

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

**IZBOLJŠAVA PROCESA MERJENJA
IZDELKOV IZ VEČGNEZDNEGA LIVARSKEGA
ORODJA**

Kandidat: Tadej Pintar

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Strojništvo

Mentor-predavatelj: dr. Darko Friščić, univ. dipl. gosp. inž.

Mentor v podjetju: dr. Aleš Slak, univ. dipl. inž. str.

Lektorica: Anja Miklavčič Zatsepina, prof. slov.

Maribor, 2025

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Tadej Pintar sem avtor diplomskega dela z naslovom »Izboljšava procesa merjenja izdelkov iz večgnezdnega livarskega orodja«, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Darka Friščiča, univ. dipl. gosp. inž.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel/a, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli kot moje lastne kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Uradni list RS, št. 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/13, 56/15 in 63/16 – ZKUASP); prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, oktober 2025

Podpis študenta:

ZAHVALA

Ob zaključku diplomskega dela bi se rad zahvalil vsem, ki so me med študijem podpirali in spodbujali.

Najprej se zahvaljujem mentorju, dr. Darko Friščiću, univ. dipl. gosp. inž., za strokovno vodenje in pomoč pri nastanku diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi somentorju v podjetju, dr. Aleš Slaku, univ. dipl. inž. str., ter podjetju Iskra ISD d. o. o. za vso pomoč, napotke in možnost uporabe internega gradiva.

Posebno zahvalo namenjam družini, še posebej partnerki Klavdiji, ki mi je ves čas stala ob strani, me spodbujala in verjela vame.

Nazadnje se zahvaljujem vsem, ki so kakor koli pripomogli k nastanku tega diplomskega dela.

POVZETEK

Diplomsko delo obravnava obstoječi proces merjenja livarskega izdelka in njegovo izboljšavo z razvojem vpenjalne priprave, namenjene sočasnemu vpenjanju večjega števila merjencev. Namen dela je bil z ustreznim načrtovanjem in konstruiranjem vpenjalne priprave ter izdelavo novega merilnega programa zagotoviti večjo natančnost in ponovljivost meritev na več merjencih hkrati. Cilj pa je bila izvedba analize merilnih sistemov na podlagi izdelane vpenjalne priprave z uporabo novega merilnega programa.

Teoretični del vključuje opise vseh uporabljenih metod in programov za nastanek tega diplomskega dela ter analizo vpenjalnih priprav in najpogosteje uporabljenih praks vpenjanja merjencev v industriji.

Praktični del zajema opis in predstavitev zahtev, ki jih mora vpenjalna priprava izpolnjevati. V programskem okolju Creo je prikazano konstruiranje podsestavov, potrebnih za končni izdelek. Predstavljen je tudi prototipni plastični model, ki je bil na podlagi funkcijskega testa vstavljanja merjenca naknadno prilagojen. Drugi del praktičnega dela obsega izdelavo merilnega protokola v programskem okolju PC-DMIS, ki je bil uporabljen za pridobivanje rezultatov meritev. Prav ti so bili nato obdelani v okviru analize merilnih sistemov, kjer se preverja sposobnost merilnega sistema.

Rezultati so pokazali, da zasnovana vpenjalna priprava omogoča hitrejše, enostavnejše in natančnejše vpenjanje, kar pomeni prihranek časa in manj napak pri postavitvi merjencev. Z optimizacijo novega merilnega programa nam je uspelo čas meritev dvanajstih merjencev skrajšati z 1,75 ure na 1,05 ure.

V okviru diplomskega dela so bile postavljene štiri hipoteze, ki so bile z izvedenimi testi in analizo rezultatov vse potrjene. Zastavljeno je bilo tudi raziskovalno vprašanje, ki je bilo obravnavano skozi celotno diplomsko delo.

Raziskava poudarja pomen uvajanja sodobnih merilnih pristopov in avtomatizacije v industriji. Z optimizacijo merilnih postopkov se izboljšujeta natančnost in ponovljivost meritev, hkrati pa se zmanjšajo stroški napak ter poveča učinkovitost proizvodnje. Takšne izboljšave prispevajo k višji kakovosti izdelkov in posledično k večji konkurenčnosti podjetja na trgu.

Ključne besede: *vpenjalna priprava, merilni protokol, analiza MSA, koordinatni merilni stroj, konstruiranje.*

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF THE MEASUREMENT PROCESS OF PRODUCTS FROM MULTI-CAVITY FOUNDRY TOOL

The thesis deals with the existing process of measuring a foundry product and its improvement by developing a fixture designed for simultaneous clamping of a larger number of measured parts. The purpose of the thesis was to ensure greater accuracy and repeatability of measurements on multiple test pieces simultaneously by appropriately planning and constructing the fixture and creating a new measurement program. The goal was to perform an analysis of measurement systems based on the manufactured fixture using the new measurement program.

The theoretical part includes descriptions of all methods and programs used to create this thesis and an analysis of fixture and the most commonly used practices for clamping measured parts in industry.

The practical part includes a description and presentation of the requirements that the fixture must meet. The Creo software environment shows the construction of subassemblies required for the final product. A prototype plastic model is also presented, which was subsequently modified based on the functional test of inserting the measured part. The second practical part includes the creation of a measurement protocol in the PC-DMIS software environment, which was used to obtain measurement results. These were then processed in the measurement system analysis, where the capability of the measurement system is checked.

The results showed that the designed fixture enables faster, simpler and more accurate clamping, which means saving time and fewer errors when placing the measured parts. By optimizing the new measurement program, we managed to reduce the measurement time of twelve measured parts from 1.75 hours to 1.05 hours.

Four hypotheses were set as part of the thesis, all of which were confirmed by the tests performed and the analysis of the results. A research question was also posed, which was addressed throughout the thesis.

The research emphasizes the importance of introducing modern measurement approaches and automation in industry. By optimizing measurement procedures, the accuracy and repeatability of measurements are improved, while the costs of errors are reduced and production efficiency

is increased. Such improvements contribute to higher product quality and, consequently, greater competitiveness of the company in the market.

Keywords: *fixture, measurement protocol, MSA analysis, coordinate measuring machine, design.*

KAZALO

1	UVOD	12
1.1	OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	12
1.2	NAMEN, CILJI IN OSNOVNE TRDITVE	12
1.3	PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE	13
1.4	UPORABLJENE RAZISKOVALNE METODE	14
2	OPIS PODJETJA ISKRA ISD D. O. O.....	15
3	TEORETIČNE OSNOVE.....	17
3.1	KOORDINATNA MERILNA TEHNIKA	17
3.1.1	<i>Lastnosti koordinatne merilne tehnike.....</i>	<i>18</i>
3.1.2	<i>Tipalni sistem.....</i>	<i>18</i>
3.1.3	<i>Različni tipi koordinatnih strojev glede na potrebe.....</i>	<i>19</i>
3.1.4	<i>Kalibracija.....</i>	<i>22</i>
3.1.5	<i>Uporaba GD&T v sodobni industriji.....</i>	<i>23</i>
3.2	CREO.....	24
3.3	MEROSLOVNI PROGRAM PC-DMIS.....	25
3.4	3D PRINTANJE V INDUSTRIJI	26
3.5	ZEISS METROTOM 1500 G2 IN METROTOM OS	27
3.6	VGSTUDIO MAX	29
3.7	POLYWORKS INSPECTOR	31
3.8	ANALIZA MERILNIH SISTEMOV – MSA	32
3.8.1	<i>Kazalci kakovosti merilnega sistema.....</i>	<i>32</i>
3.8.2	<i>Grafični in numerični prikaz podatkov.....</i>	<i>33</i>
3.9	MINITAB.....	34
3.10	VPENJALNE PRIPRAVE V MEROSLOVJU.....	34
3.10.1	<i>Pomen vpenjalnih priprav.....</i>	<i>34</i>
3.10.2	<i>Tehnike vpenjanja merjencev.....</i>	<i>35</i>
4	KONSTRUIRANJE VPENJALNE PRIPRAVE.....	36
4.1	OBSTOJEČE STANJE MERILNEGA PROGRAMA IN VPENJANJA IZDELKA	36
4.2	PREDSTAVITEV ZAHTEV	37
4.3	3D MODELIRANJE	38
4.3.1	<i>Izdelava osnovnih modelov.....</i>	<i>38</i>
4.3.2	<i>Prototip plastičnega 3D modela naseda.....</i>	<i>42</i>
4.3.3	<i>Korekcija modela na podlagi ugotovitev.....</i>	<i>42</i>
4.3.4	<i>Končni 3D model naseda.....</i>	<i>45</i>
4.3.5	<i>Izdelava risb in kosovnice.....</i>	<i>46</i>
4.4	IZDELAVA VPENJALNE PRIPRAVE	47

4.4.1	<i>Tehnologija obdelave</i>	47
4.4.2	<i>Površinska obdelava vpenjalne priprave</i>	48
4.5	TEST VPENJALNEGA NASEDA.....	48
4.6	DRUGA HIPOTEZA	49
5	IZDELAVA MERILNEGA PROGRAMA	50
5.1	IZBIRA TIPAL	50
5.2	PORAVNAVA MERJENCA.....	52
5.3	IZDELAVA MERILNEGA PROTOKOLA NA PODLAGI ZAHTEV KUPCA.....	54
5.4	PRIPRAVA IN IZPIS MERILNEGA POROČILA.....	59
5.5	PRIMERJAVA NOVEGA IN STAREGA MERILNEGA PROGRAMA	60
6	ANALIZA MSA IN PRIKAZ REZULTATOV	61
6.1	PRIPRAVA MERJENCEV	61
6.2	ANALIZA MSA TIPA 1	61
6.3	ANALIZA GAGE R&R	75
6.4	PRVA HIPOTEZA	80
6.5	TRETJA HIPOTEZA	80
6.6	ZANESLJIVOST VPENJALNE PRIPRAVE IN MERILNEGA PROGRAMA	80
6.7	ČETRТА HIPOTEZA	82
7	POVZETKI REZULTATOV	83
8	SKLEP	85
9	VIRI IN LITERATURA	87
10	PRILOGE	88

KAZALO SLIK

SLIKA 1: KOORDINATNI MERILNI STROJ GLOBAL	17
SLIKA 2: PORTALNI KMS	20
SLIKA 3: MERILNA ROKA	20
SLIKA 4: LASERSKI SLEDILNIK	21
SLIKA 5: OPTIČNI MERILNI STROJ	21
SLIKA 6: ETALON ZA KALIBRACIJO KMS	22
SLIKA 7: SIMBOLI GD&T	23
SLIKA 8: PROGRAMSKO OKOLJE CREO	24
SLIKA 9: PROGRAM PC-DMIS	25
SLIKA 10: CT METROTOM 1500 G2	27
SLIKA 11: NAČIN DELOVANJA CT-JA	28
SLIKA 12: PRIKAZ OKOLJA METROTOM OS.....	29
SLIKA 13: PROGRAMSKO OKOLJE VGSTUDIO MAX S PRIKAZOM REKONSTRUIRANEGA 3D MODELA	30
SLIKA 14: PROGRAMSKO OKOLJE POLYWORKS	31
SLIKA 15: VPET IZDELEK V PRIMEŽU.....	36
SLIKA 16: POMEMBNE POVRŠINE ZA VPETJE.....	39
SLIKA 17: PRIKAZ ZASUKA VPENJALNIH MEST ZA LAŽJI DOSTOP S TIPALI	41
SLIKA 18: PROTOTIP NASEDA	42
SLIKA 19: DEVIACIJSKA SLIKA 3D PRINT KOSA.....	44
SLIKA 20: PRIKAZ DELOV DELILNE POVRŠINE IN ODTISA IZMETAČA S SRHOM.....	45
SLIKA 21: PRIMERJAVA PROTOTIPNEGA IN KONČNEGA MODELA	45
SLIKA 22: KONFIGURACIJA IZBRANEGA TIPALA	51
SLIKA 23: UPORABLJENE POVRŠINE ZA PORAVNAVO	54
SLIKA 24: ZANKI TER FUNKCIJI IF IN ASSIGN.....	56
SLIKA 25: VNOSNO POLJE S FUNKCIJAMA CASE IN ASSIGN.....	57
SLIKA 26: PROGRAMSKA KODA ZA VPIS ŠTEVILA GNEZD.....	58
SLIKA 27: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 1	62
SLIKA 28: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 2	63
SLIKA 29: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 3	64
SLIKA 30: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 4	65
SLIKA 31: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 5	66
SLIKA 32: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 6	67
SLIKA 33: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 7	68
SLIKA 34: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 8	69
SLIKA 35: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 9	70
SLIKA 36: MSA TIPA 1 – VPENJALNO MESTO 10	71

SLIKA 37: MSA TIP 1 – VPENJALNO MESTO 11	72
SLIKA 38: MSA TIP 1 – VPENJALNO MESTO 12	73
SLIKA 39: GAGE R&R – DIMENZIJA 22,15	76
SLIKA 40: GAGE R&R – VREDNOSTI DIMENZIJE 22,15	76
SLIKA 41: GAGE R&R – DIMENZIJA 26,3	77
SLIKA 42: GAGE R&R – VREDNOSTI DIMENZIJE 26,3	77
SLIKA 43: GAGE R&R – DIMENZIJA 13,2	78
SLIKA 44: GAGE R&R – VREDNOSTI DIMENZIJE 13,2	78
SLIKA 45: VIZUALNI PRIKAZ MERITEV OPERATERJEV GLEDE NA MERJENCE	79
SLIKA 46: REFERENČNE MERITVE	81

KAZALO TABEL

TABELA 1: REFERENČNE VREDNOSTI GRR ZA OCENJEVANJE USTREZNOSTI.....	75
--	----

KAZALO GRAFIKONOV

GRAF 1: PRIKAZ TEDENSKO PORABLJENIH UR	60
--	----

KRATICE IN AKRONIMI

AM	Additive Manufacturing: Aditivna proizvodnja
3D	Tridimenzionalno
CAD	Computer Aided Design: Računalniško podprto načrtovanje
CNC	Computer Numerical Control: Računalniško numerično krmiljenje
CT	Computed Tomography: Računalniška tomografija
GD&T	Geometrical Dimensioning and Tolerancing: Geometrijsko dimenziranje in toleriranje
KMS	Koordinatni merilni stroj
MSA	Measurement Systems Analysis: Analiza merilnega sistema
PC-DMIS	Meroslovni program podjetja Hexagon
PPAP	Production Part Approval Process: Postopek odobritve izdelkov
SPC	Statistical Process Control: Statistična procesna kontrola

1 UVOD

1.1 Opis področja in opredelitev problema

Kakovost v sodobni avtomobilski industriji ima ključno vlogo, saj je proizvodnja izdelkov podvržena strogim standardom. Zaradi vse večjih zahtev kupcev so poleg funkcijskih testov za zagotavljanje dimenzijske skladnosti izdelkov potrebne tudi meritve na koordinatnih merilnih strojih z uporabo avtomatiziranih meroslovnih programov. Pri izdelkih iz večgnezdnih orodij se pojavlja potreba po hitrem, natančnem in zanesljivem preverjanju dimenzij, zato je uporaba ustreznih vpenjalnih priprav z vidika natančnosti in ponovljivosti meritev ključnega pomena.

Problem, ki ga v diplomskem delu obravnavamo, sta pomanjkljiva zanesljivost in ponovljivost meritev pri trenutnem vpenjanju izdelka v primež. Poleg tega je trenutni sistem zasnovan za vpenjanje in meritev samo enega merjenca, kar podaljša čas izpenjanja in nastavitve naslednjega merjenca. Neponovljivo vpenjanje in nepravilna postavitev kosa v primežu lahko vodita do napačnih odločitev na podlagi nekakovostno izvedenih meritev, kar posledično vpliva na slabšo kakovost in višje stroške.

Poleg zasnove nove vpenjalne priprave za vpenjanje več merjencev hkrati bomo izdelali in optimizirali tudi nov merilni program, ki bo omogočal merjenje od enega do dvanajstih merjencev. Na koncu bomo z analizo merilnih sistemov preverili sposobnost zagotavljanja natančnih in ponovljivih meritev.

1.2 Namen, cilji in osnovne trditve

Namen diplomskega dela je zasnovati, implementirati in preveriti vpenjalno pripravo, ki bo omogočala ponovljivo vpenjanje dvanajstih merjencev iz različnih livarskih gnezd. Hkrati bomo izdelali tudi nov, še izboljšan program za merjenje večjega števila merjencev na novi vpenjalni pripravi.

Glavni cilji so:

- zasnovati in konstruirati vpenjalno pripravo,
- izdelati merilni program za preverjanje dimenzij na koordinatnem merilnem stroju (KMS),
- izvesti analizo merilnega sistema (MSA) in prikazati rezultate,
- raziskati vpliv zanesljivost merilnega sistema na celotno kakovost meritev,

- ovrednotiti dosežene izboljšave v kontekstu produktivnosti.

Hipoteze, ki jih preverjamo, so:

- H1: Vpenjalna priprava, zasnovana na podlagi tehničnih načel, omogoča stabilno in ponovljivo vpenjanje merjenca ter zagotavlja ustrezne rezultate MSA analize merilne metode.
- H2: Ustrezno izbrana konstrukcija vpenjalne priprave zmanjša variabilnost procesa vpenjanja in poveča produktivnost.
- H3: Merilni sistem, uporabljen v kombinaciji z novo vpenjalno pripravo, dosega kriterije ponovljivosti ($\text{Gage R\&R} < 10 \%$).
- H4, dodatna hipoteza (»zanesljivost«): Procesi z uvedenim sistemom prediktivnega vzdrževanja in kontrole imajo višjo stopnjo zanesljivosti delovanja v primerjavi s procesi, ki temeljijo na reaktivnem vzdrževanju.

Glavno raziskovalno vprašanje diplomskega dela se glasi:

- RV1: Kako konstruirati in preveriti funkcionalnost vpenjalne priprave, ki ustreza tehničnim zahtevam in ima merilno metodo z ustrezno ponovljivostjo ter natančnostjo?

1.3 Predpostavke in omejitve

Predpostavljamo, da:

- bodo kontrolorji, ki bodo vpenjalno pripravo uporabljali, ustrezno usposobljeni;
- bo uporabljena merilna oprema ustrezno in redno kalibrirana ter da njena natančnost ni predmet obravnave;
- bodo delovni pogoji za izvedbo meritev (temperatura, vlaga, vibracije v laboratoriju) v ustreznih zahtevanih območjih;
- bodo vzorci, uporabljeni za namene analize MSA, ustrezno pripravljene za meritve (očiščeni, brez ostankov materiala iz trovala in ustrezno shranjeni v merilnem laboratoriju pred meritvami).

Omejitve so:

- Časovni okvir za zasnovo, izvedbo konstrukcije in izdelavo vpenjalne priprave je bil omejen na nekaj mesecev.
- Vpenjalna priprava je namenjena samo enemu specifičnemu tipu izdelka, kar otežuje njeno prilaganje za vpenjanje drugih podobnih izdelkov.
- Zaradi omejenega časa so bili ovirani tudi izdelava merilnega programa, izvedba meritev in vrednotenje podatkov za analizo MSA.
- Analiza temelji na obstoječi programski in strojni opremi za koordinatno merjenje, ki je na voljo v podjetju. Primerjalna analiza z drugimi meroslovnimi programi na KMS zato ni bila izvedljiva.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

V diplomskem delu bodo uporabljene naslednje metode:

- teoretična analiza: pregled, analiza in opis uporabljenih metod, programov in strojev s pomočjo strokovne literature (namen te analize je prikazati obstoječe prakse v industriji);
- razvojna metoda:
 - o konstruiranje: zasnova koncepta, konstrukcija vpenjalne priprave, morebitni popravki 3D modela;
 - o izdelava merilnega programa: izdelava programa za merjenje na zasnovani in izdelani vpenjalni pripravi;
- eksperimentalna metoda: izdelava analize MSA na podlagi meritev vzorcev iz nove vpenjalne priprave in merilnega programa.

2 OPIS PODJETJA ISKRA ISD D. O. O.

Podjetje Iskra ISD ima bogato industrijsko tradicijo, ki sega v obdobje med drugo svetovno vojno. V prostorih v Kranju, kjer danes podjetje deluje, je sprva delovala tovarna tekstila Jugočeška. Leta 1941 so prostore preuredili v proizvodni obrat za izdelavo kovinskih komponent za letalsko industrijo.

Po koncu vojne so prostori postali del takratne družbe Iskra, ki je v naslednjih desetletjih z lastnim razvojem, proizvodnjo in distribucijo postala ena največjih elektrotehničnih podjetij v Jugoslaviji.

V 90. letih je Iskra razpadla na več samostojnih podjetij, ki so odlej delovala ločeno. Družba Iskra ISD d. o. o. je bila uradno ustanovljena leta 2014.

Danes je Iskra ISD sodobno razvojno in proizvodno podjetje s približno 500 zaposlenimi, specializirano za razvoj in izdelavo zahtevnih sestavnih delov za avtomobilsko, elektroindustrijo ter industrijo bele tehnike. Prednost podjetja je v lastnem tehnološkem konceptu, ki združuje več naprednih tehnologij na enem mestu in omogoča izdelavo kompleksnih hibridnih komponent.

Podjetje proizvaja plastične, aluminijaste in hibridne sestavne dele za:

- avtomobilsko industrijo,
- belo tehniko,
- elektroindustrijo.

Podjetje redno vlaga v razvoj na področju tehnologij, sodeluje z univerzami in mednarodnimi partnerji. Ima uvedene naslednje mednarodne standarde kakovosti:

- IATF 16949 – avtomobilska industrija,
- DIN EN ISO 9001:2015 – sistem vodenja kakovosti,
- DIN EN ISO 14001:2015 – okoljski sistem vodenja,
- ISO 13485:2016 – za področje medicine,
- ISO/IEC 17025:2017 – za kalibracijski in preizkuševalni laboratorij.

Poleg tega je Iskra ISD eno redkih podjetij v Evropi, ki na eni lokaciji združuje naslednje procese:

- brizganje termoplastov in duroplastov,
- tlačno litje aluminija,
- CNC obdelavo kovin,
- galvaniziranje,
- lasersko varjenje,
- montažo izdelkov,
- avtomatizacijo in robotizacijo proizvodnje,
- simulacije in razvoj prototipov,
- laboratorijska testiranja in meritve izdelkov.

Iskra ISD je torej pomembno slovensko industrijsko podjetje, ki se je iz skromnih začetkov razvilo v tehnološko naprednega proizvajalca zahtevnih sestavnih delov. Danes je globalni dobavitelj hibridnih komponent, ki z inovacijami soustvarja prihodnost mobilnosti.

3 TEORETIČNE OSNOVE

3.1 *Koordinatna merilna tehnika*

Koordinatni merilni stroji so zaradi vse zahtevnejših izdelkov in potrebe po avtomatiziranju procesov v današnji industriji nepogrešljivo orodje za preverjanje dimenzijske in geometrijske skladnosti. Zaradi natančnosti, majhne merilne negotovosti in hitrosti merjenja se uporabljajo ne samo za potrebe procesnih meritev, temveč tudi za meritve PPAP (Production Part Approval Process) vzorcev ter meritve za namene korekcij orodij.



