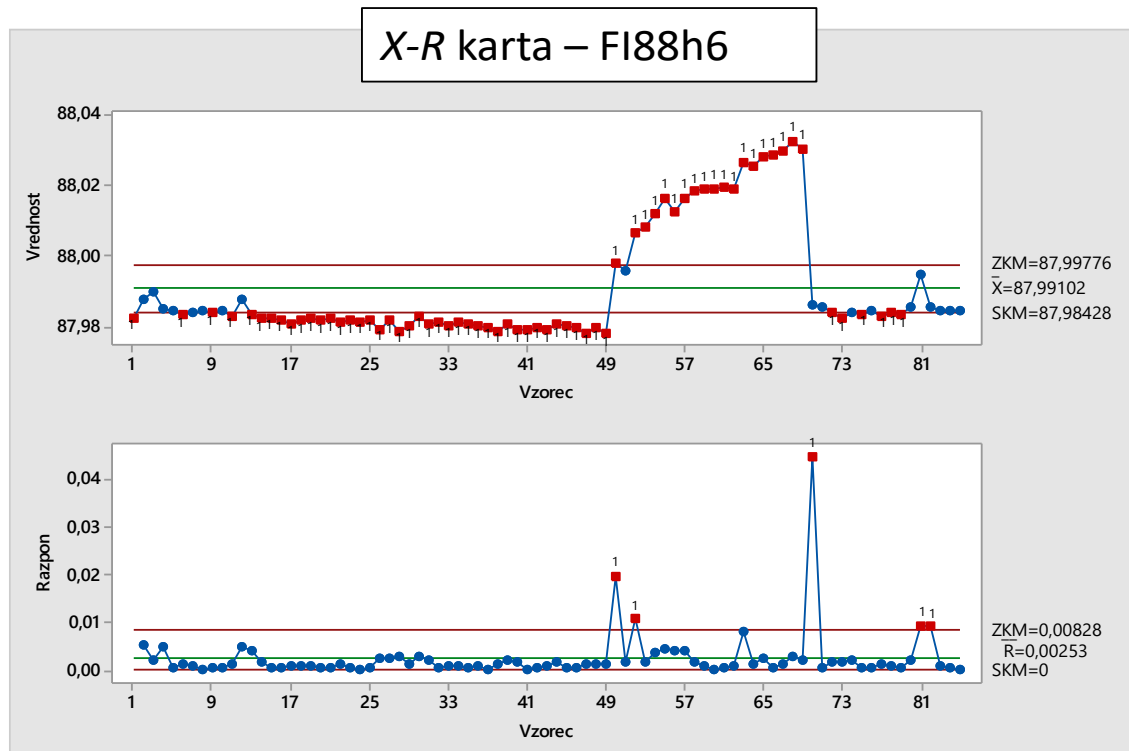
Slika B.6: Analiza sposobnosti za premer 72 mm.