Slika 1: Koordinatni merilni stroj Global

Vir: (Lastni vir)

3.1.1 Lastnosti koordinatne merilne tehnike

KMS omogočajo 3D določanje geometrijskih značilnosti z uporabo točkovnih meritev na površini merjenca z merilno negotovostjo v mikrometrskem območju. Stabilna granitna in sodobna kompozitna ogrodja strojev zmanjšujejo vpliv vibracij ter temperature, kar se odraža v natančnejših meritvah. Poleg tega se pri KMS s sistemom samodejne temperaturne kompenzacije dodatno zmanjšajo netočnosti zaradi nihanj temperature okolja. Njihova osnovna prednost je visoka natančnost (natančnejši KMS imajo napako pri merjenju le 0,5/L500 μm), fleksibilnost in možnost avtomatizacije procesa merjenja.

Z integracijo modela CAD v merilni program lahko izmerjene vrednosti geometrijskih elementov ali točk primerjamo z idealnim 3D modelom. Merjenje s KMS je zanesljiva in ponovljiva metoda, ki nadomešča počasnejše ročne meritve z različnimi mikrometri, merilnimi uricami, višinomeri, kljunastimi pomičnimi merili. Stroji omogočajo veliko število meritev v razmeroma kratkem času, s tem pa tudi natančnejše spremljanje nihanj dimenzij s pomočjo kazalnikov meritev, kar je uporabno predvsem za zgodnje odkrivanje napak v procesu in njihovo pravočasno odpravljanje.

Trend zadnjega desetletja je prehod iz ročnega na avtomatizirano izvedbo meritev, bodisi z optičnimi senzorji v proizvodnem okolju, ki izvajajo 100-% kontrolo zahtevanih dimenzij na izdelku, bodisi z merilnimi celicami, kjer roboti pozicionirajo merjenca na KMS. Nato stroj sam z izbranim merilnim programom izmeri vrednosti na izdelku ter izpiše in shrani mersko poročilo.

3.1.2 Tipalni sistem

Ključni del vseh merilnih strojev je tipalni sistem, ki je sestavljen iz tipala, sonde in glave. Naloga teh sistemov je zajemanje podatkov točk na površini merjenca med meritvijo. Med tipanjem se tipalo dotakne površine merjenca in zazna koordinate posamezne točke. Meritve lahko izvajamo v točkovnem ali skenirnem načinu, kjer tipalo drsi po površini merjenca in zajema večje število točk.

Tipalni sistemi so lahko fiksni ali premični (omogočajo rotacijo tipal), nadalje pa jih lahko delimo na način merjenja, torej na kontaktne in nekontaktne.

Kontaktne sisteme

Mehanska tipala (t. i. trigger tipala) sprožijo signal ob dotiku na merjeno površino, s čimer omogočijo odčitek koordinat x, y in z .

Skenirna analogna tipala zaznavajo odmik kroglice tipala v realnem času in merijo s silo, obenem pa omogočajo hiter zajem večjega števila točk na površini.

Nekontaktne sisteme

Sem spadajo merilni sistemi, ki merijo brez dotika površine. Pogosto uporabljeni so:

- optični senzorski sistemi, ki delujejo na podlagi strukturirane svetlobe;
- optični sistemi z uporabo bele svetlobe, ki se uporabljajo za prosojne in sijoe površine;
- laserski skenerji, ki na merjenec projicirajo lasersko linijo ali točko in z merjenjem odboja preko detektorjev rekonstruirajo površino.

Tipalni sistemi omogočajo ročno in avtomatizirano (DCC) merjenje. Pri ročnem načinu operater uporablja krmilnik za vodenje in tipanje posameznih elementov na površini, medtem ko DCC način omogoča popolno avtomatizacijo merilnega programa od začetne točke programa. Oba načina merjenja sta mogoča tudi pri optičnih sistemih.

3.1.3 Različni tipi koordinatnih strojev glede na potrebe

KMS se razlikujejo po velikosti, konstrukcijski zasnovi in prenosljivosti, izbira pravega je torej odvisna od merjencev in okolja uporabe (proizvodnja, laboratorij ipd.). Osnovne konfiguracije razvrščamo na naslednje načine glede na njihov namen, zgradbo ali funkcionalnost:

- Mostni: so najbolj razširjeni merilni stroji. Imajo granitno merilno mizo, nad katero je most na dveh podporah (Slika 1), ki se premika v smereh x in y , medtem ko gibanje po osi z omogoča merilna glava.
- Portalni: omogočajo merjenje zelo velikih in težkih merjencev brez njihovega premikanja. Zaradi svoje zmogljivosti so primerni za uporabo v avtomobilski, letalski in ladijski industriji.



Slika 2: Portalni KMS

Vir: (<https://hexagon.com/products/product-groups/measurement-inspection-hardware/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms>)

- Prenosni: pri teh se za merjenje uporabljajo merilne roke in laserski sledilniki, ki omogočajo hitro zajemanje podatkov o površinah neposredno na terenu. Odlikujejo se po visoki fleksibilnosti, medtem ko imajo nižjo natančnost.



Slika 3: Merilna roka

Vir: (<https://hexagon.com/products/absolute-arm-7-axis?accordId=2F3CB6F8FB024465BF57BEE184822B4F>)



Slika 4: Laserski sledilnik

Vir: (<https://hexagon.com/products/leica-absolute-tracker-at930>)

- Optični: omogočajo hitro in brezkontaktno zajemanje kompleksnejših površin s pomočjo svetlobnih vzorcev ter so primerni za analizo celotnih površin.



Slika 5: Optični merilni stroj

Vir: (<https://hexagon.com/company/divisions/manufacturing-intelligence/optim>)

3.1.4 Kalibracija

Kalibracija merilnih strojev je ključen postopek za zagotovitev, da merilni stroj deluje znotraj zahtevanih tolerančnih mej. Izvedena je s strani akreditiranih izvajalcev z uporabo referenčnega etalona, ki pa je sledljiv nacionalnemu merskemu etalonu. Namen kalibracije je preveriti in po potrebi popraviti merilne karakteristike stroja, kot so kompenzacija pogreškov, linearna odstopanja in pravokotnost osi. Redna kalibracija strojev je nadvse pomembna, saj omogoča pravočasno odpravo odstopanj in napak, s čimer se izognemo napačnim meritvam, kar ima neposreden vpliv na kakovost izdelkov. Poleg tega je kalibracija nujna tudi zaradi zagotavljanja skladnosti z zahtevami standardov kakovosti (ISO 9001:2015, ISO/IEC 17025). KMS so navadno umerjeni po standardu ISO 10360-7:2011. Na sliki 6 je prikazan etalon, s katerim se vnaprej določenih intervalih izvaja kalibracija KMS s strani akreditiranih izvajalcev.



Slika 6: Etalon za kalibracijo KMS

Vir: (https://www.tosag.ch/Step-gauge-block_8)

3.1.5 Uporaba GD&T v sodobni industriji

Koordinatna merilna tehnika se v industriji pogosto uporablja v proizvodnih procesih za delno ali popolno kontrolo dimenzij izdelkov. V avtomobilski in letalski industriji je poleg meritev razdalj, premerov, kotov, radijev ipd. poseben poudarek tudi na geometrijsko zahtevanih dimenzijah GD&T (Geometrical Dimensioning and Tolerancing). To je standardiziran sistem, ki omogoča natančno opisovanje geometrijskih značilnosti izdelka in dopustnih odstopanj. GD&T nam omogoča:

- enotno interpretacijo risbe;
- boljšo funkcionalnost, saj izraža pomembne karakteristike za delovanje izdelka;
- dopustna odstopanja tam, kjer niso kritična;
- boljšo kompatibilnost sestavnih delov, saj lahko z definiranjem referenčnih datumov imitiramo končni sestav;
- boljšo komunikacijo med konstrukcijo, proizvodnjo in kontrolo kakovosti.

Specifikacija	Značilnosti	Simbol	Potreben datum
Oblika	Premost	—	ne
	Ravnost		ne
	Krožnost		ne
	Cilindričnost		ne
	Profil linije		ne
	Profil površine		ne
Usmerjenost	Vzporednost	//	da
	Pravokotnost		da
	Kotnost		da
	Profil linije		da
	Profil površine		da
Lokacija	Ležaj		ne ^a da
	Koncentričnost		da
	Soosnost		da
	Simetrija		da
	Profil linije		da
	Profil površine		da
Izteki	Krožni izteki		da
	Skupni izteki		da

a

Glej ISO 1660

b

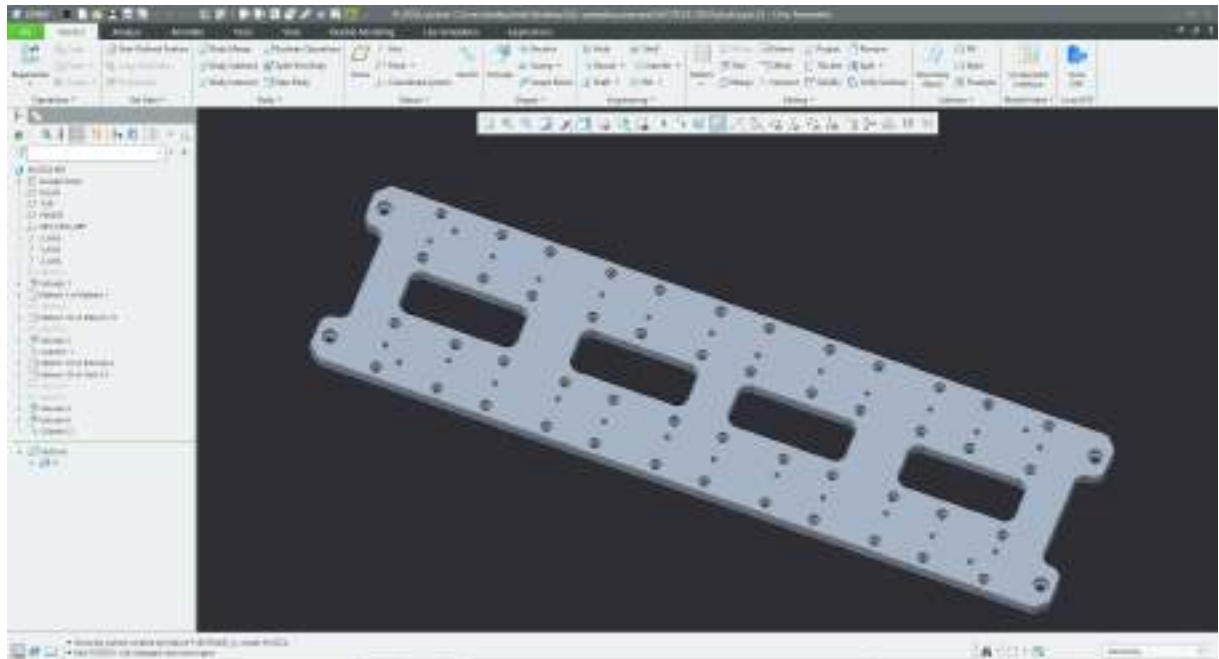
Glej ISO 5458

Slika 7: Simboli GD&T

Vir: SIST EN ISO 1101:2017 (prevedeno)

3.2 Creo

PTC Creo je razširjen programski paket, namenjen 3D modeliranju, izdelavi analiz, konstruiranju in pripravi izdelave v inženirstvu. Je naslednik programa Pro/ENGINEER, zato že od leta 2011 predstavlja rešitev za celoten razvojni proces izdelka.



Slika 8: Programsko okolje Creo

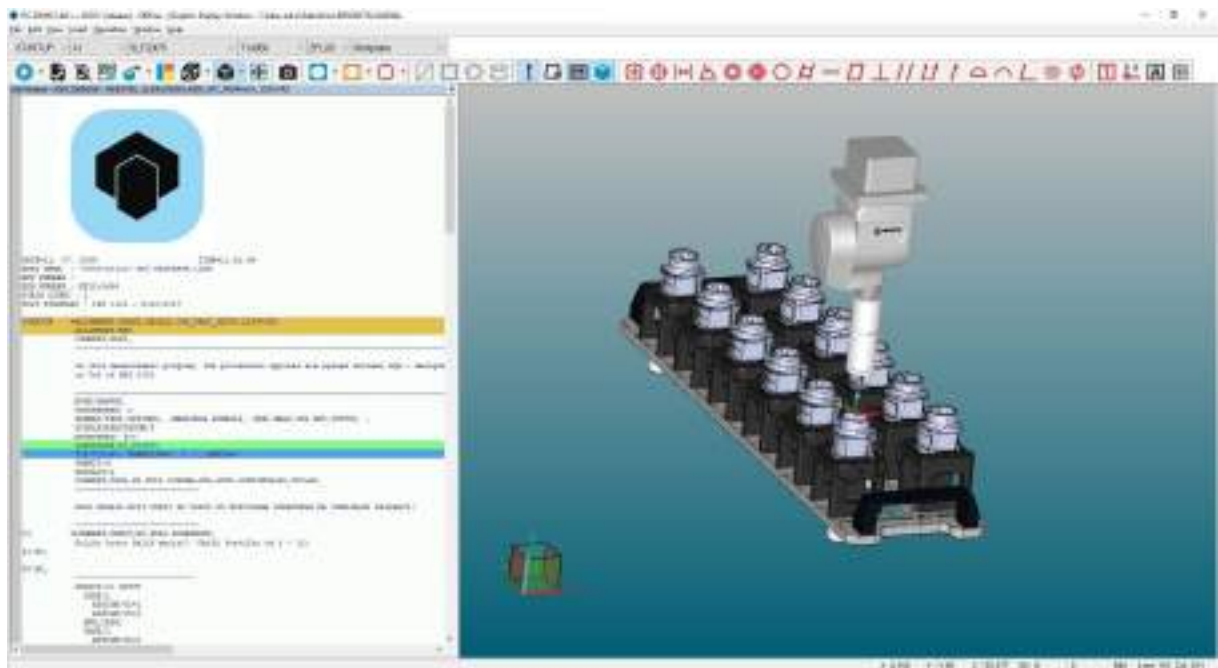
Vir: (Lastni vir)

Ključna prednost Creo je njegova vsestranskost, saj vsebuje vrsto orodij in modulov, ki pokrivajo vse faze življenjskega cikla izdelka. Omogoča izdelavo kompleksnejših 3D modelov in sestavov, pločevinastih izdelkov, varjencev ipd. Prednost programa Creo je neposredna povezanost 3D modela z risbami, kosovnicami in sestavi, zaradi česar vsaka sprememba modela samodejno posodobi vse povezane datoteke, kar zmanjšuje možnost napak. Poleg tega program nudi razne module za vrsto različnih analiz, kot so analize trdnosti in toplote, simulacije mehanizmov ter modul za optimizacijo oblik. S tem lahko inženir v podjetju testira in preveri obnašanje izdelka pod določenimi obremenitvami ter uvede izboljšave še pred izdelavo prototipa. Napredne funkcije programa omogočajo načrtovanje izdelka s pomočjo samodejnega generiranja optimalnih geometrij 3D modela glede na predhodno definirane obremenitve materiala.

Vsestranskost programa se kaže tudi v možnosti uporabe za namene programiranja CNC strojev v proizvodnji ter generiranje programov za KMS.

3.3 Meroslovni program PC-DMIS

PC-DMIS je razširjena programska oprema za namene meroslovja. Razvija jo podjetje Hexagon Manufacturing Intelligence, namenjena pa je predvsem »offline« in »online« programiranju merilnih rutin ter izvajanju meritev na različnih KMS. Poleg klasičnih merilnih strojev se uporablja tudi za ročne merilne roke, optične merilne sisteme in laserske sledilnike. Sama programska oprema omogoča popolno avtomatizacijo enostavne ali kompleksne merilne rutine, od postavitve merjenca na KMS in začetka programa vse do merilnega poročila z izmerjenimi dimenzijami ter tekstovnimi in vizualnimi prikazi odstopanj. Poleg tega omogoča tudi merjenje poljubnega števila merjencev, kjer sta omejitvi le delovna površina stroja in obrati tipal.



Slika 9: Program PC-DMIS

Vir: (Lastni vir)

PC-DMIS poleg osnovnih in naprednih funkcij za programiranje merilnih rutin ponuja tudi vmesnike za povezavo s programi za statistično obdelavo podatkov, kot sta Q-DAS in IQS. V programu določimo dimenzije, ki jih program po koncu merjenja pošlje v zunanji statistični program, kjer se ti podatki beležijo in z različnimi kazalniki prikazujejo stabilnost meritev ter procesa v realnem času.

3.4 3D printanje v industriji

Aditivna proizvodnja (AM – Additive Manufacturing) ali 3D printanje je tehnologija, kjer se v nasprotju z odvzemalnimi postopki model izdelava z nanašanjem materiala v več slojih. V primerjavi s klasičnimi postopki obdelave, kot sta rezkanje in struženje, omogoča izdelavo kompleksnejših geometrij brez potrebe po posebnih orodjih, kar prinaša številne prednosti pri zasnovi.

Tehnologija 3D printanja se deli na več kategorij:

- Fotopolimerizacija: tekoči fotopolimer se selektivno strjuje z laserjem ali svetlobnim virom.
- Prašno taljenje: prah se lokalno tali ali sintra z laserjem.
- Usmerjeno nalaganje energije: žica ali prah se dodaja in tali z laserjem, plazmo ali elektronskim žarkom.
- Ekstruzija materiala: termoplastični filament se tali in iztiska skozi šobo.
- Laminiranje plasti: tanke plasti materiala se režejo in lepljeno plastijo.
- Curjenje materiala: tekoči material (navadno fotopolimer) se nanaša in sproti strjuje.

Najpogosteje se uporablja za namene izdelave prototipnih izdelkov, vse pogosteje tudi za končne izdelke.

Strokovnjaki in nekateri industrijski velikani, kot so McKinsey & Company, Airbus, Siemens ter SpaceX, vidijo AM kot ključno tehnologijo prihodnosti ter jo že uporabljajo za proizvodne namene kot del digitalne preobrazbe industrije.

3.5 ZEISS METROTOM 1500 G2 in Metrotom OS

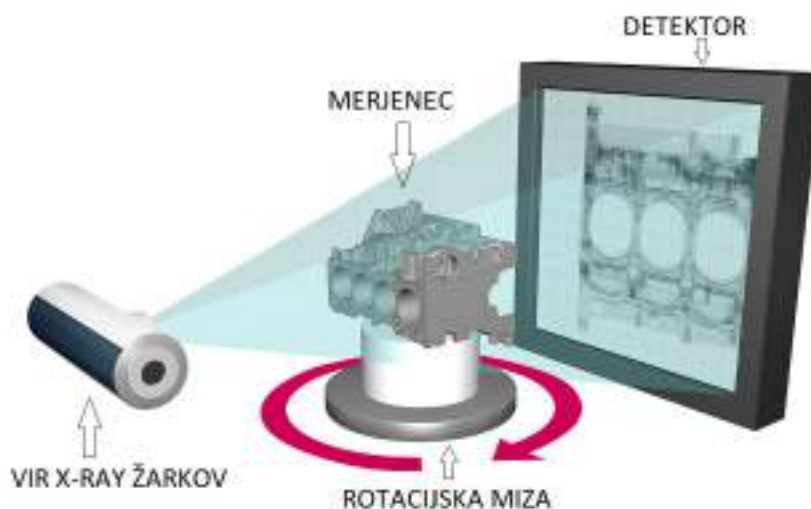
Metrotom 1500 G2 je računalniško-tomografski merilni sistem, ki z uporabo rentgenskih žarkov omogoča 3D zajem podatkov površin celega merjenca, vključno z njegovo celotno notranjostjo. Namenjen je skeniranju širokega spektra merjencev iz različnih materialov in celo sestavov. Omogoča skeniranje izdelkov do premera 615 mm in višine 800 mm v eni rekonstrukciji. Za večje merjence pa je mogoč sken s horizontalnim ali vertikalnim zamikom, ki poveča vidno polje.



Slika 10: CT METROTOM 1500 G2

Vir: (Lastni vir)

Na sliki 11 je prikazano delovanje CT-ja. Postopek se začne z nastavitvijo merjenca na rotacijsko mizo. Po nastavitvi parametrov skeniranja rentgenski žarki pri rotaciji mize izhajajo iz rentgenske cevi (vira) in prehajajo skozi merjenec do detektorja, ki zajame te podatke.



Slika 11: Način delovanja CT-ja

Vir: (<https://yxlon.comet.tech/en/technologies/industrial-ct>)

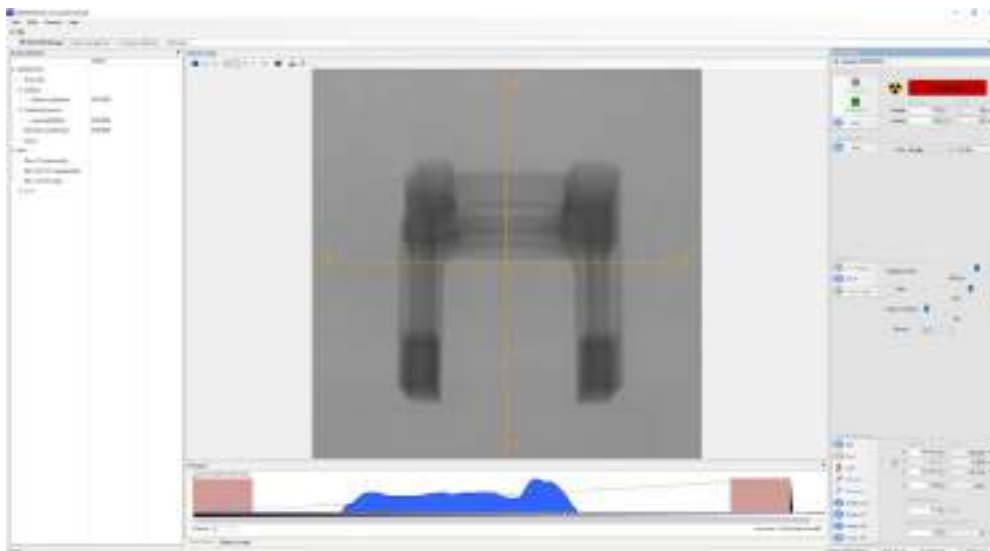
Najpogostejše uporabe CT tehnologije so za:

- skeniranje aluminijastih ulitkov in plastičnih izdelkov za potrebe analiz poroznosti ter preostalih dimenzijskih preverjanj;
- pregled sestavov, kjer razdiranje in analiza ne prideta v poštev;
- obratno inženirstvo in primerjave skeniranih izdelkov s 3D modeli z deviacijskimi slikami;
- meritve kompleksnih in težko dostopnih struktur.

Prednosti te tehnologije so predvsem v razmeroma hitrem brezkontaktnem načinu merjenja, visoki točnosti in ponovljivosti meritev ter možnosti uporabe v razvoju. Slabost pa je predvsem visoka cena, saj se cene teh strojev gibljejo od približno pol milijona evrov naprej. Poleg tega je nujno tudi redno vzdrževanje, saj je treba zadostiti vsem varnostnim zahtevam.

Metrotom OS je namenska programska oprema za upravljanje z industrijskim CT strojem. Gre za uporabniku prijazno programsko okolje, ki uporabnika vodi skozi vse ključne korake nastavitve parametrov. Ključne funkcije zajemajo:

- voden potek dela: program vodi uporabnika skozi postopek nastavitve;
- nadzor skeniranja: uporabnik nastavi parametre (pozicija merjenca, napetost, el. tok, število projekcij, material filtra, ločljivost ipd.);
- samodejno skeniranje in rekonstrukcijo 3D volumna na podlagi skena.