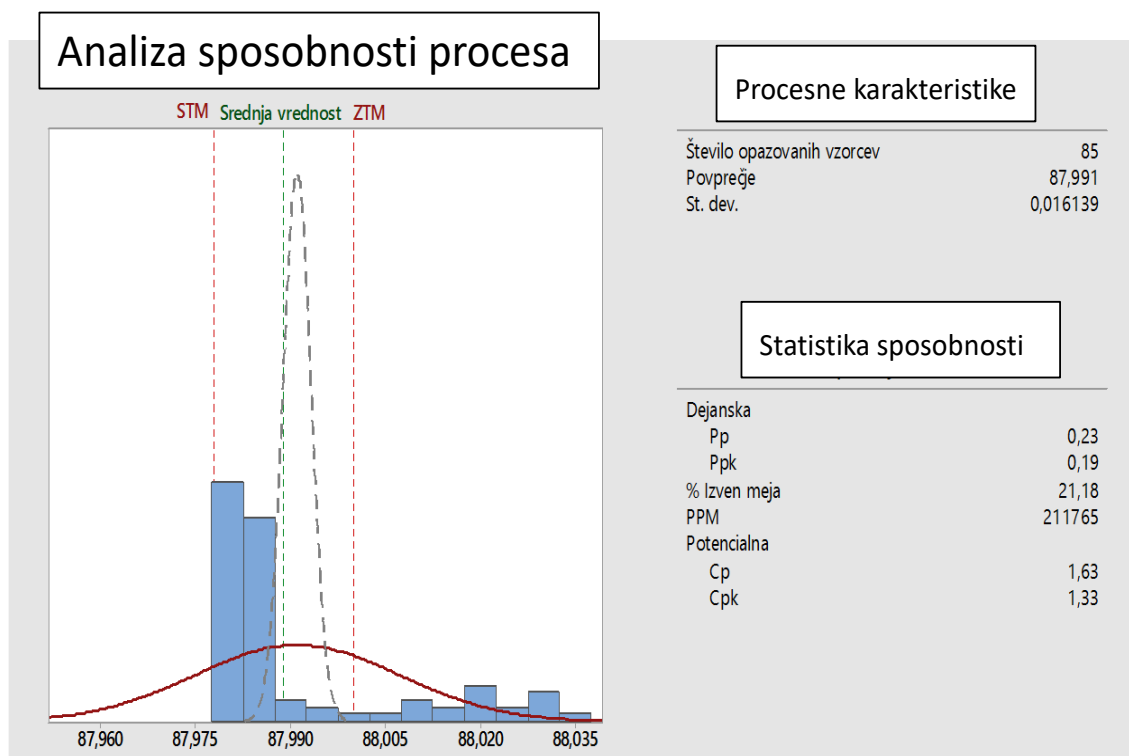
Slika B.7: X-R karta meritev na premeru 88e6 mm.



Slika B.8: Analiza sposobnosti za premer 88e6 mm.

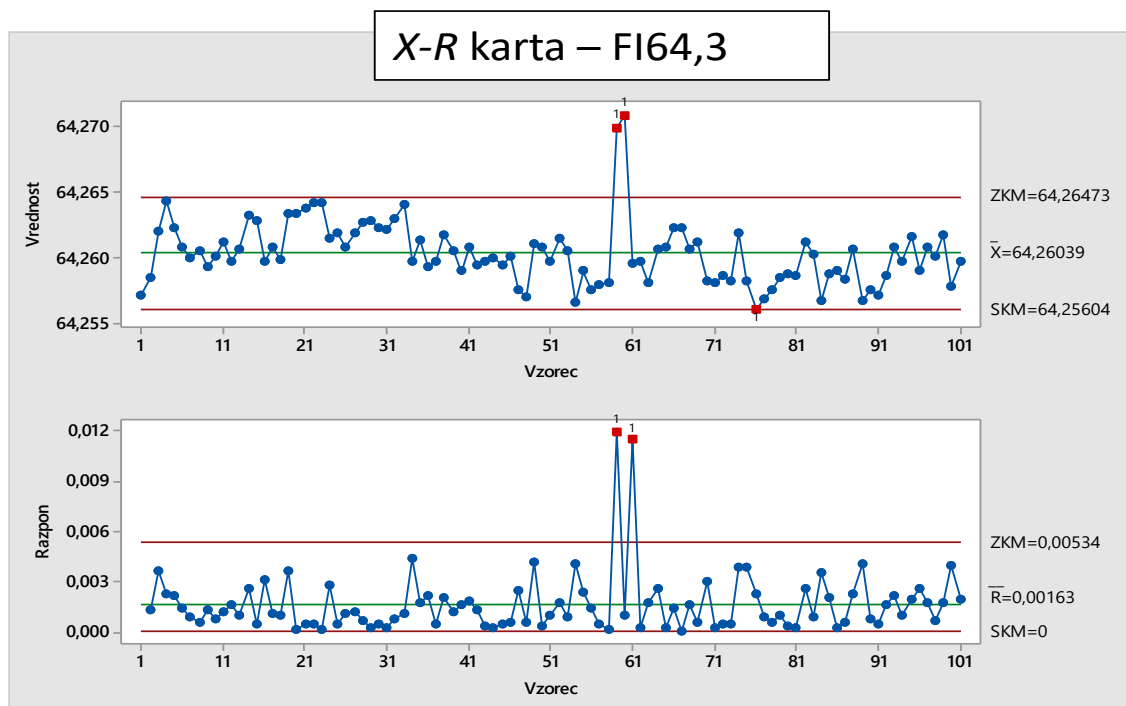


Slika B.9: X-R karta meritev na premeru 88h6 mm.

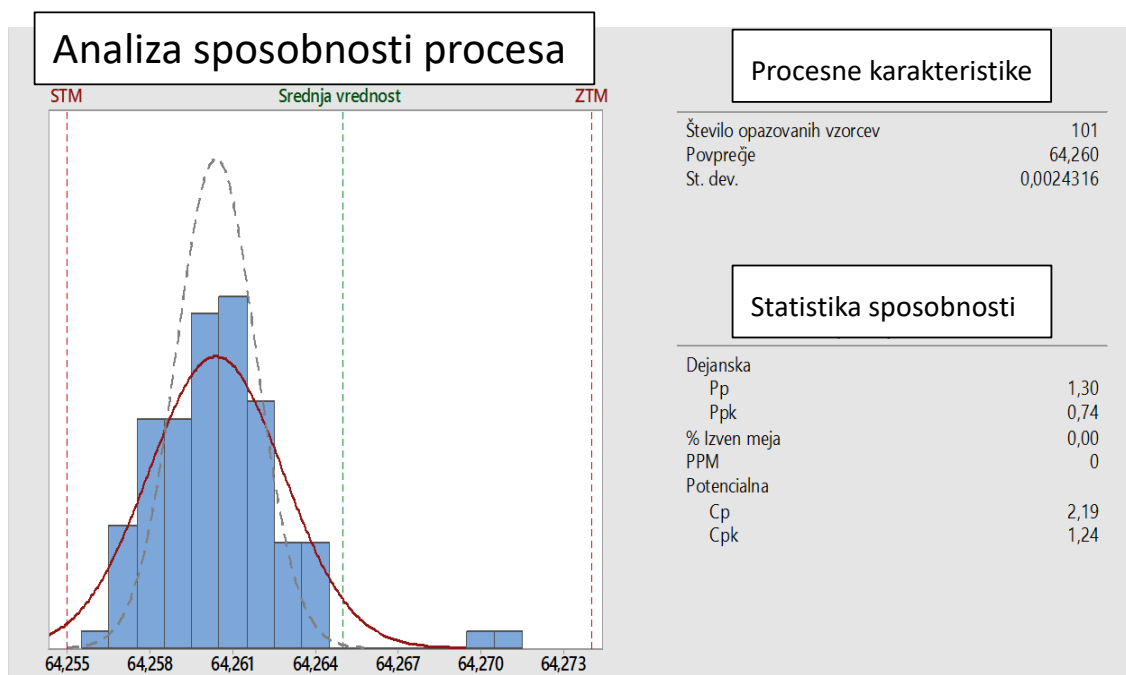


Slika B.10: Analiza sposobnosti za premer 88h6 mm.

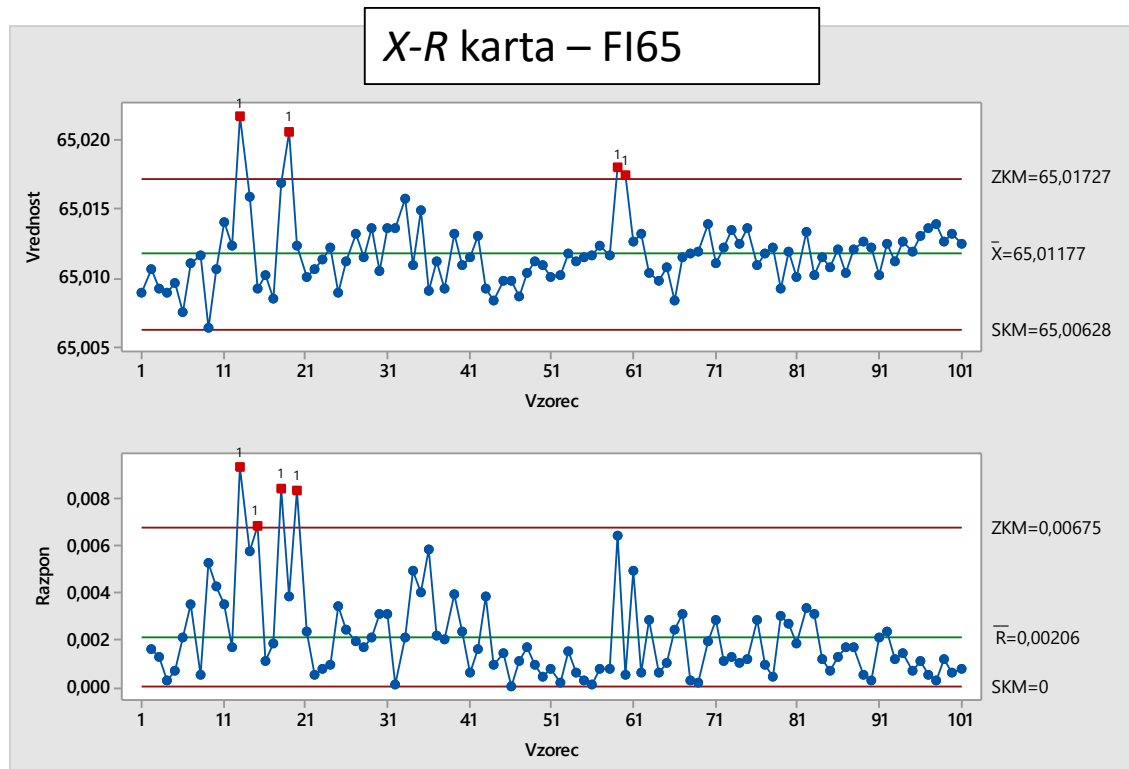
Priloga C: Statistični nadzor procesa po umerjanju CNC stružnice