Slika 12: Prikaz okolja Metrotom OS

Vir: (Lastni vir)

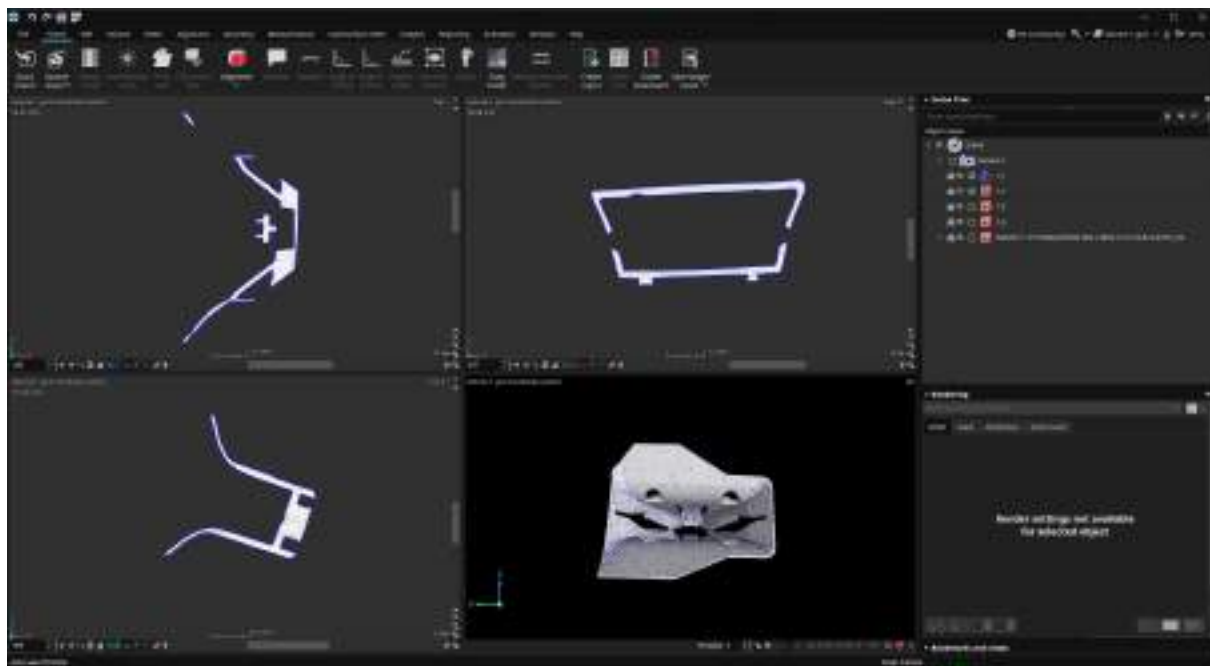
Rekonstruirani podatki v datotečnih končnicah .vgi in .vgl so neposredno združljivi z naprednimi programi za analizo, kot so VGStudio Max, ZEISS Volume Inspect in GOM Inspect. Možna je tudi integracija z ZEISS Calypso za izvajanje osnovnih meritev.

Metrotom OS je torej specializiran vmesnik, ki zagotavlja optimalno delovanje in upravljanje CT naprave, hkrati pa uporabniku omogoča hitro in natančno nastavitve parametrov, varno izvedbo CT skeniranja ter pripravo podatkov za nadaljnje analize.

3.6 *VGStudio Max*

VGStudio Max, proizvajalca Volume Graphics (danes del Hexagona), je vodilna programska oprema za rekonstrukcijo in analizo CT podatkov. Omogoča natančne meritve notranjosti in zunanosti izdelka brez kakršnega koli posega v sam izdelek. Uporablja se v kombinaciji z industrijskimi CT napravami.

Program iz serije radiografij ustvari natančen 3D volumen iz vokslov (angl. voxel). Voksel je kocka v 3D prostoru, ki ima svoje koordinate x , y in z ter vrednost stopnje sivine, ki predstavlja lastnost materiala, najpogosteje gostoto. Pri računalniški tomografiji voksel predstavlja delček rekonstruirane notranje strukture objekta, posnete pod več različnimi koti.



Slika 13: Programsko okolje VGStudio Max s prikazom rekonstruiranega 3D modela

Vir: (Lastni vir)

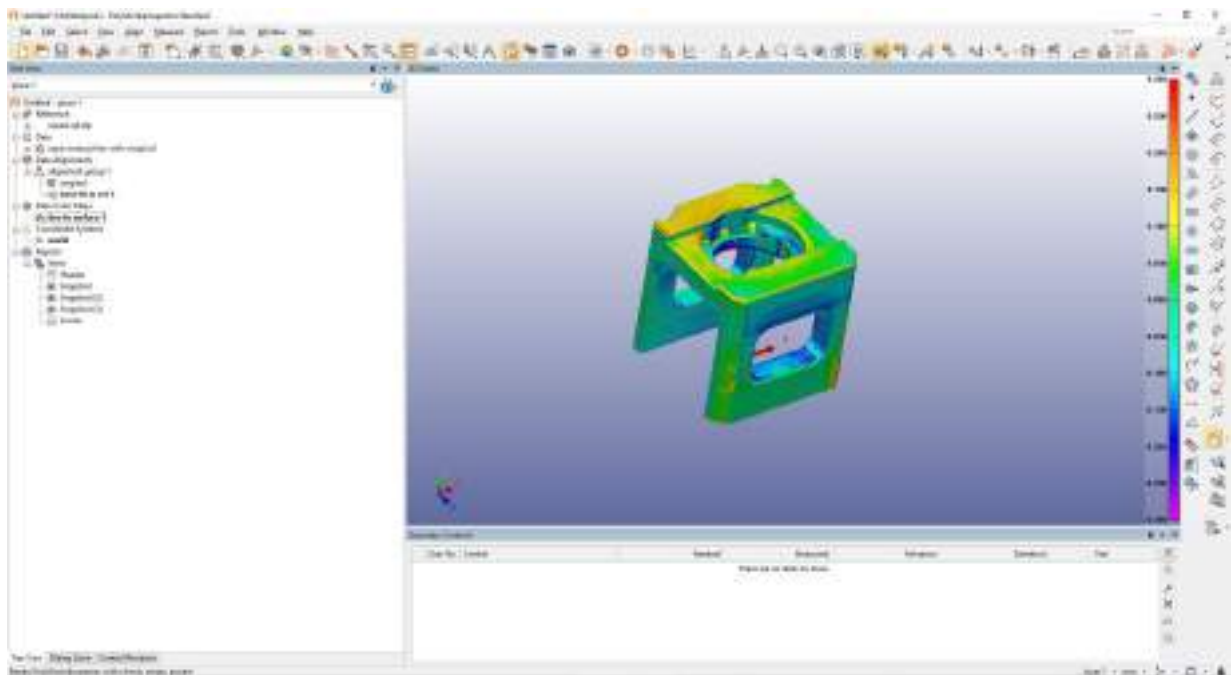
Ključne funkcionalnosti programa so:

- poroznostna analiza: na podlagi danih parametrov za preračun program sam zazna, meri in klasificira praznine v materialu;
- dimenzijska kontrola: sistem omogoča merjenje dolžin, kotov, premerov ter GD&T toleranc;
- analize debeline sten: omogoča preverjanje tankih sten in neenakomernosti v celotni geometriji;
- primerjava s 3D modeli: omogoča enostavno poravnavo rekonstruiranega modela na teoretični 3D model z barvnim prikazom odstopkov;
- analiza sestavov in hibridnih izdelkov: omogoča segmentacijo posameznih komponent ter izvedbo njihovih posameznih analiz, kot so analize poroznosti in dimenzij ter različne analize ob okvarah in reklamacijah;
- dodatni moduli za obratno inženirstvo, simulacijo deformacij, analizo kompozitov.

VGStudio Max se v kombinaciji s CT napravo predvsem uporablja v letalski in avtomobilski industriji, kjer je potrebna nedestruktivna metoda analiz in kontrole notranjih značilnosti izdelkov.

3.7 PolyWorks Inspector

PolyWorks Inspector je celovita merilno-analitska programska oprema, namenjena dimenzijski kontroli izdelkov s pomočjo različnih vrst merilnih naprav. Gre za vsesplošen merilni program, ki podpira širok spekter merilne opreme, od taktilnih KMS, 3D skenerjev, ročnih skenerjev do računalniške tomografije. Uporabniku nudi okolje za uvoz podatkov iz drugih merilnih naprav, poravnavo teh podatkov na 3D model in analizo teh podatkov z možnostjo kreiranja samodejnih merilnih poročil.



Slika 14: Programsko okolje PolyWorks

Vir: (Lastni vir)

Program omogoča:

- uvoz podatkov (3D modeli, datoteke IGES, DMIS, GOM ipd.);
- uvoz in obdelavo podatkov iz skenov (datoteke STL in IGES, oblaki točk ipd.);
- barvno vizualizacijo odstopanj izmerjenih podatkov od idealnega 3D modela v prerezih ali v celotnem pogledu;
- integracijo s KMS za programiranje in merjenje izdelkov;
- avtomatizacijo merilnih rutin in analiz;
- statistično kontrolo procesov (C_p , C_{pk} in kontrolne karte);

- samodejno generiranje 3D merilnih poročil, ki vključujejo dimenzijsko kontrolo, tabele, vizualne prikaze odstopkov;
- brezplačen pregled meritev in vizualnih prikazov v samem programu z naloženo brezplačno verzijo PolyWorks Reviewer, kar je uporabno za namene konstrukcije, tehnologije, orodjarne ipd.;
- možnost povezave vseh merilnih rutin v digitalno verigo DataLoop, ki omogoča arhiviranje v oblaku, sledljivost in analizo velikih količin podatkov.

Zaradi zmogljivosti in prilagodljivosti je PolyWorks industrijski standard v avtomobilski, letalski in orodjarski industriji ter eden ključnih delov sodobne kontrole kakovosti izdelkov.

3.8 Analiza merilnih sistemov – MSA

Kadar v proizvodnji uporabljamo meritve, na podlagi katerih bodo temeljile nadaljnje odločitve o ustreznosti izdelkov, je treba zagotoviti zanesljive meritve. Za namen vrednotenja merilnega sistema se uporablja analiza MSA. Namen te analize je ugotoviti, koliko variabilnosti in negotovosti merilni sistem vnaša v rezultate meritev, obenem pa tudi, ali je tak merilni sistem primeren za nadzor procesa. MSA oceni lastnosti merilnega sistema, kot so točnost, stabilnost in ponovljivost ter jih izrazi z numeričnimi kazalci.

3.8.1 Kazalci kakovosti merilnega sistema

V okviru analize merilnih sistemov ločimo več kazalcev kakovosti:

1. Stabilnost – pomeni, da merilni sistem ves čas ohranja enake lastnosti in ne kaže trendov ali sprememb v rezultatih pod istimi pogoji.
2. Pristranskost – predstavlja razliko med povprečjem meritev in referenčno vrednostjo. Označimo jo lahko kot sistematično napako merilnega sistema.
3. Linearnost – opisuje, ali je pristranskost enakomerna po celotnem merilnem območju. Če se pristranskost spreminja pri različnih vrednostih, pomeni, da sistem ni linearen in je merjenje zanesljivo le v določenem območju.

4. Ponovljivost in obnovljivost (Gage Repeatability & Reproducibility) – združuje ponovljivost in obnovljivost ter izraža, kolikšen delež skupne variacije meritev izhaja iz merilnega sistema. Rezultat pokaže, ali je sistem primeren za uporabo v procesu.

3.8.2 Grafični in numerični prikaz podatkov

Pri izvajanju MSA je pomembno, da poleg numeričnih podatkov vključimo tudi grafične prikaze, saj nam kombinacija obeh pomaga celovito razumeti delovanje merilnega sistema.

Numerični kazalci

Po izvedbi analize dobimo tabele s komponentami, ki pokažejo:

- skupno varianco meritev,
- variabilnost med posameznimi kosi,
- variabilnost zaradi merilnega sistema (ponovljivost in obnovljivost).

Grafični prikazi

Grafi nudijo jasen vpogled v to, kako se merilni sistem obnaša:

- X-bar in R diagrami: kontrolni diagrami, kjer lahko opazimo težavo v operaterju, npr. slaba ponovljivost. Idealno je, da razlike med ponovitvami meritev ostajajo znotraj kontrolnih mej.
- Graf po merjencu: prikaže vse meritve na enem merjencu in stabilnost sistema.
- Interakcijski graf: kaže, ali imajo operaterji različne pristope k merjenju določenih merjencev.
- Diagram komponent variacije: stolpčni graf, ki pokaže variacije (merjenec, operater, instrument).
- Graf po operaterju: prikaže, kako operater meri. Sistematične razlike med operaterji kažejo na težave z obnovljivostjo meritev.

Prikaz pristranskosti in linearnosti

Pristranskost vizualiziramo s histogramom odstopanj ali intervalom zaupanja za povprečje. Je statistično značilna, če interval ne vključuje ničle.

Linearnost prikažemo z grafom vrednosti proti izmerjeni pristranskosti. Regresijska premica pokaže, ali pristranskost ostaja konstantna ali pa se spreminja z območjem.

Prikaz stabilnosti

Stabilnost skozi čas pokažemo z XmR kontrolnim diagramom, kjer opazujemo meritve referenčnega kosa skozi daljše časovno obdobje. Nestabilnost merilnega sistema se kaže s pojavi trendov, odstopanj in premikov.

3.9 Minitab

Minitab je zmogljiva programska oprema za statistično analizo podatkov, posebej zasnovna za analizo kakovosti, izboljševanje procesov ter razvoj, raziskave in odločanje na podlagi podatkov. Program omogoča izvedbo številnih statističnih analiz – od osnovne deskriptivne statistike do naprednega modeliranja, kot so analize časovnih vrst, regresije in načrtovanje poskusov. Še posebej je uporaben pri nadzoru kakovosti in merilnih sistemov, saj vključuje orodja za analize merilnih sistemov in analize sposobnosti procesov. Poleg tega omogoča napredno vizualizacijo podatkov s kontrolnimi diagrami, histogrami, interakcijskimi grafi ter analizo z več spremenljivkami.

3.10 Vpenjalne priprave v meroslovju

3.10.1 Pomen vpenjalnih priprav

Natančno, stabilno in ponovljivo vpenjanje merjencev ima ključen pomen pred izvedbo meritev. Ne glede na to, ali gre za kontaktno ali brezkontaktno merjenje, je pravilno vpetje eden najpomembnejših dejavnikov, ki vplivajo na kakovost meritev. Slabo ali neustrezno vpetje merjenca lahko vpliva na položaj kosa, obenem pa povzroča vibracije med merjenjem ali celo mehanske deformacije.

3.10.2 Tehnike vpenjanja merjencev

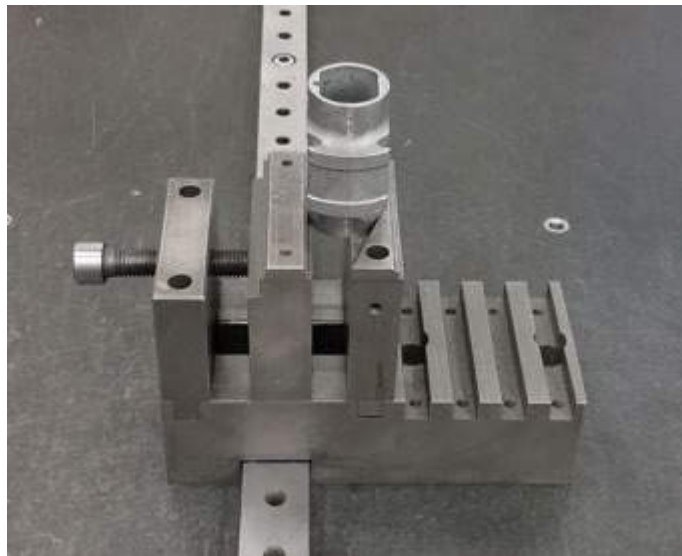
Izbira tehnike vpenjanja je odvisna od oblike, materiala, teže in občutljivosti merjenca. Pogostejše oblike vpenjanja so:

- Mehansko: za ta način vpenjanja se uporabljajo vijaki, zatiči, zagozde, objemke, razna vzvodna vpenjala ipd. Prednost je stabilno vpetje, slabost pa morebitne deformacije merjenca zaradi prevelikih sil.
- Magnetno: omogoča enostavno in hitro vpetje merjencev iz feromagnetnih materialov brez mehanskega pritiska.
- Lepljenje: primerno predvsem za manjše število lažjih in manjših nestandardnih merjencev.
- Vakuumsko: uporablja se za pritrditev ravnih in občutljivih merjencev. Ne povzroča mehanskih napetosti, vendar zahteva neporozen material merjenca in dober stik s podlago.
- Modularne priprave: omogočajo specifično prilagojeno vpenjanje z uporabo standardnih elementov. Idealne so za KMS in serijsko merjenje, saj omogočajo hitro in natančno pozicioniranje merjencev.

4 KONSTRUIRANJE VPENJALNE PRIPRAVE

4.1 *Obstoječe stanje merilnega programa in vpenjanja izdelka*

Trenutno se postopek merjenja izvaja na posameznih livarskih kosih, ki jih merimo z uporabo merilnega programa. Vsak kos je treba ročno vpeti v primež, ki je nameščen na letvi KMS. Pri tem je potrebna natančna pozornost pri pozicioniranju izdelka, saj merilni program predvideva točno določeno orientacijo merjenja. Izdelek se poravna s pomočjo vodne vage, ki jo položimo na zgornjo ravnino merjenja, ter po oseh x (pravokotno na letev) in y (vzdolž letve) KMS glede na granitno mizo.



Slika 15: Vpet izdelek v primežu

Vir: (Lastni vir)

Ker so izdelki iz 12-gnezdnega livarskega orodja, je za potrebe procesne kontrole treba preveriti skladnost dimenzij za vseh 12 izdelkov. Zaradi trenutnega sistema merjenja je po vsaki meritvi treba izdelek izpeti, vpeti novega in ponovno zagnati merilni program. Merilni program skupaj z vpenjanjem traja dobrih 8 minut na kos, kar na koncu za meritve 12 izdelkov nanese več kot uro in pol. Glavne težave obstoječega vpenjanja predstavljajo:

- predolg čas vpenjanja posameznega izdelka: ročno vpenjanje v primež zaradi zahteve po natančnem vpetju traja dalj časa;
- nenatančno in neponovljivo vpetje: zaradi odsotnosti pozicionirnih elementov obstaja možnost odstopanj v poziciji merjencev med posameznimi meritvami;

- napake zaradi krivega vpetja: rezultati meritev so odvisni od pravilnega vpetja;
- odvisnost od kontrolorja, ki meri izdelke: operater lahko vpliva na same rezultate meritev z nenatančnim vpenjanjem;
- zasedenost merilne opreme: glede na dolžino merilnega programa in potrebe po 12-kratnih meritvah, je KMS zaseden dalj časa, kar zmanjšuje pretočnost in produktivnost.

4.2 Predstavitev zahtev

Za izboljšanje natančnosti, ponovljivosti in učinkovitosti merilnega postopka je treba zasnovati namensko vpenjalno pripravo, ki bo ustrezala potrebam za procesno kontrolo. Nova vpenjalna priprava mora izpolnjevati naslednje pogoje:

1. Dvanajst vpenjalnih mest

Priprava mora omogočati vpetje vseh 12 izdelkov iz enega cikla litja na enakovrednih vpenjalnih mestih. Vsako od teh mest mora ustrezati geometriji izdelka in omogočati stabilno vpetje merjenja.

2. Natančno in ponovljivo vpetje merjencev

Priprava mora poleg stabilnega vpetja omogočati natančno pozicioniranje in ponovljivo vpetje v točno določen položaj, ki se sklada z merilnim programom. Vsako vpenjalno mesto mora zagotavljati ponovljivost vpetja merjenja z minimalnimi odstopanji, ki pa ne sme biti odvisno od vrstnega reda vpenjanja ali operaterja.

3. Možnost hitrega vpetja merjencev

S čim bolj enostavnim mehanizmom je treba zagotoviti možnost hitrega vpenjanja merjencev in tako zmanjšati čas priprave izdelkov za merjenje. Nekatere od enostavnejših možnosti izvedbe predstavljajo ročne preklopne sponke ali vzmetni elementi.

4. Ustrezna sila vpetja merjencev

Vsako vpenjalno mesto mora zagotavljati zadostno vpenjalno silo za pritrditev merjencev, da med merjenjem ostanejo na istem mestu brez premikov ali vibracij. Sile vpetja ne smejo biti prevelike, saj lahko povzročijo morebitne deformacije izdelkov.

5. Omogoča dovolj prostora za dostop merilnih tipal

Geometrija vpenjalne priprave mora biti zasnovana tako, da zagotavlja neoviran dostop merilnih tipal do vseh površin, ki so potrebne za izvedbo meritev. Poleg tega mora biti zagotovljen dovolj velik prostor za dostop s tipali med samimi vpenjalnimi mesti.

6. Omogoča avtomatizirano merjenje

Vpenjalna priprava mora biti zasnovana z mislijo na avtomatizacijo merilnega procesa. Prilagojena mora biti tako, da omogoča merjenje vseh 12 izdelkov brez potrebe vmesnega izpenjanja in vpenjanja ali kakršnega koli ročnega premikanja izdelkov ali vpenjalne priprave.

7. Minimalna možnost vpliva operaterja

Geometrija vpenjalne priprave mora biti zasnovana z namenom preprečitve večjih napak operaterja pri vpetju merjencev. Priporočljivo je dodati mehanske prepreke ali zasnovati geometrijo vpenjalnega mesta tako, da se preprečita napačna rotacija in lega izdelka v pripravi.

4.3 3D modeliranje

4.3.1 Izdelava osnovnih modelov

V nadaljevanju so opisani postopki modeliranja osnovnih treh komponent vpenjalne priprave, ki so bili zasnovani z uporabo programskega okolja Creo. Geometrija posamezne komponente je prilagojena funkcionalnim zahtevam.

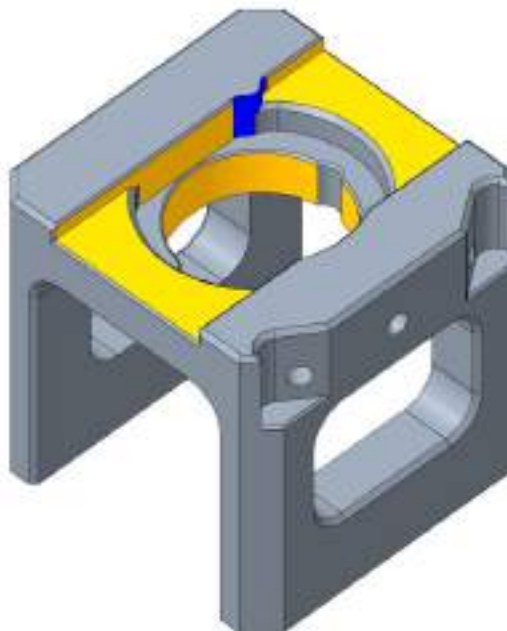
1. Nased

Glavna funkcija naseda je natančno pozicioniranje in fiksiranje merjenca v merilno pripravo ter omejitev njegove rotacije med meritvijo. V ta namen smo zasnovali:

- notranjo cilindrično odprtino, ki bo namenjena centriranju merjenca v nased in bo omogočala ponovljivo pozicioniranje med posameznimi vpetji (Slika 16);
- stransko ravnino ob cilindrični odprtini, ki bo služila kot zaklep rotacije merjenca po smeri x med procesom meritev – s tem bomo preprečili, da bi zaradi zasuka merjenca med

meritvijo prišlo do morebitnih napak, hkrati pa onemogočili, da bi operater napačno orientiral merjenec (Slika 16);

- poleg ravnine za zaklep rotacije smo dodali geometrijo (označeno z modro na sliki 16), ki operaterju preprečuje zasuk še v smeri x za 180° ter hkrati v primeru napačnega vpetja preprečuje merjencu, da bi se lepo namestil v nased do spodnje naležne površine;
- luknje z navoji za namestitev vzmetnih navojnih zatičev s kroglico. Ti bodo omogočili hitro in zanesljivo pritrditev merjenca brez potrebe po dodatnem orodju ter hkrati zagotovili ponovljivo vpenjanje;
- strukturne prilagoditve:
 - o zaradi večje izpraznitve na spodnjem delu naseda za dostop s tipali je bilo treba zaradi zagotavljanja stabilnosti prilagoditi debeline sten;
 - o zaradi potrebe po odpornosti proti obrabi delov, ki so v stiku z merjencem, smo v ta namen izbrali material jeklo;
 - o v mislih smo imeli tudi optimizacijo teže celotne vpenjalne naprave, zato so bile dodane izpraznitve za dodatno zmanjšanje teže.