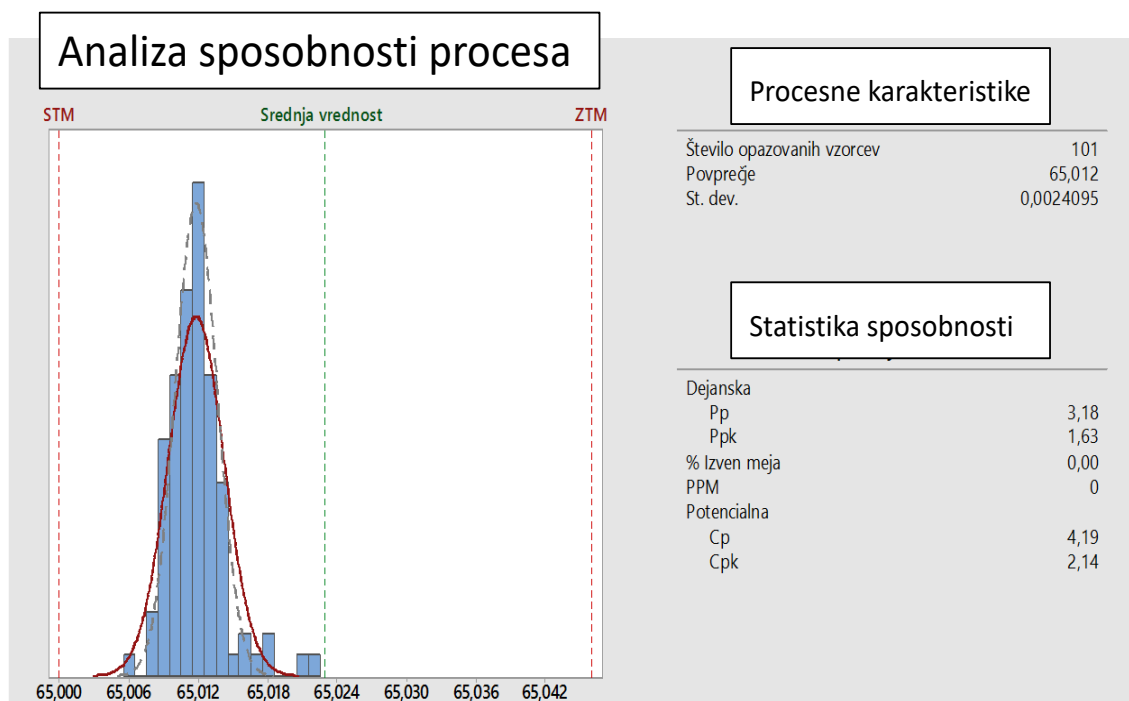
Slika C.1: X-R karta meritev na premeru 64,3 mm.



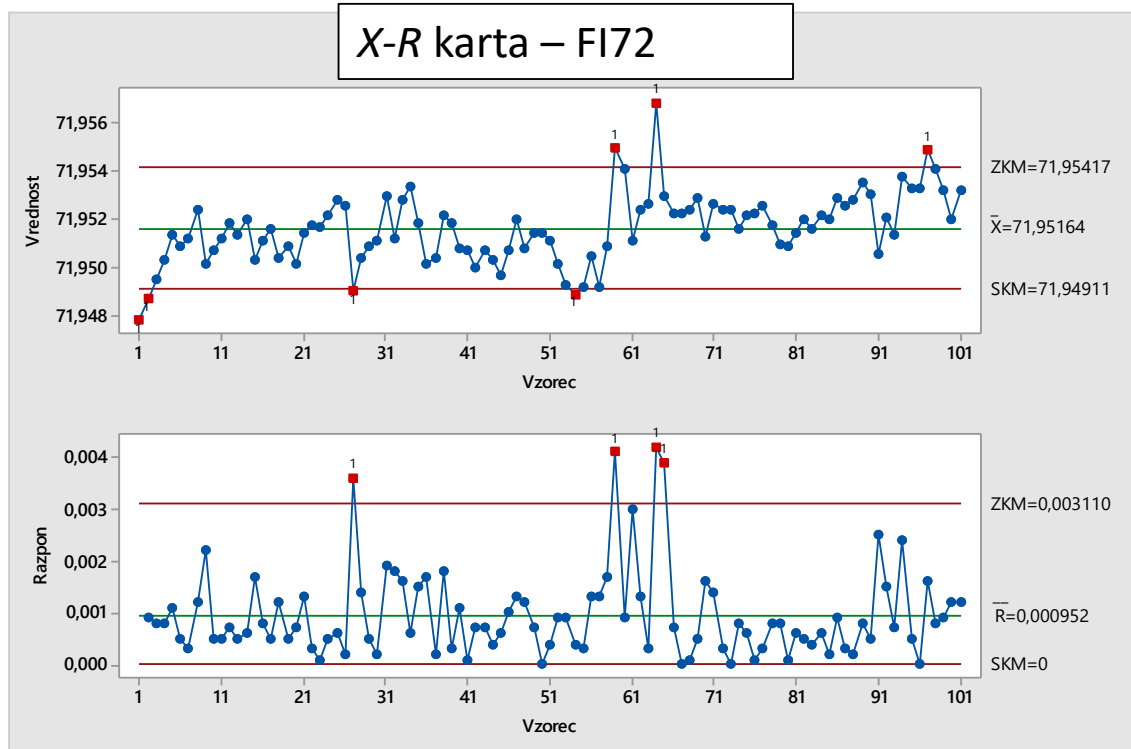
Slika C.2: Analiza sposobnosti za premer 64,3 mm.



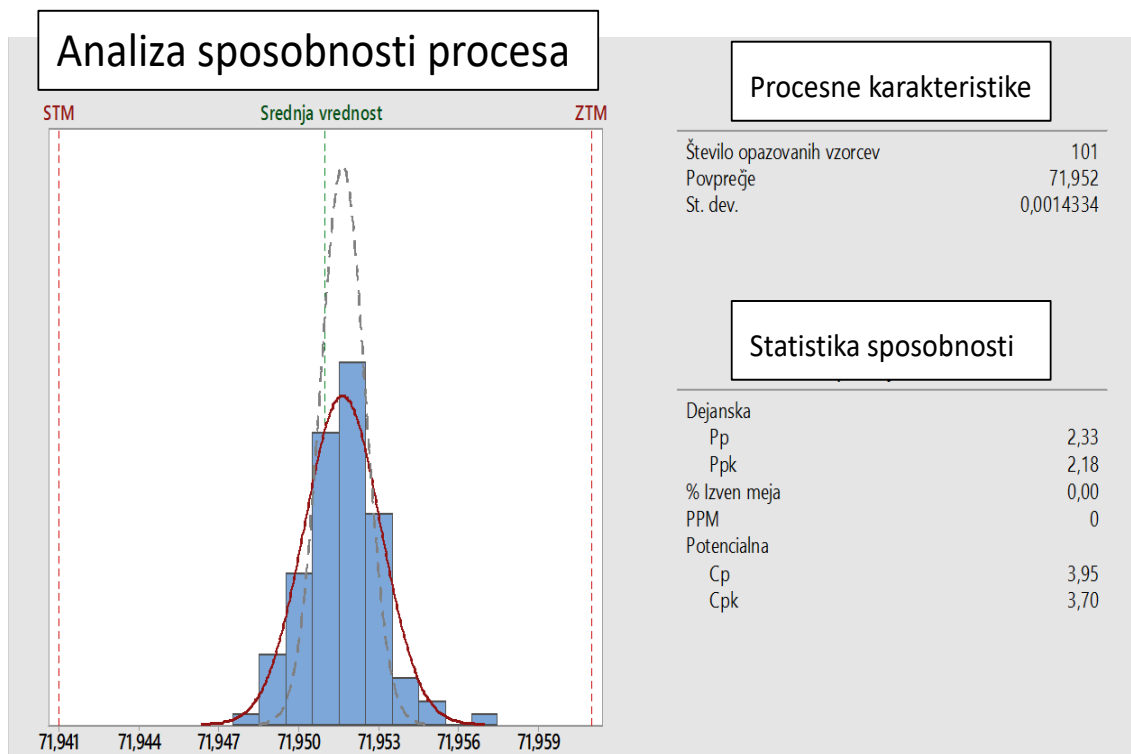
Slika C.3: X-R karta meritev na premeru 65 mm.