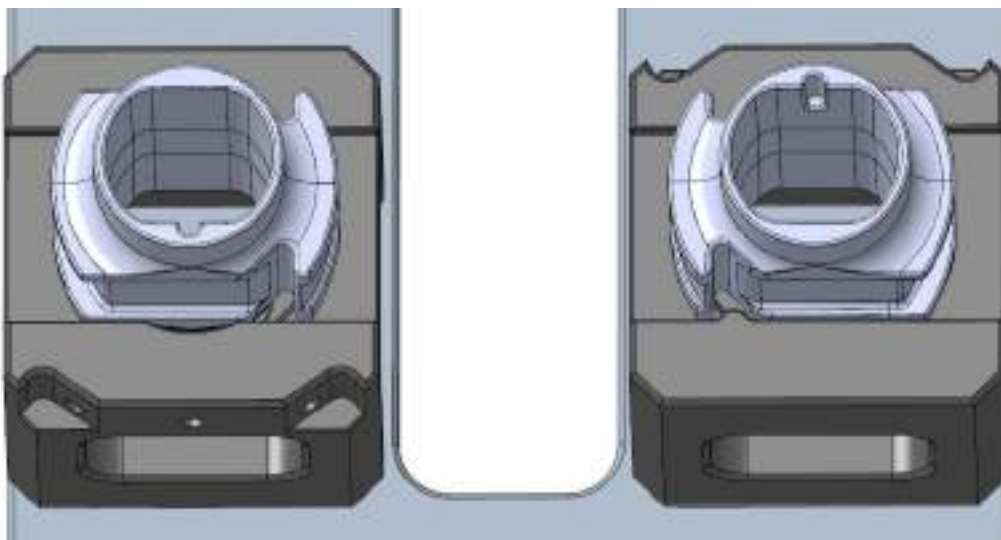
Slika 16: Pomembne površine za vpetje

Vir: (Lastni vir)

2. Plošča

Plošča predstavlja osnovo celotne merilne priprave, na katero bodo pritrjeni nasedi za vpenjanje merjencev ter ročke za prenos priprave na zgornjem delu in podložne noge na spodnjem. Ključne konstrukcijske značilnosti predstavljajo:

- Material – plošča bo izdelana iz aluminija, saj ta zagotavlja razmeroma dobro togost in nizko težo, hkrati pa je primeren za natančno obdelavo. Debelino plošče smo prilagodili pogojem CNC obdelave.
- Optimizacija teže – za zmanjšanje teže plošče in posledično celotne vpenjalne priprave smo dodali izpraznitve na delih, ki ne bodo pomembno vplivali na pogoje CNC obdelave in končno funkcionalnost.
- Način pritrditve nasedov – za namestitev vsakega naseda smo zasnovali po dve luknji $\varnothing 4H7$ za pozicioniranje z zatiči ter štiri luknje za pritrditev z vijaki M4.
- Razporeditev vpenjalnih mest – na plošči smo zasnovali dvoredno razporeditev vpenjalnih mest, pri vsakem po 6. Prilagojena so usmeritvi po osi y na KMS zaradi daljšega merilnega območja.
- Zasuk izvrtin za namestitev nasedov – v fazi zasnove je bil izveden zasuk desnega reda vpenjalnih mest za 180° , da bi zagotovili možnost dostopa s tipalom z desne strani. Merjenec ima namreč asimetrično geometrijo, pri čemer njegov širši del zahteva drugačno orientacijo.
- Ergonomski dodatki in funkcionalne izboljšave:
 - o Na delih s krajšimi stranicami plošče smo dodali navoje za montažo plastičnih ročajev, kar bo omogočalo lažji prenos celotne vpenjalne priprave.
 - o Na spodnjo stran plošče smo dodali navoje za montažo podložnih nog, s čimer se bomo izognili nestabilni namestitvi na granitno mizo.
 - o Na zgornji strani plošče smo dodali oznake vpenjalnih mest, napis in kodo vpenjalne priprave oziroma izdelka.



Slika 17: Prikaz zasuka vpenjalnih mest za lažji dostop s tipali

Vir: (Lastni vir)

3. Podložne noge

Predstavljena komponenta je podložna noga, ki služi kot stični element med aluminijasto osnovno ploščo in granitno mizo KMS. Noga je zasnovana z mislijo na stabilnost ter zaščito plošče in podlage. Zasnova vsebuje naslednje:

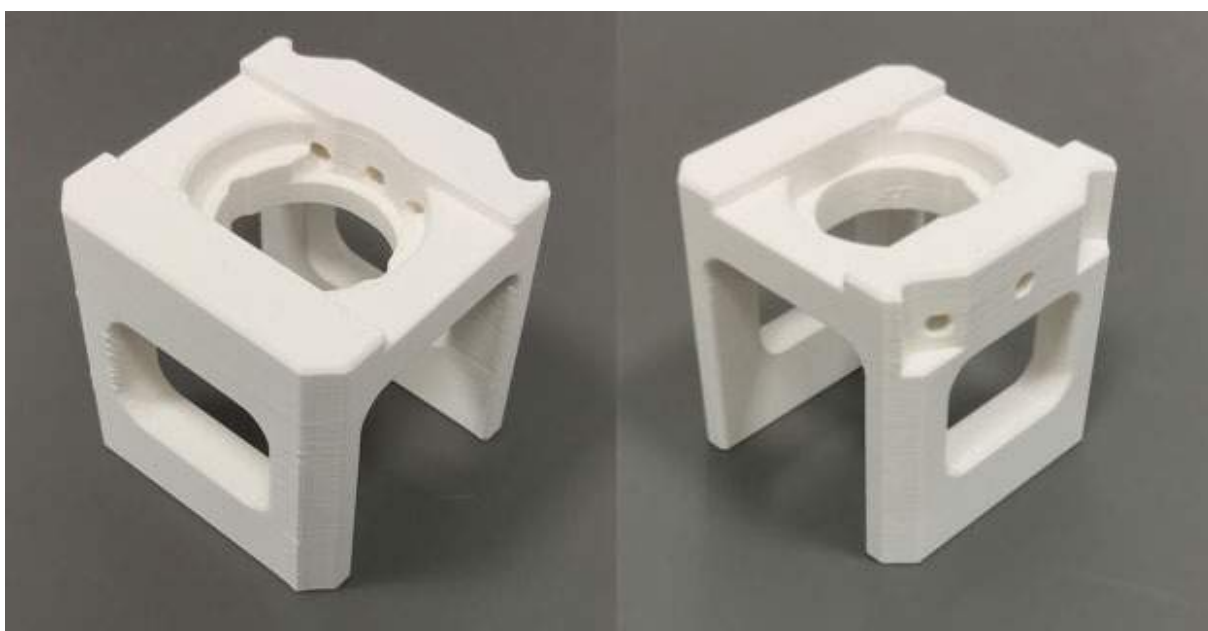
- Izbira materiala – izbrali smo plastiko, saj ta material zagotavlja zadostno obstojnost proti obrabi za funkcijo, ki jo bodo opravljale podložne noge. Poleg tega je ta material že sam po sebi odporen proti koroziji. Plastične podložne noge bodo tudi zmanjšale tveganje za morebitne poškodbe spodnjega dela aluminijaste plošče in granitne mize, obenem pa omogočajo hitro zamenjavo.
- Geometrijske značilnosti – dovolj velik zunanji premer nam omogoča stabilno namestitev v ploščo, izvrtina s poglobitvijo pa privijačenje z vijaki.
- Dimenzija in toleranca višine – višina podložnih nog je definirana z dimenzijo in toleranco, kar zagotavlja dovolj natančno lego celotne vpenjalne priprave. V primeru neenakomerne lege podložnih nog na granitno mizo KMS je možna hitra prilagoditev zaradi izbranega materiala.

Poleg osnovnih funkcij bodo podložne noge zagotavljale ravno in stabilno lego vpenjalne priprave, četudi bo aluminijasta plošča rahlo ukrivljena zaradi napetosti po CNC obdelavi. K temu bo pripomogla manjša naležna površina podložnih nog.

4.3.2 Prototip plastičnega 3D modela naseda

Pred izdelavo vpenjalne priprave smo se odločili preveriti funkcionalnost zasnovanega modela naseda ter možnost izboljšav ali pa morebitnih korekcij na podlagi printanega 3D modela. Glavni razlog je bil zmanjšanje tveganja za konstrukcijske napake, ki bi v poznejši fazi testiranj lahko privedle do nepotrebnih korekcij, posledično pa tudi dodatnih stroškov obdelave.

S printanjem plastičnega prototipa (Slika 18) smo prihranili tudi čas, saj nam je ta omogočil testiranje pomanjkljivosti že pred samo izdelavo jeklenih nasedov, kar nam je omogočilo učinkovitejše nadaljevanje razvojnega procesa.



Slika 18: Prototip naseda

Vir: (Lastni vir)

4.3.3 Korekcija modela na podlagi ugotovitev

Za namen preverjanja funkcionalnosti naseda smo izvedli postopek, ki je vključeval CT skeniranje 3D printanega prototipa, rekonstrukcijo modela iz surovih podatkov v VGStudio Max ter vizualno analizo odstopkov od idealnega 3D modela v programskem okolju PolyWorks.

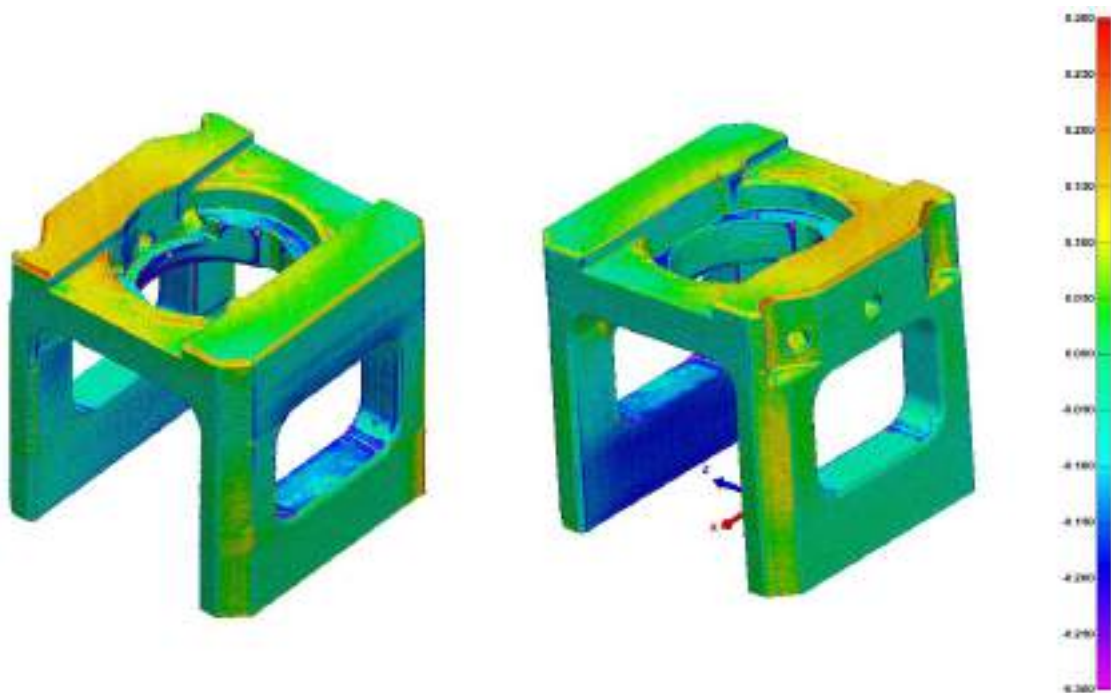
Pred začetkom skeniranja v CT smo bili pozorni na pravilno nastavitve parametrov v programu Metrotom OS za čim kakovostnejši sken.

Uporabljeni so bili naslednji pomembnejši parametri skeniranja:

- način skeniranja Vast CT: med zajemom podatkov samodejno vrtil rotacijsko mizo z nameščenim merjencem, hkrati pa zajema podatke površine merjenca;
- napetost: 140 kW;
- električni tok: 517 μ A;
- filter: aluminij debeline 2 mm, ki zmanjša anomalije in s tem pripomore k boljši kakovosti končnega skena;
- oddaljenost merjenca po osi x od rentgenske cevi: 350 mm;
- čas integracije: 1000 ms; ta ustreza času osvetlitve analognih kamer (pri večanju časa integracije se za merjenje slik uporabi več fotonov, saj se tako izboljša slikovni signal brez zamegljenosti);
- »gain«: 8-kratni faktor ojačanja fotodiode, ki vpliva na slikovni signal in zamegljenost slik (večji je faktor, svetlejša bo slika, poleg tega pa bo več šuma);
- resolucija: 2048×2048 px;
- število posnetkov: 2050;
- voksel: 53,02 μ m.

Po izvedbi skeniranja in samodejni rekonstrukciji podatkov, ki jo je izvedel Metrotom OS, smo podatke uvozili v programsko okolje VGStudio Max, kjer smo začeli z njihovo obdelavo. Najprej smo določili površino skeniranega modela na podlagi kontrastov, nato pa zapolnili praznine v notranjosti modela. Na koncu je sledil še izvoz modela v datoteko STL.

V programsko okolje PolyWorks Inspect smo uvozili 3D model in datoteko STL skeniranega prototipa ter ju s funkcijo »best-fit« poravnali med seboj. Na sliki 19 so prikazana odstopanja skeniranega prototipa od zasnovane idealne geometrije.



Slika 19: Deviacijska slika 3D print kosa

Vir: (Lastni vir)

Po pregledu in testu naseda z vstavljanjem izdelkov iz proizvodnje smo ugotovili, da ima trenuten 3D model nekaj pomanjkljivosti. Na podlagi ugotovitev so bile narejene naslednje korekcije:

- Dodane so bile izpraznitve na delih, kjer bi srh na delilni površini merjenca (Slika 20 – označeno z oranžno) lahko vplival na lego samega izdelka v nasedu.
- Zaradi prisotnosti srha na merjencu na delu z izmetačem (Slika 20 – označeno z rdečo) je bilo ob testu vstavljanje oteženo, zato je bila temu delu dodana dodatna izpraznitev za lažje vstavljanje.



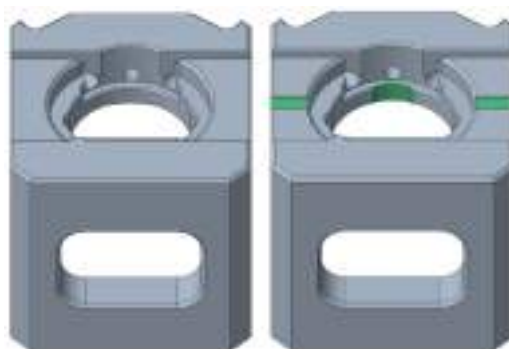
Slika 20: Prikaz delov delilne površine in odtisa izmetača s srhom

Vir: (Lastni vir)

- Prilagojen je bil diameter notranje pozicijske luknje na podlagi dejanskih dimenzij izdelkov, saj je prvotna izvedba povzročala pretesno prileganje merjenja.
- Povečan je bil odmik ravnine za zaklep rotacije merjenja, da bi se zaradi morebitnega nihanja širine izdelkov med proizvodnim procesom preprečila nezmožnost vpetja merjenja v nased.

4.3.4 Končni 3D model naseda

Na sliki 21 sta prikazana prototipni 3D model, ki je bil zasnovan na podlagi konstrukcijskih zahtev in predvidenih vpenjalnih pogojev, ter končni optimizirani model naseda po izvedenih korekcijah.



Slika 21: Primerjava prototipnega in končnega modela

Vir: (Lastni vir)

4.3.5 Izdelava risb in kosovnice

V tej fazi projekta smo pripravili celotno tehnično dokumentacijo, ki vključuje podrobne tehnične risbe vseh posameznih komponent (Priloge 1, 2 in 3) ter kosovnico (Priloga 4) za prikaz sestava celotne vpenjalne priprave. Poseben poudarek smo namenili tolerančnim zahtevam na delih komponent, ki neposredno vplivajo na funkcionalnost in zanesljivost vpenjanja merjencev.

Pri izdelavi tehničnih risb smo dimenzije in tolerance prilagodili glede na funkcijo posameznih elementov.

1. Nased

Na podlagi realnih vrednosti dimenzij izdelkov smo določili nominalno vrednost in tolerančno zahtevo za notranjo cilindrično luknjo $\varnothing 30,6^{+0,1}$, ki bo ključna pri pozicioniranju merjenca ter ponovljivem vpetju. Zagotoviti je bilo treba natančno pozicioniranje nasedov v aluminijasto ploščo, zato smo v ta namen določili luknje $\varnothing 4H7$ za zatiče in medsebojni toleranci razdalj lukenj za zatiče $5^{\pm 0,01}$ ter $50^{\pm 0,01}$. Pomembno vlogo smo pripisali tudi dimenziji $15,7^{+0,2}$, saj ta označuje oddaljenost ravnine za zaklep rotacije od pozicionirne cilindrične luknje. Kot dodatno smo na risbi definirali bruniranje kot površinsko obdelavo. Izognili smo se ostrim tolerancam hrapavosti površin, saj za funkcionalnost vpenjanja niso potrebne, poleg tega pa vplivajo še na ceno izdelave.

2. Plošča

Pomembnejši elementi tehnične risbe osnovne plošče so jasno definirane pozicije posameznih sklopov izvrtin $\varnothing 4H7$ za pozicioniranje nasedov in razdalj med njimi. Preostale dimenzije smo definirali kot proste, saj ne vplivajo na funkcionalnost komponente. Dodali smo tudi oznake vpenjalnih mest, napis in kodo izdelka na zgornji strani plošče. Predvsem oznake vpenjalnih mest bodo prišle v poštev pri programiranju merilne rutine in kreiranju navodil vpetij merjencev za operaterje. Dodatno smo definirali še površinsko obdelavo – eloksacijo.

3. Podložna noga

Ta komponenta vpenjalne priprave je enostavna in nezahtevna za izdelavo, saj je pomembna le celotna višina. V ta namen smo določili dimenzijo $20^{\pm 0,1}$, ki pa se pozneje zaradi morebitne krivosti osnovne plošče lahko tudi prilagodi. Preostale dimenzije na tej risbi so proste, saj ne igrajo pomembnejše vloge.

4. Kosovnica

Izdelana kosovnica v prilogi 4 jasno prikazuje celoten sestav vpenjalne priprave z vsemi vključenimi elementi skupaj z natančno količino potrebnih kosov, ki pa so definirani in opisani tudi v podani tabeli. Iz označenih balončkov in števil v tabeli je razvidno, kateri elementi pripadajo opisu. V opombe smo dodali tudi opise materialov za posamezne elemente ter druge značilnosti za jasnejšo in lažjo predstavo. Preostali standardni elementi (zatiči, vzmetni navojni zatiči, vijaki in plastični ročaji) pa so označeni s kodo in specifikacijo.

4.4 Izdelava vpenjalne priprave

4.4.1 Tehnologija obdelave

Geometrija tako aluminijaste plošče kot tudi jeklenega naseda priprave je zasnovana za obdelavo iz polnega materiala, pri čemer se z odvzemanjem materiala oblikujejo potrebne naležne površine, izpraznitve in druge geometrijske značilnosti. Sestavna dela vpenjalne priprave sta oblikovana tako, da omogočata izvedbo več zaporednih operacij obdelave s čim manj prepenjanj obdelovanca.

Plošča in nased vpenjalne priprave sta torej v celoti zasnovana in prilagojena obdelavi s 3- ali 4-osno CNC tehnologijo, kar omogoča natančno in stroškovno učinkovito proizvodnjo ter fleksibilnost pri morebitnih poznejših prilagoditvah. S tem se zagotavlja, da bo priprava obstojna, funkcionalna in primerna za uporabo v merilnem okolju za daljše časovno obdobje.

Pri zasnovi je upoštevano tudi naslednje:

- možnost izvedbe obdelave s standardnimi obdelovalnimi postopki, kot so rezkanje, vrtanje, povrtavanje, vrezovanje navojev, posnemanje robov;
- minimalna uporaba posebnih orodij pri obdelavi, kar omogoča cenejšo izvedbo;
- možnost menjave posameznih nasedov vpenjalne priprave, če pride do poškodbe, obrabe ali nefunkcionalnosti;
- tolerančne zahteve, podane na risbi, so prilagojene tako, da omogočajo stroškovno učinkovito obdelavo brez žrtvovanja funkcionalnosti. Tesne tolerance so uporabljene le na nujnih mestih, kot so pozicijske površine in naležne točke, ki morajo zagotavljati ponovljivo vpetje.

4.4.2 Površinska obdelava vpenjalne priprave

Za zagotovitev zaščite pred korozijo in estetskega videza bo površinska obdelava posameznih komponent prilagojena materialu ter funkcionalnim zahtevam.

Plošča – aluminij

Nosilna plošča, kjer bodo privijačeni in pozicionirani nasedi, bo izdelana iz aluminija, zaradi česar je primerna za eloksacijo. Ta postopek bo izboljšal odpornost izdelka proti obrabi in koroziji, hkrati pa zagotavljal lepši videz. Površino bo po eloksaciji tudi lažje očistiti in bo zato manj občutljiva na mehanske sledi.

Nased – jeklo 1.2312

Nasedi za vpetje merjencev bodo izdelani iz jekla, saj bodo zaradi pogoste uporabe v stiku z merjenci. Z izbiro jekla 1.2312 se bo v primerjavi z aluminijem znatno izboljšala odpornost proti obrabi, predvsem na notranjih delih naležnih površin. Poleg tega je za vse nasede predvidena površinska obdelava z bruniranjem. Ta sloj površinske obdelave ne bo pomembno vplival na dimenzije izdelka, kar je ključno za pozicionirne površine, hkrati pa bo zagotavljal odpornost proti koroziji.

Podložne noge – plastika

Podložne noge bodo izdelane iz plastičnega materiala, ki je sam po sebi odporen proti koroziji, zato površinska obdelava ni potrebna. Zaradi svoje funkcije ti elementi niso izpostavljeni dodatnim obremenitvam, hkrati pa so v primeru obrabe ali poškodbe hitro zamenljivi.

4.5 Test vpenjalnega naseda

V sklopu razvoja in na podlagi preizkusa prototipnega 3D modela, ki smo ga, z izjemo nekaj potrebnih izboljšav, označili kot uspešnega, smo presodili, da je končni model z dodanimi popravki pripravljen za izdelavo v jekleni obliki.