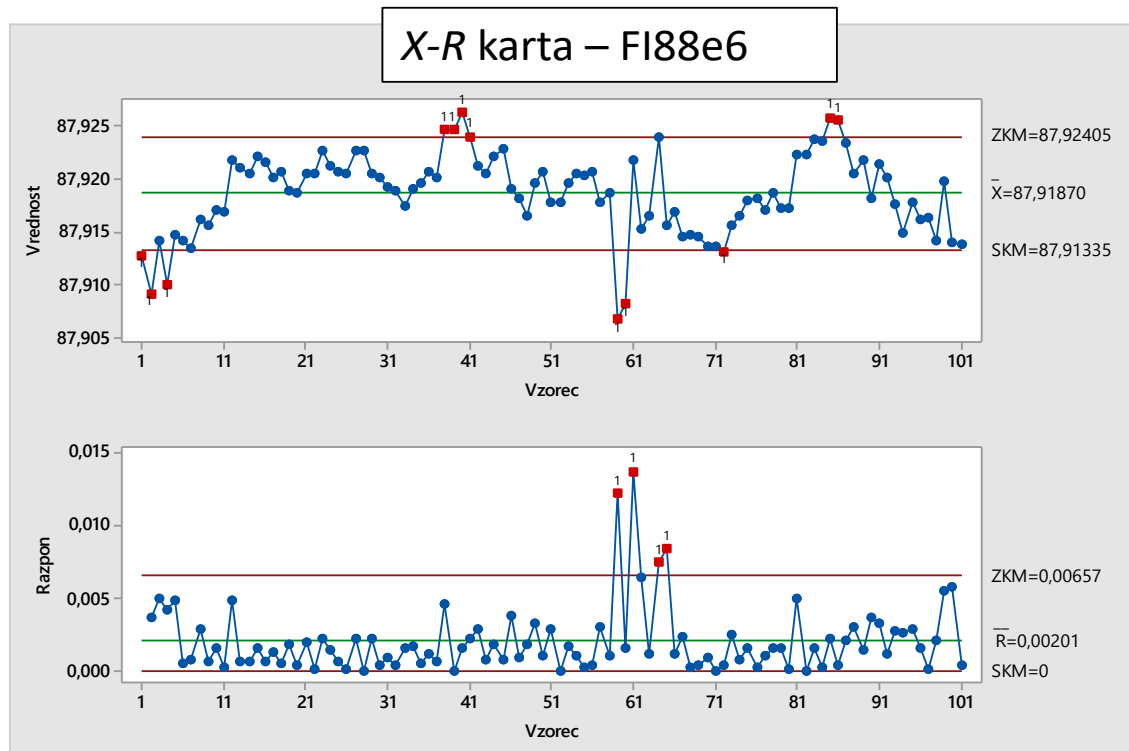
Slika C.4: Analiza sposobnosti za premer 65 mm.