Po izdelavi jeklenih nasedov smo izvedli ponoven preizkus vpenjanja merjencev, tokrat z nameščenimi vzmetnimi navojnimi zatiči v za to predvidenih izvrtinah z navoji. Test je pokazal, da je postopek vpenjanja merjenca enostaven in hiter, obenem pa omogoča natančno pozicioniranje v nasedu. Sile stiska vzmetnih zatičev so se izkazale za dovolj velike, da merjenec čvrsto in zanesljivo držijo na zahtevani poziciji.

Na podlagi izvedenih testov smo ugotovili, da so nasedi ustrezno zasnovani in izdelani za svoj namen, zato jih je mogoče brez dodatnih prilagoditev uporabiti za meritve v procesni kontroli.

4.6 Druga hipoteza

Na podlagi testa vpenjanja merjencev v jeklen nased lahko hipotezo **potrdimo**. Izdelava prototipa nam je omogočila zgodnje preverjanje funkcionalnosti vpenjanja, zato smo odkrili pomanjkljivosti, ki smo jih odpravili še pred izdelavo dejanskih kosov.

Z uporabo izdelanega jeklenega naseda smo potrdili trditev, da je konstrukcija ustrezno zasnovana, saj omogoča hitro, natančno in ponovljivo vpenjanje merjencev. To neposredno prispeva k manjši variabilnosti in pospešitvi procesa vpenjanja, saj se bodo operaterji soočali z manj težavami.

5 IZDELAVA MERILNEGA PROGRAMA

5.1 *Izbira tipal*

Pri delu s KMS je pravilna izbira tipala ključnega pomena za doseg kakovostnih in ponovljivih merilnih rezultatov. Tipalo je neposredni stik med KMS in merjencem, zato mora biti prilagojeno obliki in vrsti merjenca, ki ga želimo meriti, v nasprotnem primeru lahko pride do napak pri dotiku merjenca in posledično slabih rezultatov meritev.

Vrste tipal, ki se uporabljajo na KMS:

1. Kroglična tipala

So najbolj razširjena oblika tipal, ki so primerna za večino meritev. Na koncu stebra je lahko kroglica iz različnih materialov, najpogosteje uporabljene velikosti teh kroglic pa so od 0,3 do 8 mm. Prednost teh tipal je v vsestranski uporabnosti in natančnosti, slabost pa pri omejeni dolžini stebel in občutljivosti na poškodbe, predvsem pri manjših kroglicah, saj je steblo tipala tanjše in lahko ob trku pride do zloma.

2. Diskasta tipala

To so tipala v obliki diska, zaradi česar so primerna za merjenje notranjih in zunanjih utorov, podrezanih površin in težje dostopnih mest, kjer kroglična tipala ne pridejo v poštev. Zaradi svoje oblike niso primerna za merjenje kompleksnejših površin.

3. Valjasta tipala

Tipala, kjer je merilna površina namesto kroglice valj, se uporabljajo za merjenje dimenzij, ki jih z drugimi tipi tipal težko dosežemo in natančno izmerimo. So manj vsestranska in se uporabljajo za meritve specifičnih dimenzij izdelkov, npr. globoki utori in reže ter dimenzije na ostrih robovih, kjer bi s krogličnim tipalom težko zagotovili natančen dotik na najvišjem delu robu.

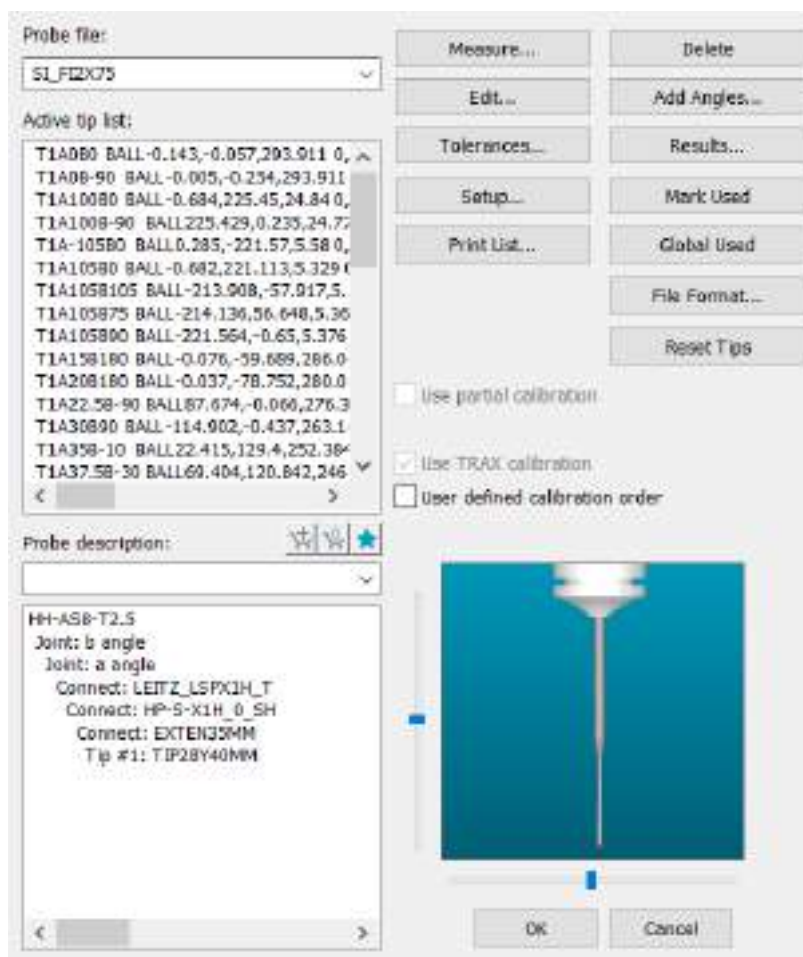
4. Križna tipala

Križna tipala so sestavljena iz več različnih ali istih tipal, ki so različno usmerjena. Te konfiguracije omogočajo dostop do težko merljivih površin brez menjave tipala in se lahko uporabljajo tudi pri enostavnejših meritvah. Zmanjšujejo potrebo po rotaciji merjenca in skrajšajo čas merjenja pri kompleksnejših merilnih rutinah. Slabost teh tipal je velikost, saj je zaradi tega znatnejša možnost trka in poškodbe nameščenih tipal.

5. Nastavljiva tipala

Nastavljiva tipala so modularna in omogočajo popolno prilagoditev dolžine stebela, kota ter položaja merilne kroglice za potrebe meritev. Uporabna so pri merjenju zahtevnih izdelkov z omejenimi dostopi in zmanjšujejo potrebo po večjem številu različnih tipal. Slabosti teh tipal se odražajo v dolgotrajnejšem nastavljanju in kalibraciji tipal, pri čemer dodatno vsaka vmesna povezava poslabša natančnost.

Za izvedbo meritev v tem projektu smo izbrali tipalo z rubinovo kroglico $\varnothing 2 \times 40$ mm, debelino stebela tipala $\varnothing 1,5$ mm ter celotno dolžino tipala 75 mm. Uporabili smo konfiguracijo tipala, ki je bilo že sestavljeno in se uporablja na KMS v procesni kontroli, zato ni bilo potrebnih dodatnih prilagoditev. Izbrano tipalo je dovolj robustno za natančne meritve vseh zahtevanih dimenzij, poleg tega pa omogoča dostop do vseh površin, potrebnih za meritve.



Slika 22: Konfiguracija izbranega tipala

Vir: (Lastni vir)

5.2 *Poravnava merjenja*

1. Načini poravnave

a. Ročna (Manual) poravnava z geometrijskimi elementi brez 3D modela

Pri meritvah izdelkov brez 3D modela se največkrat uporablja ročna poravnava, kjer se koordinatni sistem merjenja določi na podlagi izmerjenih geometrijskih elementov. Programer določi geometrijske elemente in jih s pomočjo krmilnika na KMS potipa na merjencu, nato pa jih uporabi za poravnavo. Program te elemente uporabi za izračun položaja in orientacije merjenja glede na osnovne koordinate KMS.

Tak način poravnave je primeren za enostavnejše izdelke z manj dimenzijami, kjer nimamo možnosti uporabe 3D modela in kjer ni prisotnih zahtevnejših GD&T dimenzij. Prednost sta preprostost in prilagodljivost, saj ni treba programirati kompleksnejših merilnih rutin, slabost pa v tem, da je ta metoda počasnejša ter manj ponovljiva kot avtomatizirane poravnave, saj sta natančnost in lokacija tipanja elementov za poravnavo na koncu odvisni od operaterja.

b. Ročna (Manual) poravnava z geometrijskimi elementi s 3D modelom

Ročna poravnava z uporabo 3D modela poteka podobno kot ročna poravnava brez 3D modela – programer na KMS ročno, s pomočjo krmilnika, potipa elemente na merjencu in jih uporabi za poravnavo, pri čemer so ti elementi povezani s 3D modelom, ki ga prej uvozi v program. Po izvedeni poravnavi lahko programer na podlagi površin 3D modela enostavno kreira elemente in jih poljubno prilagaja. To omogoča programiranje zahtevnejših GD&T dimenzij in uporabo preostalih naprednih funkcij.

c. Samodejna (DCC) poravnava z geometrijskimi elementi s 3D modelom

Samodejna poravnava v načinu DCC omogoča, da KMS samodejno izvede vse potrebne premike tipal in meritve osnovnih elementov za poravnavo na uvožen 3D model. Ta način programiranja se lahko izvede neposredno na stroju ali »offline«, kjer ni potrebna uporaba KMS.

Programer vnaprej določi elemente na 3D modelu, ki bodo uporabljeni za poravnavo, ter pripravi merilno rutino. Pred začetkom meritve ima operater nalogo, da pravilno namesti merjenec in tipalo v začetno točko v skladu z navodili. Nato program samodejno izvede

meritve izbranih elementov, jih poveže s površinami na 3D modelu ter izračuna poravnavo koordinatnega sistema.

Ta način poravnav je ključnega pomena pri merjenju več merjencev v zaporedju, saj zagotavlja hitro, ponovljivo in brezhibno izvedbo celotnega procesa brez prekinitev. Tako kot pri ročni poravnavi s 3D modelom je tudi tukaj mogoče uporabljati vse napredne funkcije programske opreme.

2. Prostostne stopnje in njihov pomen

V tridimenzionalnem prostoru lahko merjenec zavzame različne položaje in orientacije, kar opisujemo s šestimi prostostnimi stopnjami (angl. Degrees of Freedom). Namen poravnave je zakleniti vse prostostne stopnje, da pravilno pozicioniramo merjenec v koordinatni sistem KMS.

Prostostne stopnje:

- translacija (premik) po osi x ,
- translacija (premik) po osi y ,
- translacija (premik) po osi z ,
- rotacija okoli osi x ,
- rotacija okoli osi y ,
- rotacija okoli osi z .

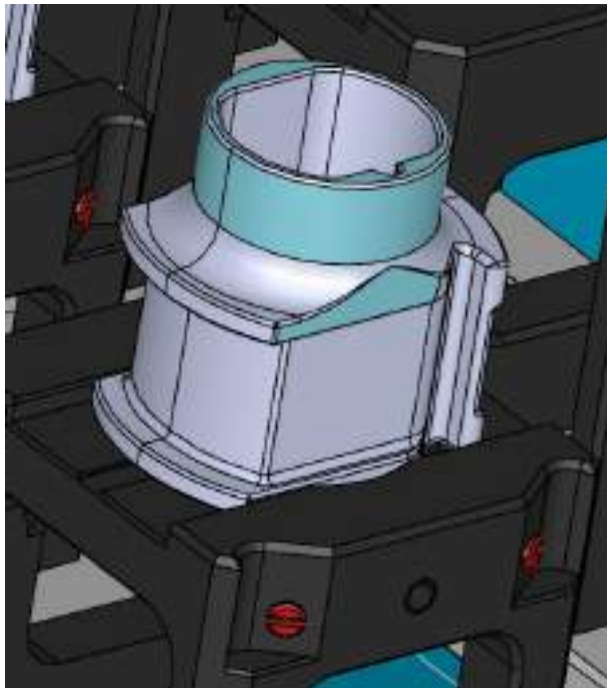
Pravilno izbrani geometrijski elementi za poravnavo in izvedba poravnave so ključnega pomena za kakovostne meritve, saj je od nje odvisno nadaljevanje merilne rutine. Poravnava mora biti izvedena na stabilnih referenčnih površinah, ki predstavljajo funkcionalne osnove merjenja.

3. Izbran način poravnave

V našem primeru smo izbrali način samodejne poravnave merjenja na podlagi izbranih geometrijskih elementov in izbrane izhodiščne točke, saj ta način omogoča natančno in ponovljivo poravnavo merjenja, brez vpliva operaterja na merilni proces.

Za zaklep rotacije okoli osi y in x ter translacije po osi z smo uporabili zgornjo ravnino merjenja. Za zaklep rotacije okoli osi z je bila uporabljena linija na stranski ravnini, za zadnji dve prosti translaciji po oseh y in x pa smo uporabili zunanji zgornji premer merjenja.

S tem smo zaklenili vseh 6 prostostnih stopenj. Na sliki 23 so prikazane uporabljene površine za poravnavo merjenca.



Slika 23: Uporabljene površine za poravnavo

Vir: (Lastni vir)

5.3 Izdelava merilnega protokola na podlagi zahtev kupca

Na podlagi zahtev risbe in dodatnih zahtev s strani kupca smo ustvarili ter optimizirali merilno rutino za meritve 12 izdelkov na KMS, ki bo zagotavljala ponovljive, hitre in zanesljive meritve za potrebe procesne kontrole. Program je zasnovan tako, da omogoča avtomatizirano izvedbo meritev z minimalnim vplivom operaterja na sam proces.

1. Prilagoditev izhodiščne točke in usmerjenosti vpenjalne priprave

Pri pripravi merilne rutine je bil prvi korak uvoz 3D modela sestava vpenjalne priprave z dodanimi modeli izdelka v »offline« programske okolje PC-DMIS, ki nam je v nadaljevanju omogočal natančno načrtovanje premikov tipal in merilnih poti ter točk, še preden smo izvedli test programa in meritve izdelkov. V naslednjem koraku smo s funkcijo »transform« prilagodili usmerjenost vpenjalne priprave v programskem okolju glede na usmerjenost koordinat x , y in z na KMS. Z isto funkcijo smo določili še izhodiščno točko na vpenjalni pripravi.

2. Kreiranje elementov in izpis dimenzij

V merilni rutini smo kreirali vse geometrijske elemente in točke za merjenje zahtevanih dimenzij ter drugih kontrolnih mer. Za določitev teh elementov smo uporabili metodo tipanja, saj se s tem – v primerjavi s skenirno metodo – izognemo morebitnemu nabiranju nečistoče na kroglici tipala zaradi nenehnega dotika površine med odjemom podatkov ter posledično netočnim rezultatom meritev. Poleg tega smo zaradi preprostih površin merjenja ter odsotnosti majhnih radijev in kratkih linij ocenili, da je skeniranje nepotrebno.

Na koncu programa smo iz izbranih elementov in točk kreirali dimenzije ter kontrolne mere, ki se bodo po zaključenih meritvah samodejno izpisale.

3. Podvajanje merilne rutine za različno orientirane merjence

Merilno rutino za prvi kos levega reda vpenjalne priprave smo s pomočjo funkcije »pattern« kopirali in zasukali za 180° po osi x , da smo pridobili še merilno rutino za prvi kos desnega reda vpenjalne priprave.

4. Implementacija zank

Za serijske meritve večjega števila merjencev smo uporabili pristop z zankami, ki nam bodo omogočale večkratno izvedbo osnovne merilne rutine z ustreznimi zamiki glede na postavitev nasedov in vpetih merjencev. V ta namen smo kreirali dve ločeni zanki, eno za levi red vpenjalnih mest in drugo za desni red.

```

        ASSIGN/V3=C1.INPUT
V1 =LOOP/START,ID=V18,NUMBER=V1,START=1,SKIP=,
    OFFSET:XAXIS=0,YAXIS=90,ZAXIS=0,ANGLE=0
    CLEARP/2PLUS,30,2PLUS,0,0H
    MOVE/DOC
    MOVE/CLEARPLANE
    ASSIGN/LOOP_INDEX1=V1
    IF/LOOP_INDEX1==1
        ASSIGN/ST_GHEZDA1=VG_1.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX1==2
        ASSIGN/ST_GHEZDA1=VG_2.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX1==3
        ASSIGN/ST_GHEZDA1=VG_3.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX1==4
        ASSIGN/ST_GHEZDA1=VG_4.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX1==5
        ASSIGN/ST_GHEZDA1=VG_5.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX1==6
        ASSIGN/ST_GHEZDA1=VG_6.INPUT
    END_IF/
    COMMENT/REPT,
        "Številka gnezda: "+ST_GHEZDA1
GRP_MERITVE_LEVIN_KOSOV =GROUP/SHOWALLPARAMS=NO
ENDGROUP/ID=GRP_MERITVE_LEVIN_KOSOV

LOOP/END
IF/V2==0
    GOTO/L_KONEC
END_IF/

** NO,

-----
DESNI KOSI
-----
V2 =LOOP/START,ID=V18,NUMBER=V2,START=1,SKIP=,
    OFFSET:XAXIS=0,YAXIS=90,ZAXIS=0,ANGLE=0
    ASSIGN/LOOP_INDEX2=V2
    IF/LOOP_INDEX2==1
        ASSIGN/ST_GHEZDA2=VG_7.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX2==2
        ASSIGN/ST_GHEZDA2=VG_8.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX2==3
        ASSIGN/ST_GHEZDA2=VG_9.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX2==4
        ASSIGN/ST_GHEZDA2=VG_10.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX2==5
        ASSIGN/ST_GHEZDA2=VG_11.INPUT
    END_IF/
    IF/LOOP_INDEX2==6
        ASSIGN/ST_GHEZDA2=VG_12.INPUT
    END_IF/
    COMMENT/REPT,
        "Številka gnezda: "+ST_GHEZDA2
GRP_MERITVE_DESNI_KOSOV =GROUP/SHOWALLPARAMS=NO
ENDGROUP/ID=GRP_MERITVE_DESNI_KOSOV

```

Slika 24: Zanki ter funkciji IF in ASSIGN

Vir: (Lastni vir)

Poleg zank (Slika 24) smo v merilno rutino dodali vnosno polje (Slika 25), ki bo neposredno povezano z zankama. Operater bo z vnosom v to polje določil število želenih meritev (od 1 do 12), glede na vneseno številko pa bo program določil število meritev na zanki za levi red in na zanki za desni red (maksimalno 6 za posamezno zanko) merjencev (npr.: če operater vnese številko 7, bo izvedenih vseh 6 meritev na levem redu in 1 meritev na desnem redu vpenjalne priprave).

```

=COMMENT/INPUT,NO,FULL_SCREEN=NO,
Noliko koscev želite meriti? (Vpišite številko od 1 - 12)
SELECT/CL,INPUT
CASE/1
  ASSIGN/VI=1
  ASSIGN/VD=0
END_CASE/
CASE/2
  ASSIGN/VI=2
  ASSIGN/VD=0
END_CASE/
CASE/3
  ASSIGN/VI=3
  ASSIGN/VD=0
END_CASE/
CASE/4
  ASSIGN/VI=4
  ASSIGN/VD=0
END_CASE/
CASE/5
  ASSIGN/VI=5
  ASSIGN/VD=0
END_CASE/
CASE/6
  ASSIGN/VI=6
  ASSIGN/VD=0
END_CASE/
CASE/7
  ASSIGN/VI=6
  ASSIGN/VD=1
END_CASE/
CASE/8
  ASSIGN/VI=6
  ASSIGN/VD=2
END_CASE/
CASE/9
  ASSIGN/VI=6
  ASSIGN/VD=3
END_CASE/
CASE/10
  ASSIGN/VI=6
  ASSIGN/VD=4
END_CASE/
CASE/11
  ASSIGN/VI=6
  ASSIGN/VD=5
END_CASE/
CASE/12
  ASSIGN/VI=6
  ASSIGN/VD=6
END_CASE/
DEFAULT_CASE/
  COMMENT/OPEN,NO,FULL_SCREEN=NO,AUTO-CONTINUE=NO,END=NO,
  Nagačen vnos!
  GOTO/CL
END_DEFAULTCASE/
END_SELECT/

```

Slika 25: Vnosno polje s funkcijama CASE in ASSIGN

Vir: (Lastni vir)

Za vsako vpenjalno mesto smo predvideli tudi vnos številke gnezda merjenja (Slika 26), vendar le za dejansko število želenih meritev (npr. pri meritvi treh izdelkov bo potreben vnos številke gnezda le za te izdelke).

```

VG_1      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 1:
          IF/Cl.INPUT>=2
VG_2      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 2:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=3
VG_3      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 3:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=4
VG_4      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 4:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=5
VG_5      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 5:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=6
VG_6      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 6:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=7
VG_7      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 7:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=8
VG_8      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 8:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=9
VG_9      =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 9:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=10
VG_10     =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 10:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=11
VG_11     =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 11:
          END_IF/
          IF/Cl.INPUT>=12
VG_12     =COMMENT/INPUT,NC,FULL SCREEN=NC,
          Vpiši št. gnezda v vpenjalnem mestu 12:
          END_IF/

```

Slika 26: Programska koda za vpis števila gnezd

Vir: (Lastni vir)

5. Merilno tipalo in optimizacija merjenja

Za celotno merilno rutino smo izbrali tipalo, ki nam bo omogočalo izvedbo vseh meritev v enem koraku brez menjave tipal, saj se bo merilni program na koncu uporabljal v procesni kontroli na KMS, ki nima možnosti samodejne menjave tipal. S tem bosta zagotovljena popolna avtomatizacija merjenja ter skrajšanje časa merjenja, saj ne bo potrebnih nastavitvev merjencev med meritvami.

V merilni rutini smo optimizirali premike tipal, zaporedje meritev elementov in rotacij tipal, z namenom, da čim bolj skrajšamo čas merjenja, s tem pa tudi zasedenost KMS.

6. Kalibracija in testiranje

Pred testnim zagonom programa smo na referenčnem KMS z uporabo kalibracijske krogle izvedli kalibracijo vseh novo dodanih rotacij merilne glave s tipalom. Po uspešnem testu in odpravljenih vseh pomanjkljivosti smo merilno rutino potrdili kot ustrezno za uporabo v procesni kontroli ter pri analizi MSA.

5.4 Priprava in izpis merilnega poročila

Merilno poročilo je ključen dokument v procesni kontroli, saj vsebuje podatke o izmerjenih vrednostih, ki so potrebni za zagotavljanje kakovosti med serijsko proizvodnjo. V poročilu so zajete vse dimenzije, ki se bodo spremljale v procesu, ter dodatne informativne dimenzije za potrebe oddelka tehnologije, ki neposredno vplivajo na funkcijske dimenzije.

Poročilo smo pripravili tako, da bo omogočalo jasen vpogled v rezultate in hitro identifikacijo napak. Izpis bo izveden kot neposreden izvoz PDF in Excel, kar bo omogočalo arhiviranje in morebitno nadaljnjo obdelavo podatkov. V obeh oblikah zapisov bodo podane:

- nominalne vrednosti dimenzij,
- tolerance,
- izmerjene vrednosti,
- odstopanja od nominalne vrednosti,
- barvni prikaz odstopanj (OK/NOK barvna lestvica).