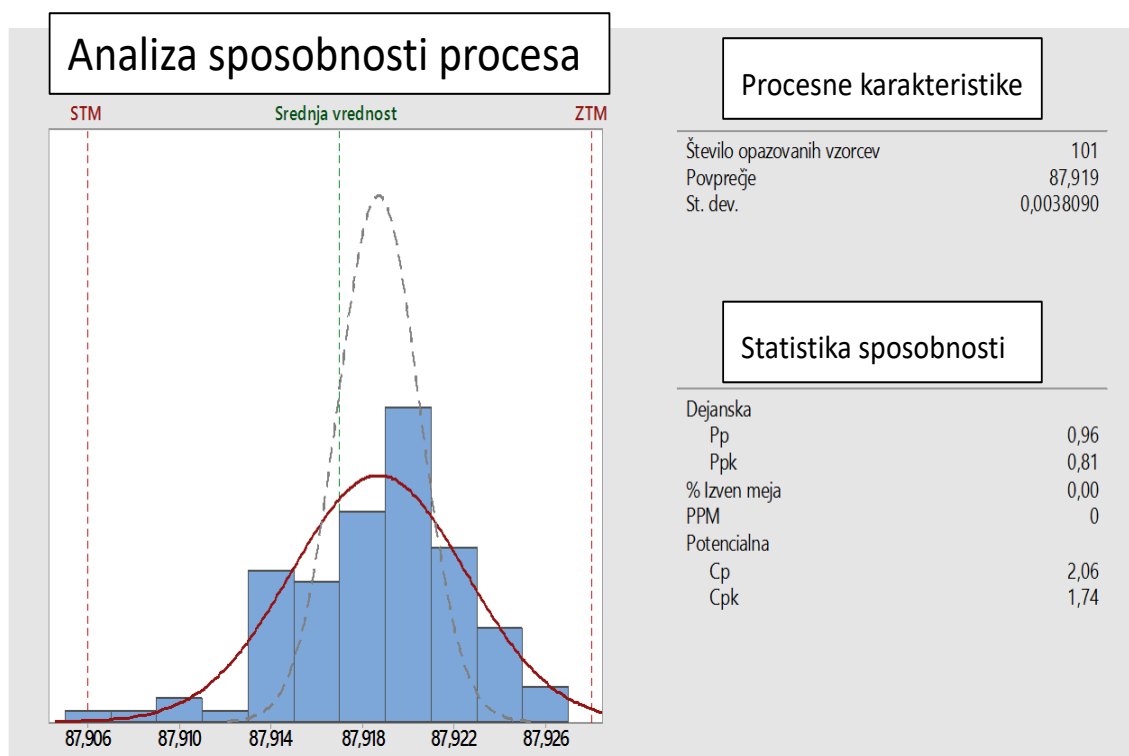
Slika C.5: X-R karta meritev na premeru 72 mm.



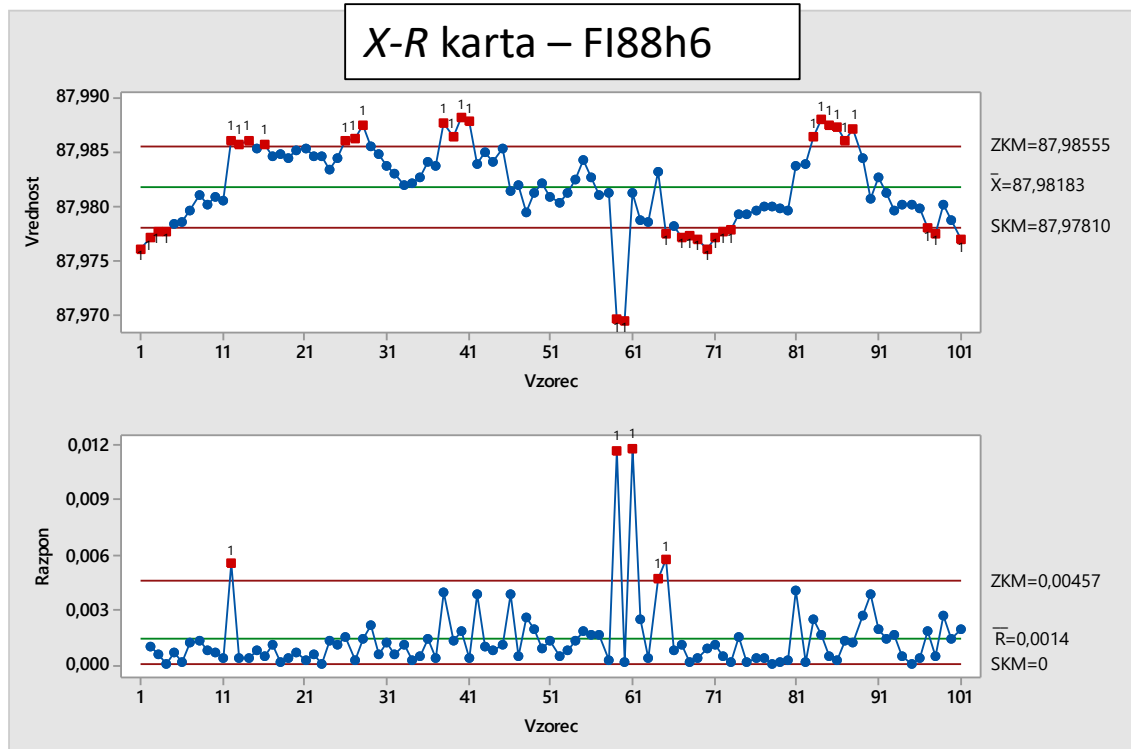
Slika C.6: Analiza sposobnosti za premer 72 mm.



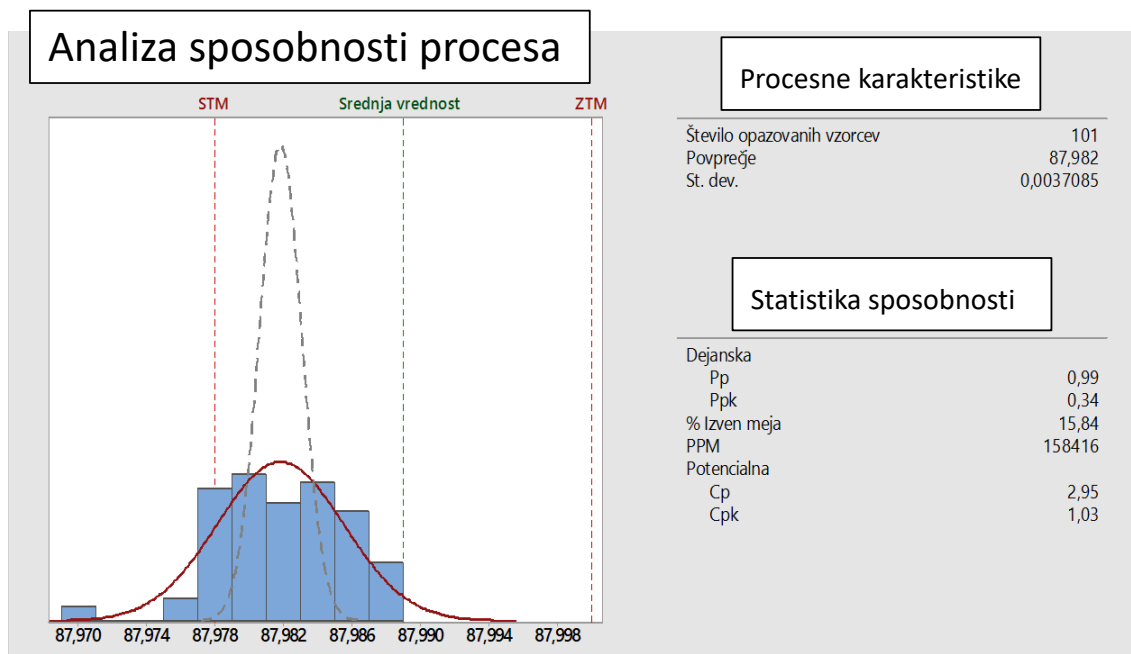
Slika C.7: X-R karta meritev na premeru 88e6 mm.



Slika C.8: Analiza sposobnosti za premer 88e6 mm.



Slika C.9: X-R karta meritev na premeru 88h6 mm .



Slika C.10: Analiza sposobnosti za premer 88h6 mm.