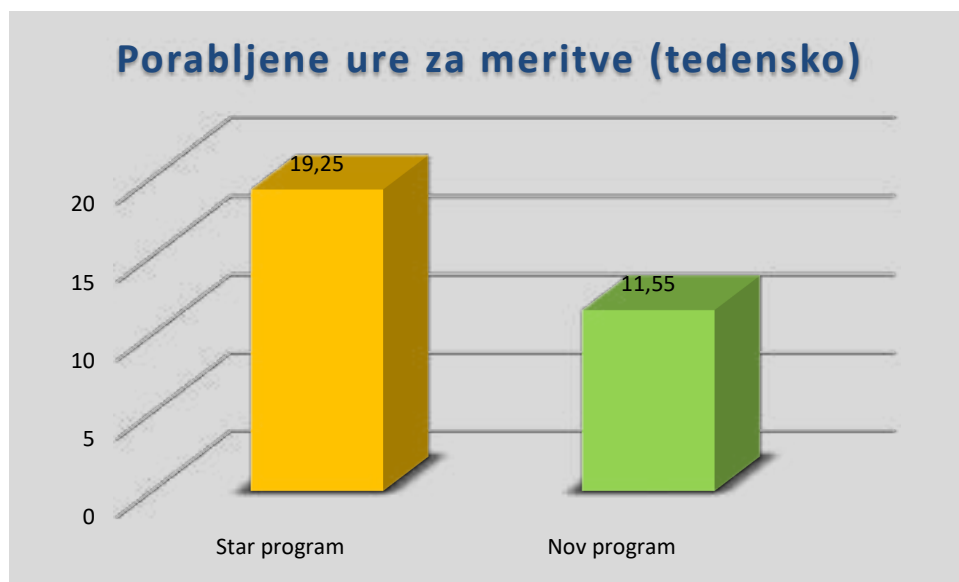
Ker se bodo meritve hkrati izvajale na dvanajstih izdelkih iz različnih gnezd, smo pred vsakim zapisom merjenja dodali oznako gnezda in številko kosa. S tem smo omogočili sledenje podatkov v primeru napak v procesu.

Takšna zasnova merilnega poročila bo omogočala enostavno interpretacijo meritev, kar bo skrajšalo reakcijski čas pri odpravi morebitnih napak.

5.5 Primerjava novega in starega merilnega programa

S prejšnjim merilnim programom in načinom vpetja v primež je bil čas merjenja za strel dvanajstih livarskih izdelkov 1,75 ure, saj je bilo potrebno menjavanje izdelkov med meritvami, hkrati pa je bila potrebna prisotnost operaterja pri KMS. Za potrebe procesne kontrole so operaterji izvajali po dve meritvi vseh dvanajstih izdelkov vsak dan med tednom ter po eno meritev celotnega strela ob koncu tedna. To skupaj pomeni enajst meritev tedensko, kar predstavlja dobršen del zasedenosti KMS in operaterja samo za ta specifični izdelek.

Z uvedbo nove vpenjalne priprave in merilnega programa smo proces občutno izboljšali. Priprava dvanajstih merjencev se lahko opravi že med merjenjem drugih izdelkov, saj vpenjalna priprava omogoča takojšen začetek meritev. Poleg tega smo merilni program optimizirali, s čimer smo skrajšali čas merjenja na 1,05 ure, obenem pa z avtomatizacijo merjenja več izdelkov hkrati odpravili potrebo po prisotnosti operaterja.



Graf 1: Prikaz tedensko porabljenih ur

Vir: (Lastni vir)

Na grafu je prikazana primerjava časa merjenja starega in novega programa za vseh dvanajst izdelkov. Na tedenski ravni smo s skrajšanjem merjenja tako prihranili 7,75 ure, kar pomeni manjšo zasedenost KMS in operaterja, hitrejšo sprostitev KMS. Ne nazadnje pa smo s popolno avtomatizacijo merjenja omogočili, da lahko operaterji med uporabo tega programa izvajajo druge zadolžitve.

6 ANALIZA MSA IN PRIKAZ REZULTATOV

6.1 Priprava merjencev

Pred izvedbo meritev je bilo treba poskrbeti za ustrezne livarske kose, na katerih so se v nadaljnjem izvajale meritve. V ta namen je bilo pripravljenih 12 kosov iz proizvodnje, ki so bili pripravljeni s prej določenimi postopki litja, raziglanja in peskanja.

Ko so bili vzorčni kosi dostavljeni v merilni laboratorij, smo jih skrbno očistili vseh nečistoč in pustili v laboratoriju, da se je njihova temperatura izenačila s temperaturo okolja. Tako smo zagotovili stabilne pogoje in zmanjšali možnost vpliva temperaturnih razlik na rezultate meritev.

6.2 Analiza MSA tipa 1

Za izvedbo analize tipa 1 smo se odločili, ker predstavlja osnovo za nadaljnjo analizo tipa 2, obenem pa je bil namen preveriti stabilnost vpetja in ponovljivost meritev na vseh vpenjalnih mestih z uporabo novega merilnega programa.

Na pripravljenih merjencih smo desetkrat izvedli meritve najpomembnejših treh karakteristik, ki se bodo poleg nekaterih informativnih dimenzij pozneje spremljale v procesu. Povprečna vrednost teh meritev nam je služila kot referenčna vrednost.

Merjene dimenzije so bile:

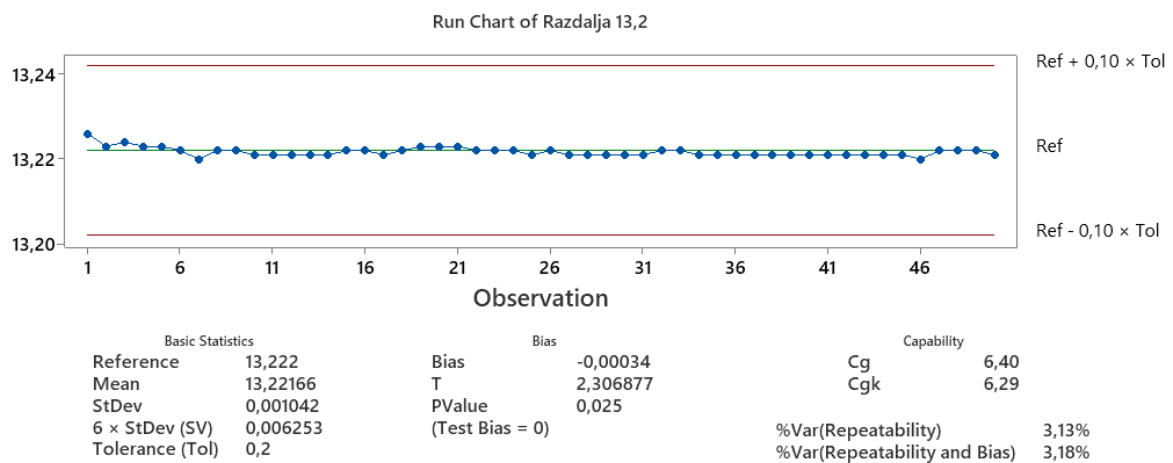
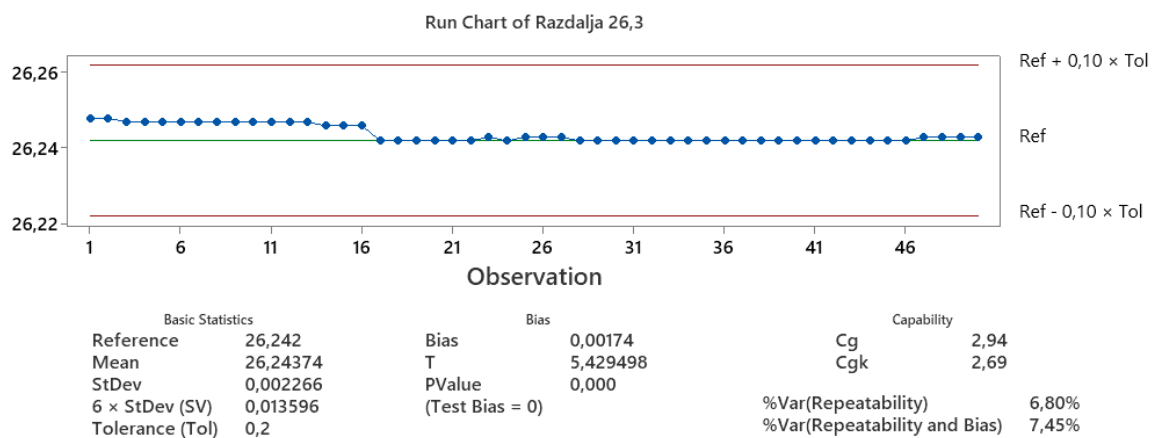
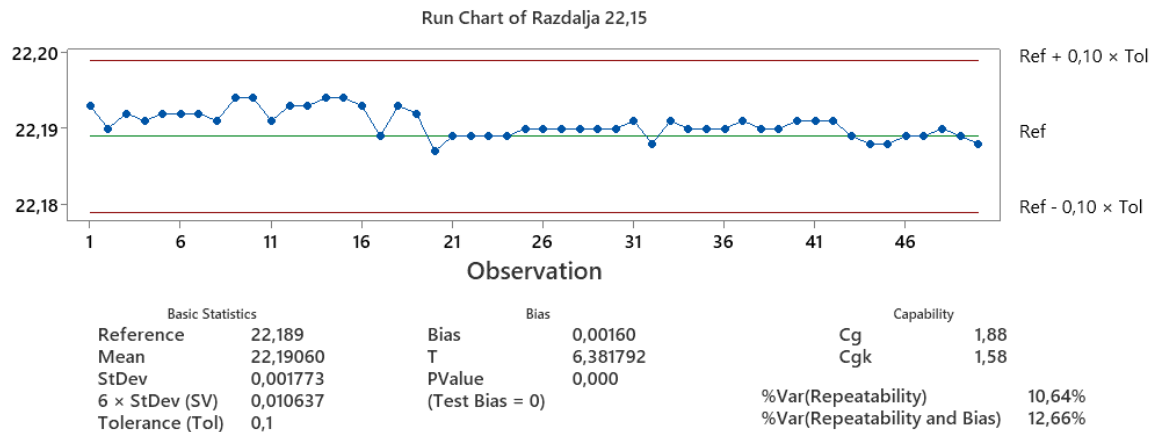
- razdalja $22,15^{+0.1}$
- razdalja $26,3^{-0.2}$
- razdalja $13,2^{-0.2}$

Za potrebe analize tipa 1 smo izvedli 50 ponovitvenih meritev z izpenjanji in vpenjanji merjencev nazaj na ista vpenjalna mesta med vsako ponovitvijo. Na slikah 27 do 38 so prikazani rezultati analize na prej zapisanih dimenzijah za vsa vpenjalna mesta na pripravi.

Vpenjalno mesto 1 - Kos 1

Gage name: 1.1
Date of study: 5.9.2025

Reported by: Pintar T.



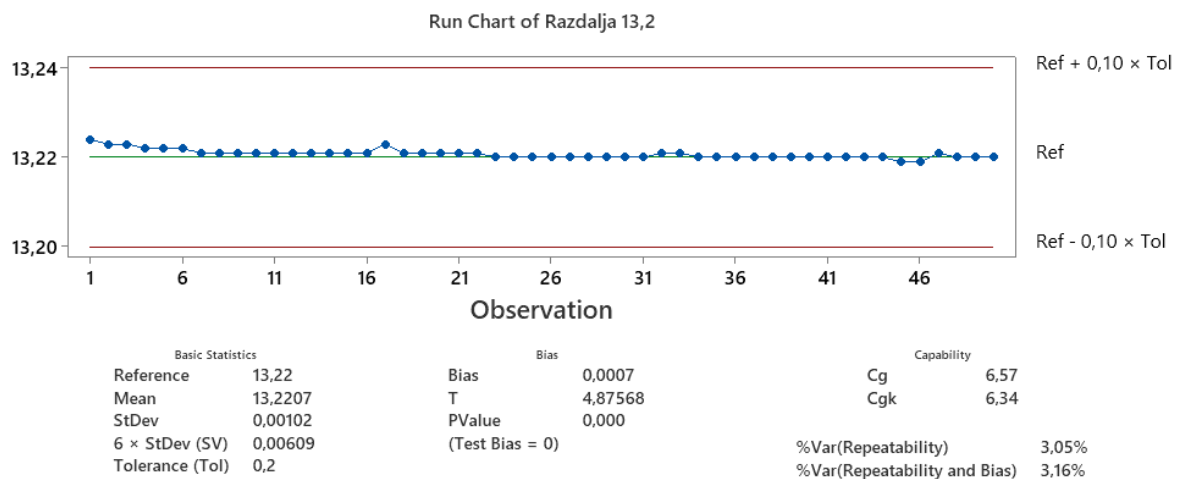
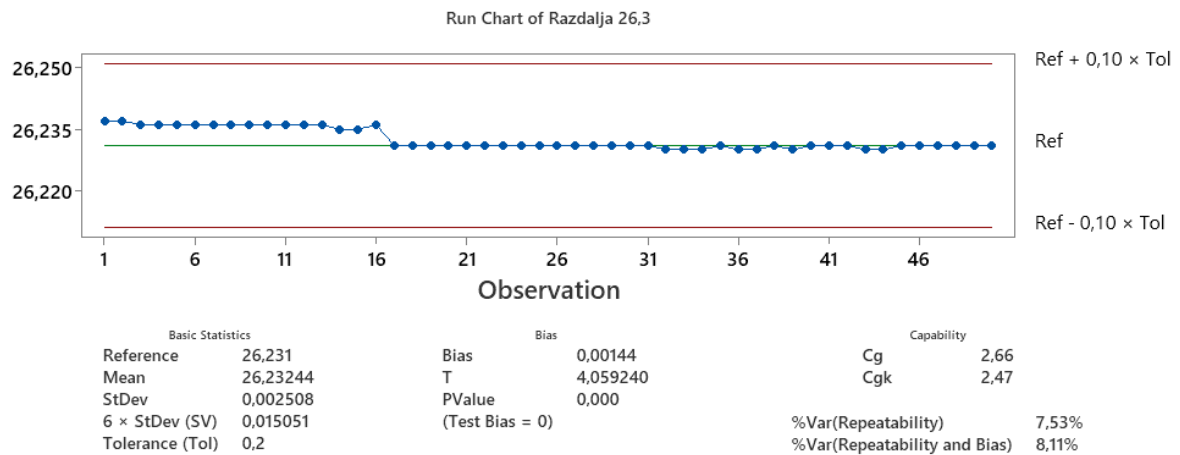
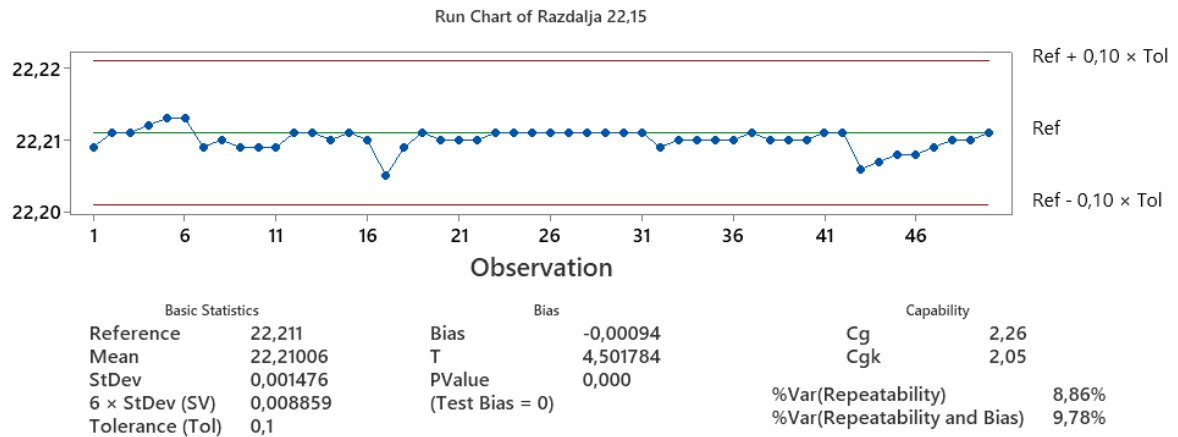
Slika 27: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 1

Vir: (Lastni vir)

Vpenjalno mesto 2 - Kos 2

Reported by: Pintar T.

Gage name: 2.1
Date of study: 5.9.2025



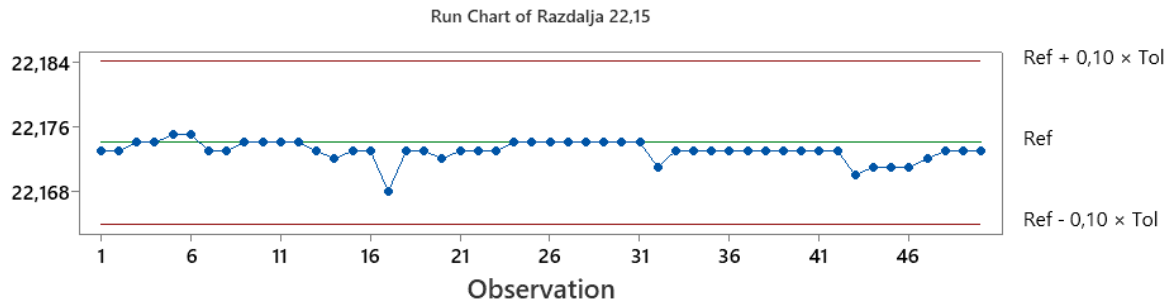
Slika 28: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 2

Vir: (Lastni vir)

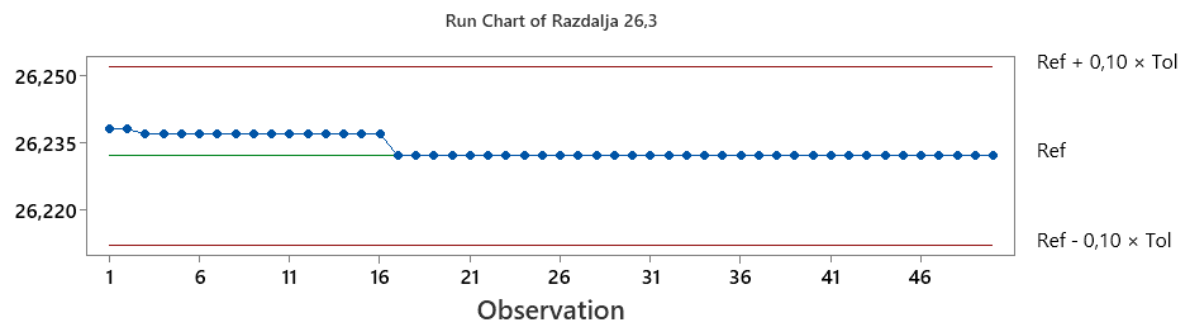
Vpenjalno mesto 3 - Kos 3

Reported by: Pintar T.

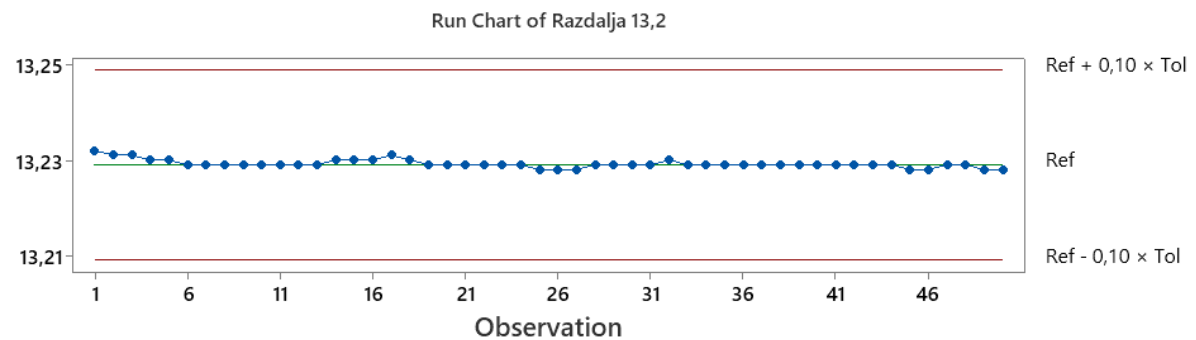
Gage name: 3.1
Date of study: 5.9.2025



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	22,174	Bias	-0,00102	Cg	2,69
Mean	22,17298	T	5,830563	Cgk	2,42
StDev	0,001237	PValue	0,000		
6 × StDev (SV)	0,007422	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability)	7,42%
Tolerance (Tol)	0,1			%Var(Repeatability and Bias)	8,27%



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	26,232	Bias	0,00164	Cg	2,75
Mean	26,23364	T	4,787324	Cgk	2,53
StDev	0,002422	PValue	0,000		
6 × StDev (SV)	0,014534	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability)	7,27%
Tolerance (Tol)	0,2			%Var(Repeatability and Bias)	7,92%



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	13,229	Bias	0,00018	Cg	8,08
Mean	13,22918	T	1,542099	Cgk	8,00
StDev	0,000825	PValue	0,129		
6 × StDev (SV)	0,004952	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability)	2,48%
Tolerance (Tol)	0,2			%Var(Repeatability and Bias)	2,50%

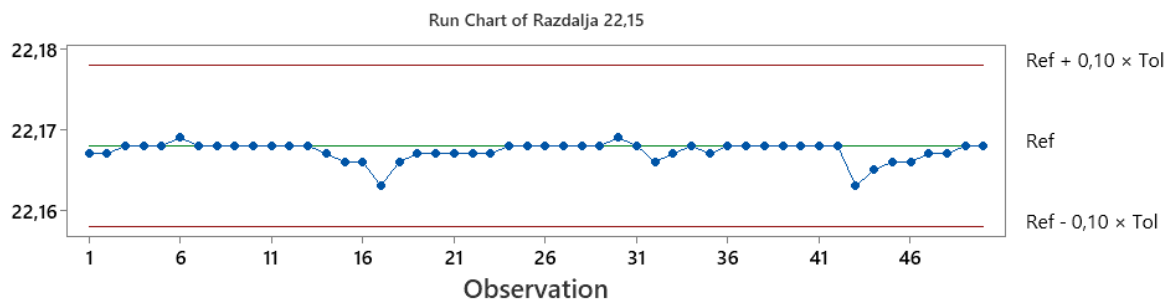
Slika 29: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 3

Vir: (Lastni vir)

Vpenjalno mesto 4 - Kos 4

Reported by: Pintar T.

Gage name: 4.1
Date of study: 5.9.2025



Basic Statistics

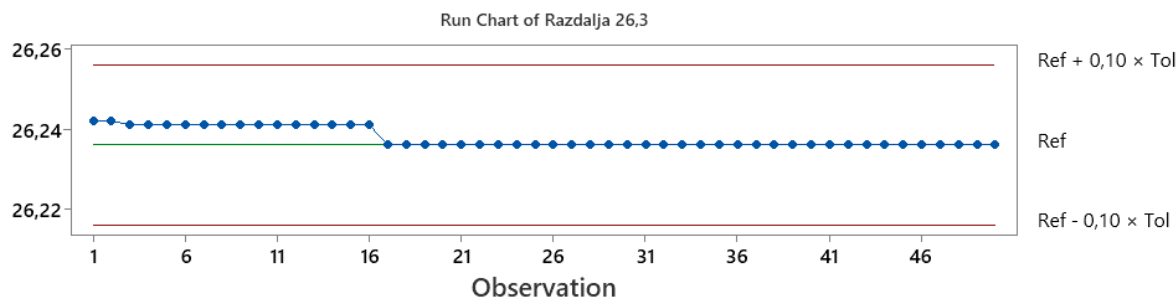
Reference	22,168
Mean	22,16730
StDev	0,001216
6 × StDev (SV)	0,007298
Tolerance (Tol)	0,1

Bias

Bias	-0,00070
T	4,069229
PValue	0,000
(Test Bias = 0)	

Capability

Cg	2,74
Cgk	2,55
%Var(Repeatability)	7,30%
%Var(Repeatability and Bias)	7,85%



Basic Statistics

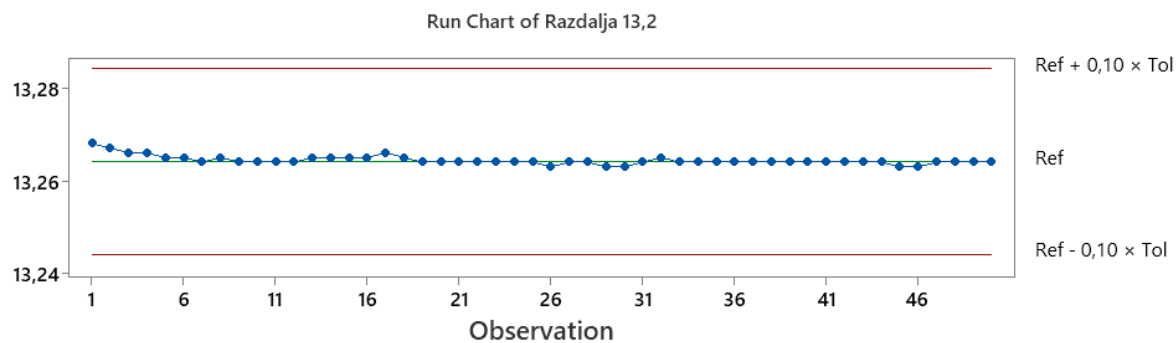
Reference	26,236
Mean	26,23764
StDev	0,002422
6 × StDev (SV)	0,014534
Tolerance (Tol)	0,2

Bias

Bias	0,00164
T	4,787324
PValue	0,000
(Test Bias = 0)	

Capability

Cg	2,75
Cgk	2,53
%Var(Repeatability)	7,27%
%Var(Repeatability and Bias)	7,92%



Basic Statistics

Reference	13,264
Mean	13,26434
StDev	0,000961
6 × StDev (SV)	0,005764
Tolerance (Tol)	0,2

Bias

Bias	0,00034
T	2,502630
PValue	0,016
(Test Bias = 0)	

Capability

Cg	6,94
Cgk	6,82
%Var(Repeatability)	2,88%
%Var(Repeatability and Bias)	2,93%

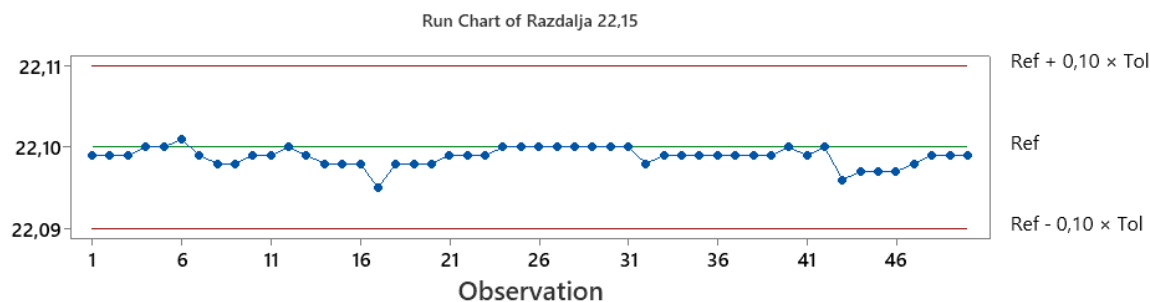
Slika 30: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 4

Vir: (Lastni vir)

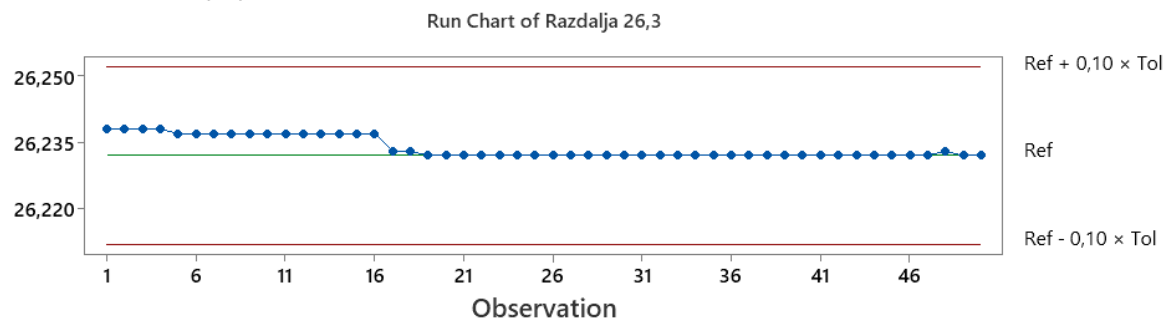
Vpenjalno mesto 5 - Kos 5

Reported by: Pintar T.

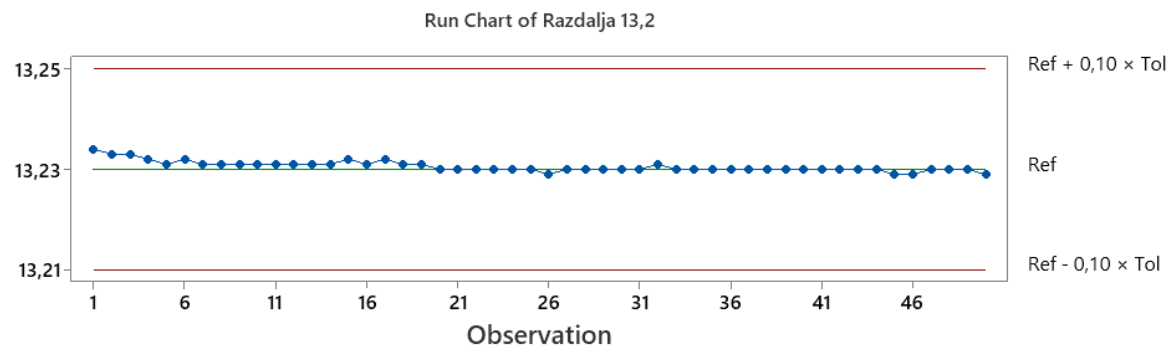
Gage name: 5.1
Date of study: 5.9.2025



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	22,1	Bias	-0,001	Cg	2,95
Mean	22,099	T	7,2500	Cgk	2,60
StDev	0,0011	PValue	0,000		
6 × StDev (SV)	0,0068	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability)	6,79%
Tolerance (Tol)	0,1			%Var(Repeatability and Bias)	7,68%



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	26,232	Bias	0,00174	Cg	2,71
Mean	26,23374	T	5,009166	Cgk	2,48
StDev	0,002456	PValue	0,000		
6 × StDev (SV)	0,014737	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability)	7,37%
Tolerance (Tol)	0,2			%Var(Repeatability and Bias)	8,07%



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	13,23	Bias	0,0005	Cg	6,45
Mean	13,2305	T	3,69172	Cgk	6,27
StDev	0,00103	PValue	0,001		
6 × StDev (SV)	0,00621	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability)	3,10%
Tolerance (Tol)	0,2			%Var(Repeatability and Bias)	3,19%

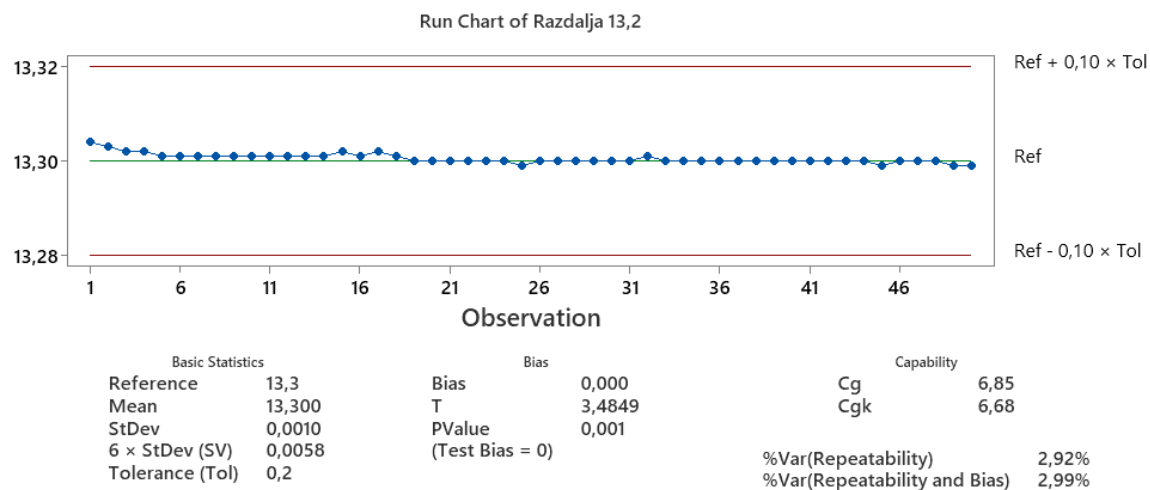
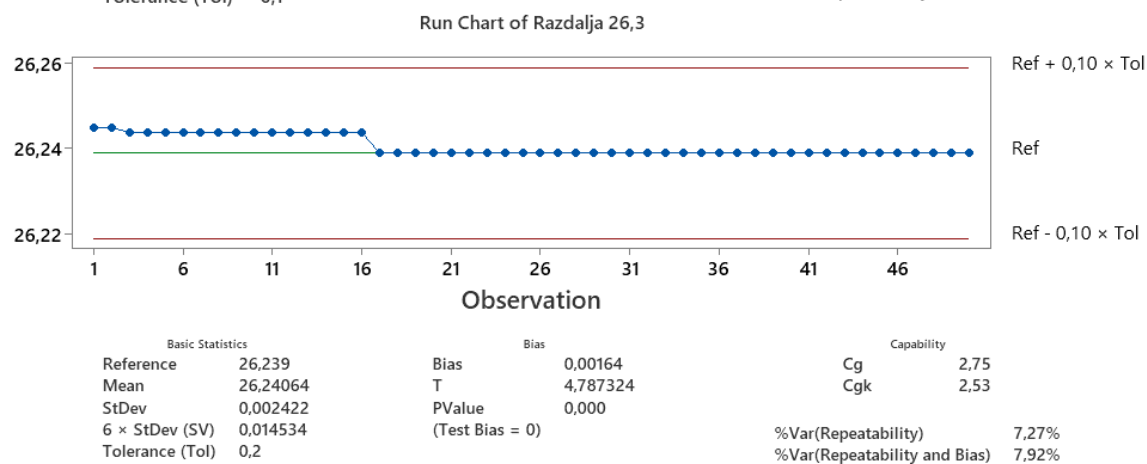
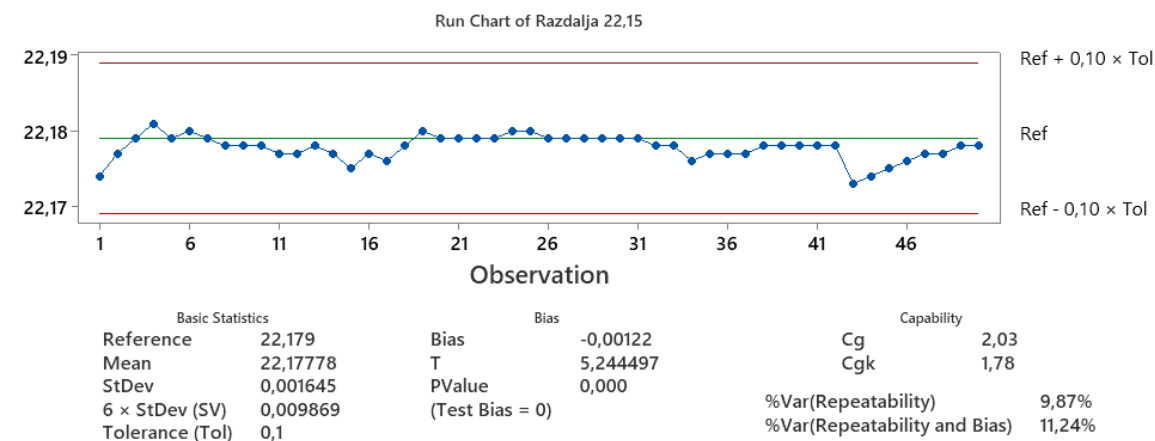
Slika 31: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 5

Vir: (Lastni vir)

Vpenjalno mesto 6 - Kos 6

Gage name: 6.1
Date of study: 5.9.2025

Reported by: Pintar T.



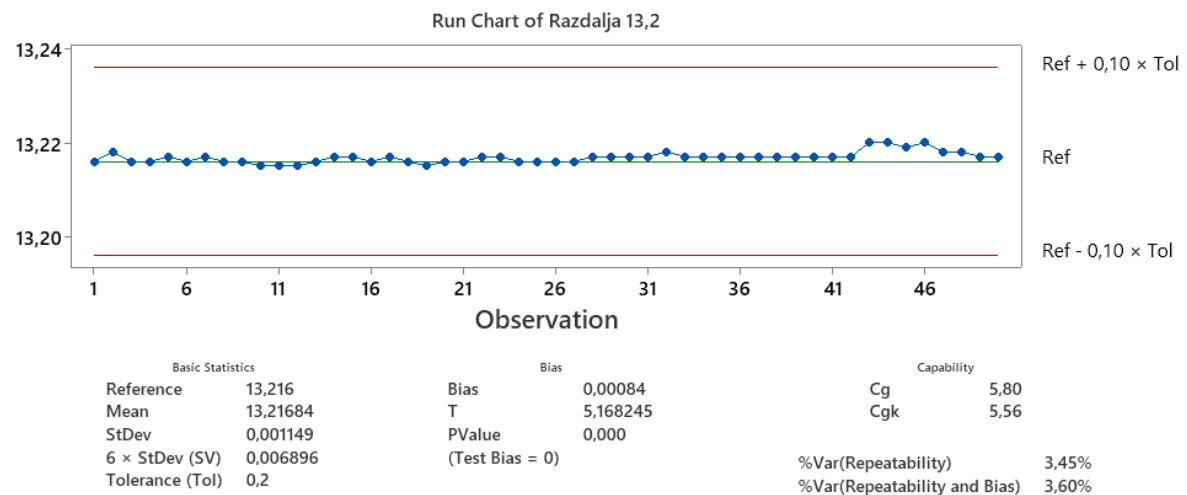
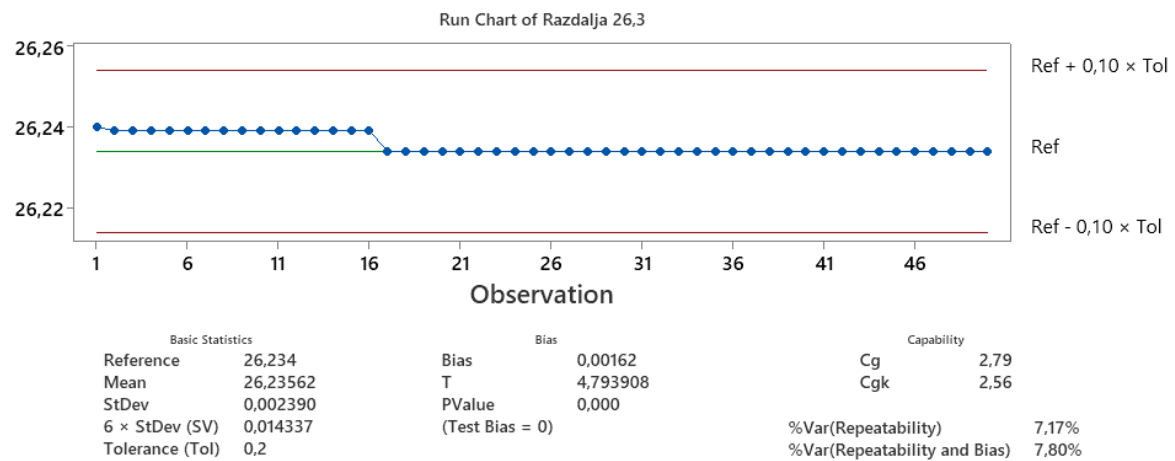
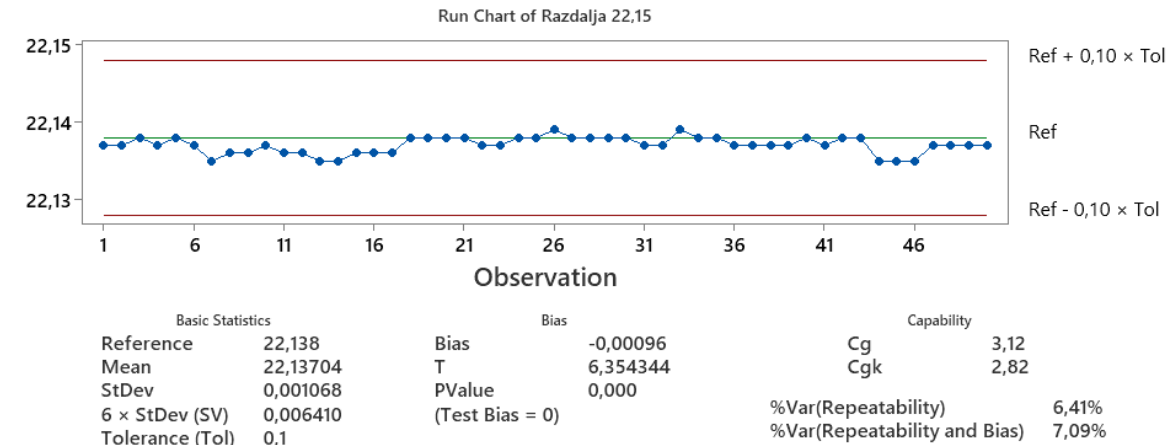
Slika 32: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 6

Vir: (Lastni vir)

Vpenjalno mesto 7 - Kos 7

Gage name: 7.1
Date of study: 5.9.2025

Reported by: Pintar T.



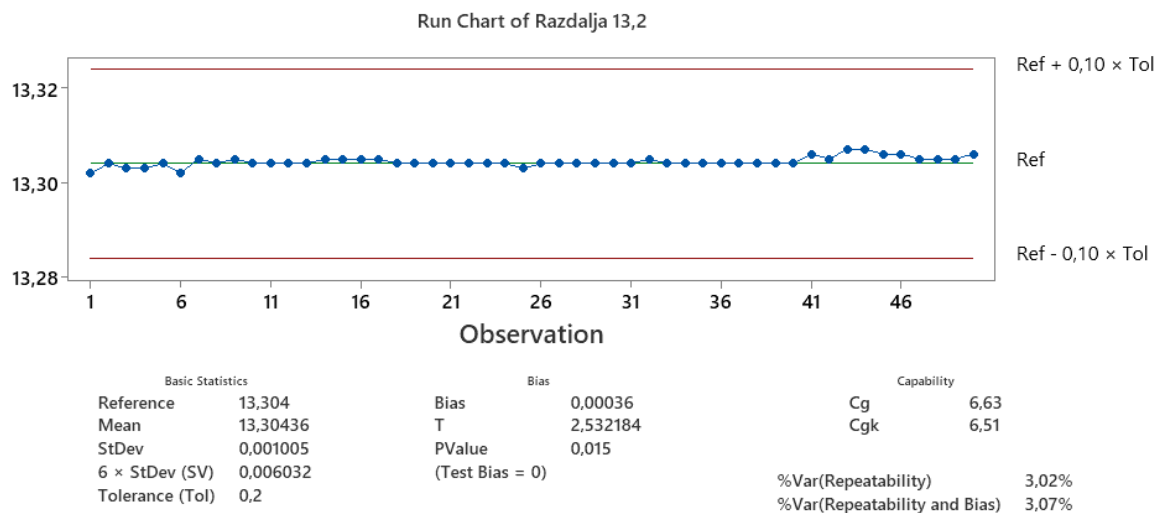
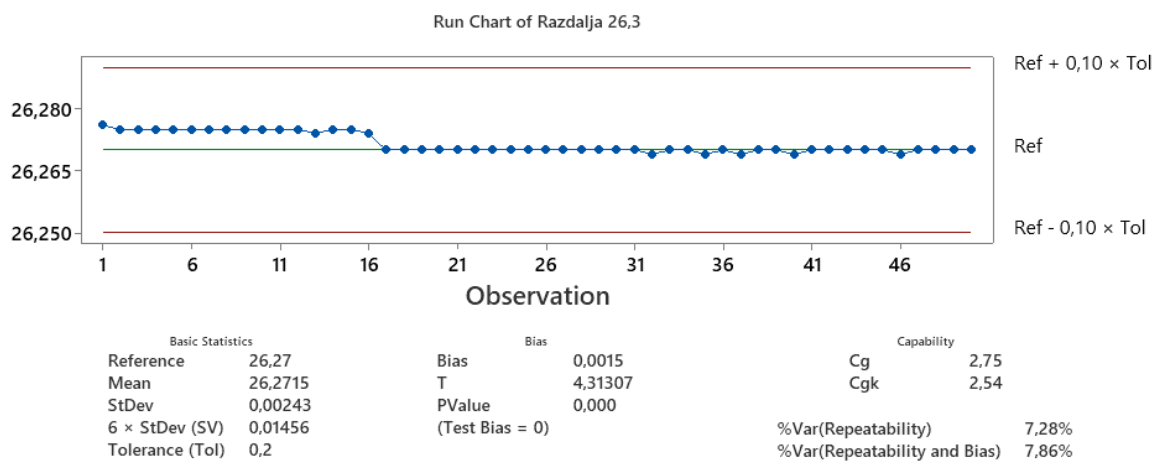
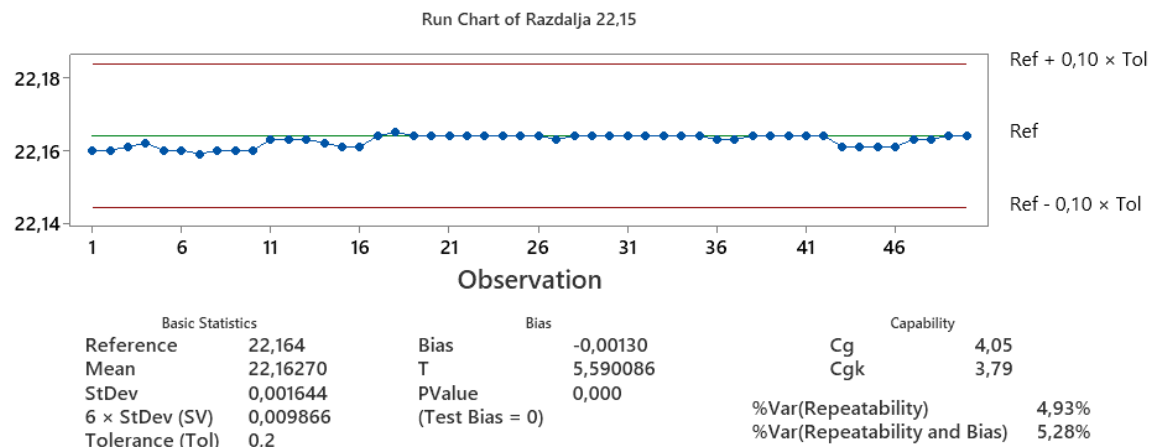
Slika 33: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 7

Vir: (Lastni vir)

Vpenjalno mesto 8 - Kos 8

Gage name: 8.1
Date of study: 5.9.2025

Reported by: Pintar T.



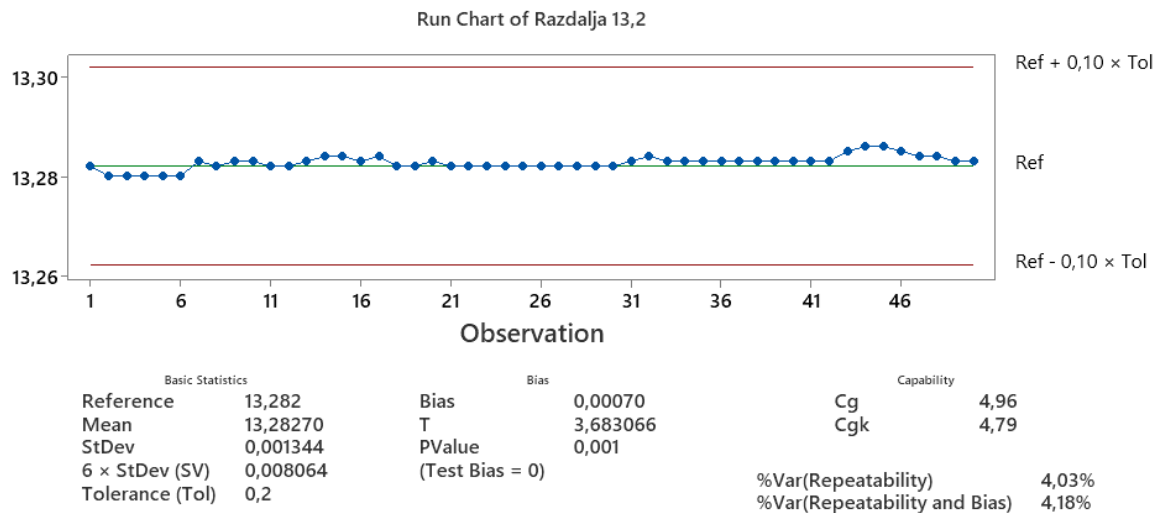
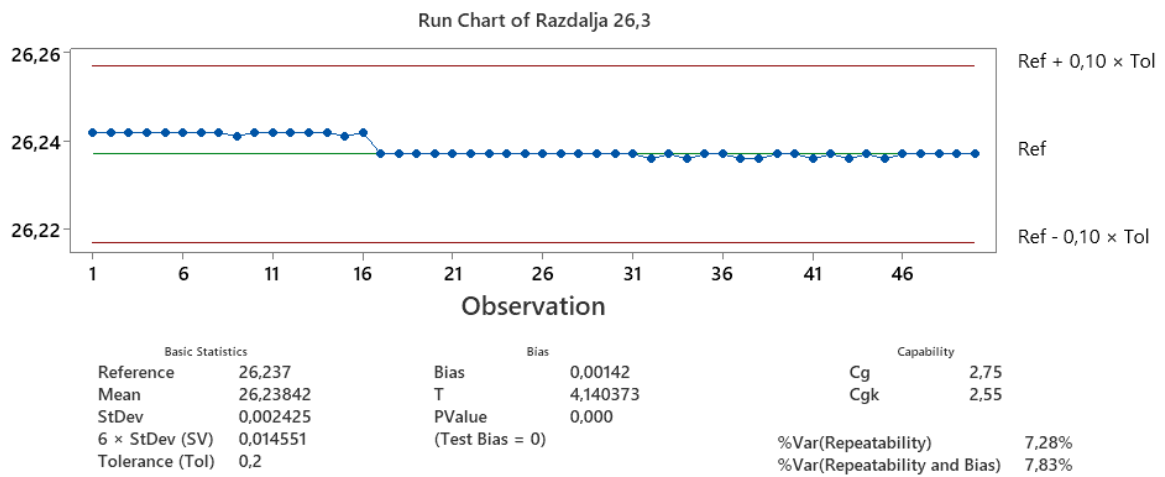
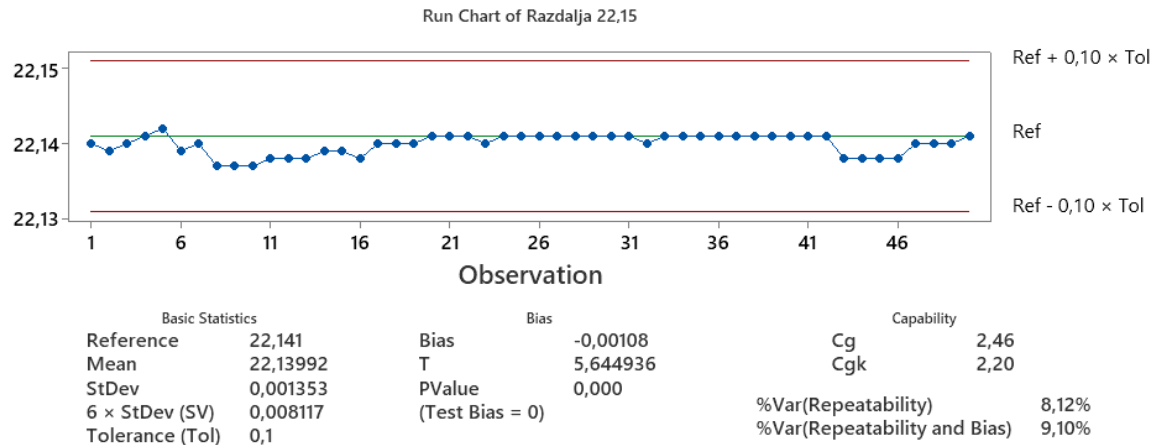
Slika 34: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 8

Vir: (Lastni vir)

Vpenjalno mesto 9 - Kos 9

Gage name: 9.1
Date of study: 5.9.2025

Reported by: Pintar T.



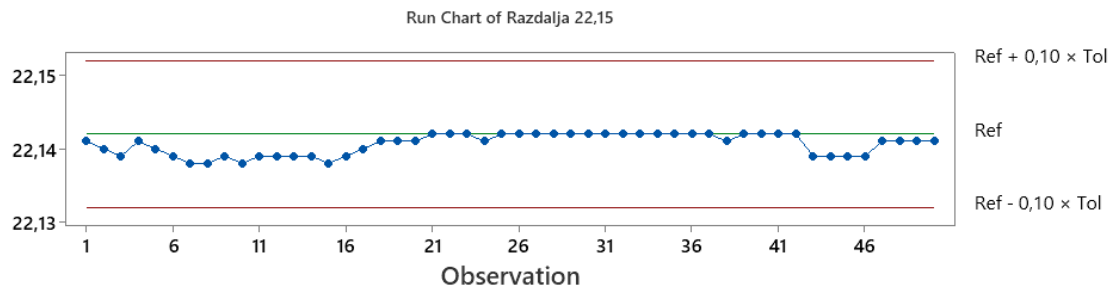
Slika 35: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 9

Vir: (Lastni vir)

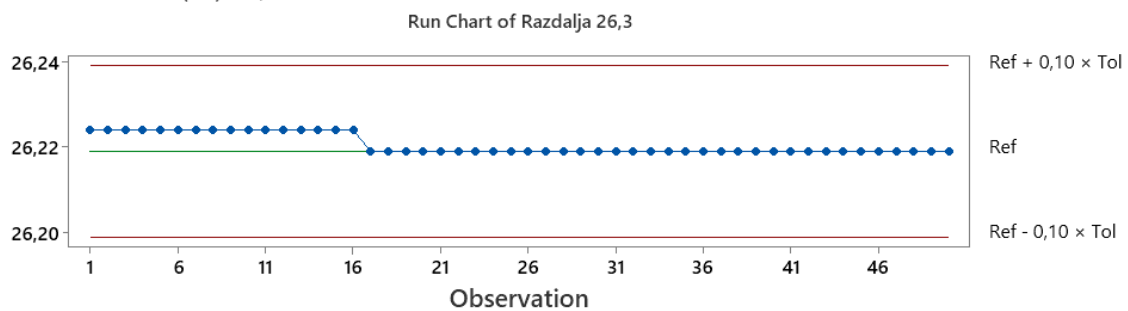
Vpenjalno mesto 10 - Kos 10

Gage name: 10.1
Date of study: 5.9.2025

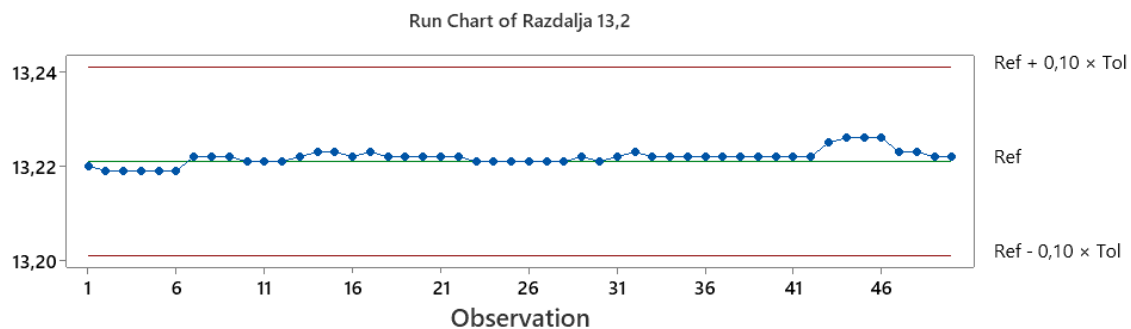
Reported by: Pintar T.



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	22,142	Bias	-0,00138	Cg	2,34
Mean	22,14062	T	6,838178	Cgk	2,01
StDev	0,001427	PValue	0,000	%Var(Repeatability)	8,56%
6 × StDev (SV)	0,008562	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability and Bias)	9,93%
Tolerance (Tol)	0,1				



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	26,219	Bias	0,00160	Cg	2,83
Mean	26,22060	T	4,801960	Cgk	2,60
StDev	0,002356	PValue	0,000	%Var(Repeatability)	7,07%
6 × StDev (SV)	0,014136	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability and Bias)	7,68%
Tolerance (Tol)	0,2				



Basic Statistics		Bias		Capability	
Reference	13,221	Bias	0,00088	Cg	4,24
Mean	13,22188	T	3,955224	Cgk	4,05
StDev	0,001573	PValue	0,000	%Var(Repeatability)	4,72%
6 × StDev (SV)	0,009439	(Test Bias = 0)		%Var(Repeatability and Bias)	4,94%
Tolerance (Tol)	0,2				

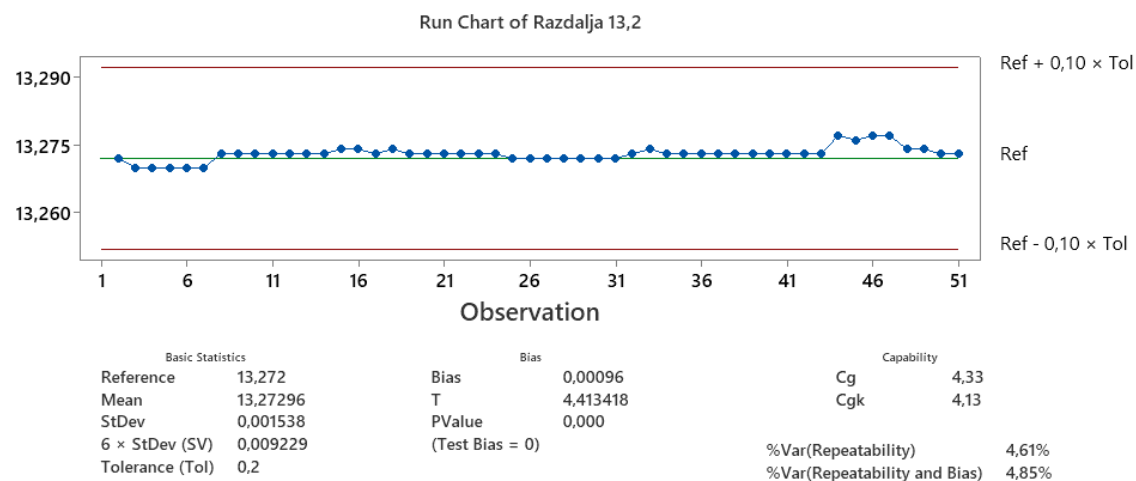
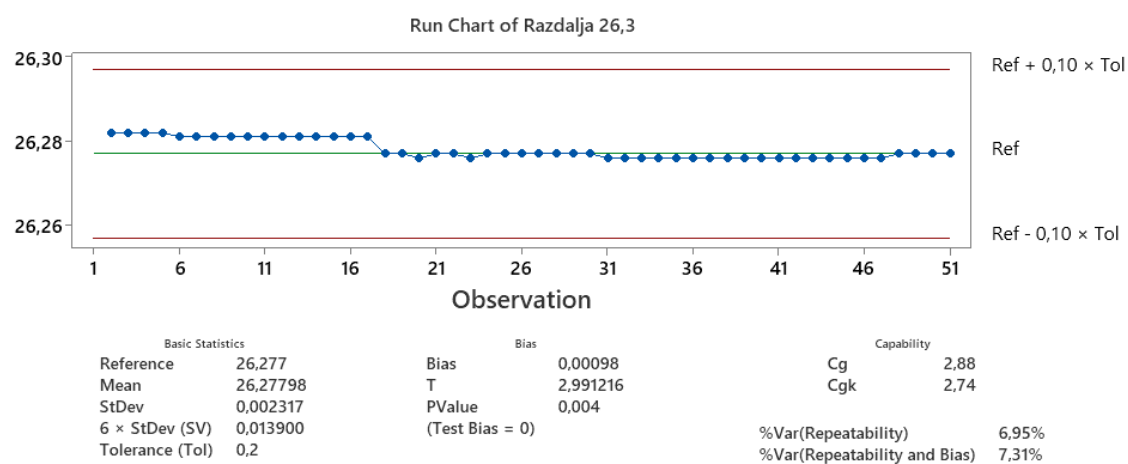
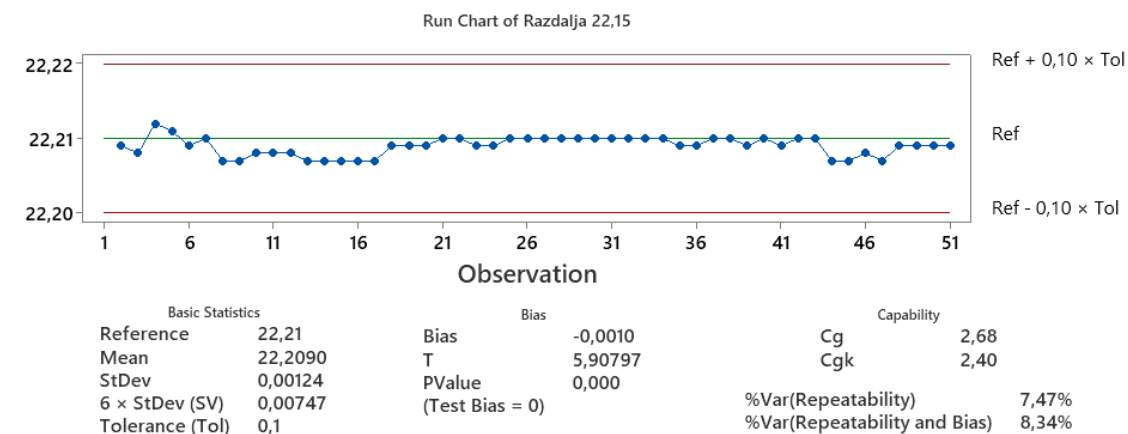
Slika 36: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 10

Vir: (Lastni vir)

Vpenjalno mesto 11 - Kos 11

Gage name: 11.1
Date of study: 5.9.2025

Reported by: Pintar T.



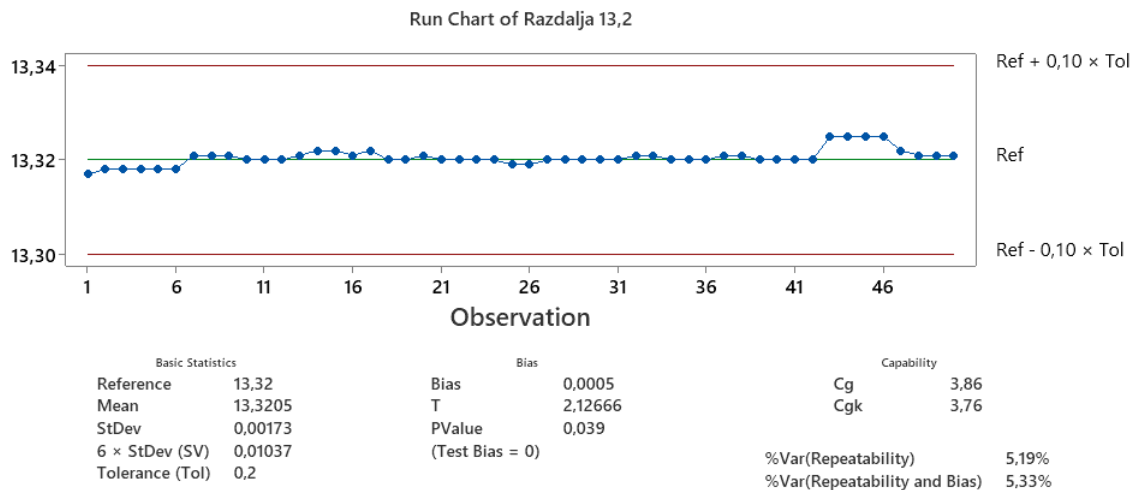
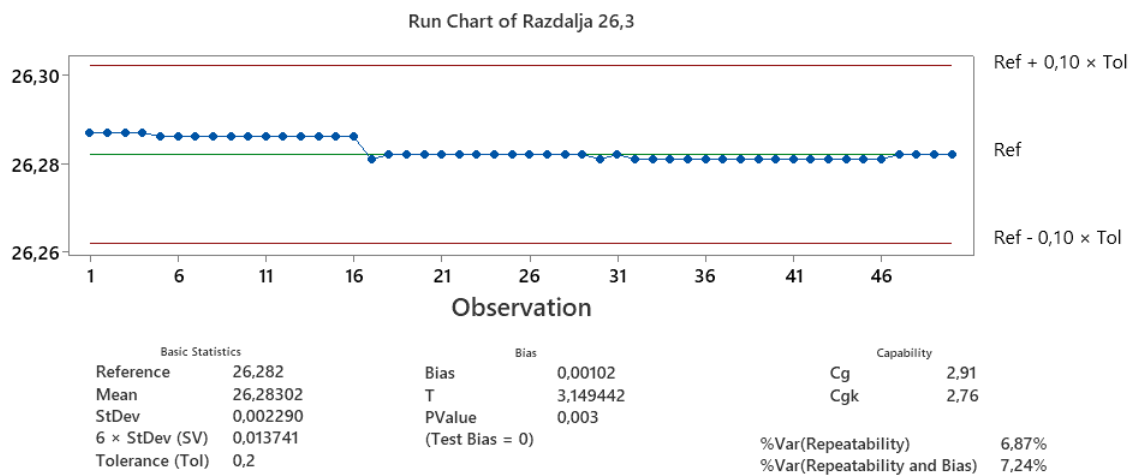
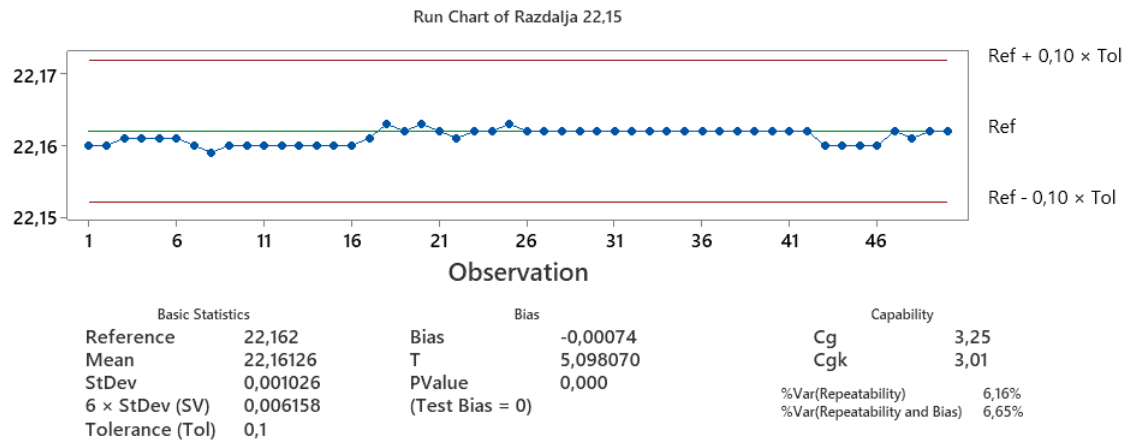
Slika 37: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 11

Vir: (Lastni vir)

Vpenjalno mesto 12 - Kos 12

Gage name: 12.1
Date of study: 5.9.2025

Reported by: Pintar T.



Slika 38: MSA tipa 1 – Vpenjalno mesto 12

Vir: (Lastni vir)

Karakteristike na grafih nam dajo vpogled v vrednosti meritev, njihovo razpršenost glede na referenčno vrednost, izračun pristranskosti in stabilnost meritev. Opazovane karakteristike so:

- reference – izmerjena referenčna vrednost;
- Mean – povprečje vseh meritev;
- StDev – standardni odklon meritev, ki nam pokaže razpršenost okoli povprečja;
- toleranca – tolerančno polje (zgornja mejna mera-spodnja mejna mera);
- Bias – predstavlja natančnost sistema in je izračunan kot razlika med referenčno vrednostjo ter povprečjem vseh meritev;
- T – je t-statistika za alternativno hipotezo, da je pristranskost $\neq 0$ (T-test primerja opazovano t-statistiko s kritično vrednostjo, pri čemer lahko ugotovimo, ali je pristranskost v merilnem sistemu statistično pomembna.);
- PValue – vrednost P – vrednost, ki je povezana s t-statistiko (Ko se t-statistika povečuje, se p-vrednost zmanjšuje. Majhna p-vrednost pomeni, da je pristranskost = 0, kar verjetno ne drži.);
- Cg – indeks zmogljivosti, ki primerja odstopanje meritev sistema in operaterja s tolerančnim območjem (Najmanjša dovoljena vrednost za ustreznost sistema je 1,33.);
- Cgk – indeks zmogljivosti, ki primerja skupno pristranskost in odstopanje meritev sistema ter operaterja s tolerančnim območjem (Najmanjša dovoljena vrednost za ustreznost sistema je 1,33.);
- %Var(Repeatability) – karakteristika primerja ponovljivost merila s toleranco;
- %Var(Repeatability and Bias) – karakteristika primerja ponovljivost in pristranskost merila s toleranco.

6.3 Analiza Gage R&R

Za oceno ponovljivosti in obnovljivosti merilnega sistema smo izvedli meritve na desetih izdelkih s tremi različnimi operaterji. Izbrali smo izdelke, ki ponazarjajo celoten razpon procesa. Vsak operater je v naključnem vrstnem redu opravil dve ponovitvi meritev vseh desetih pripravljenih merjencev. Za vse meritve je bilo zagotovljeno stabilno merilno okolje.

Namen analize Gage R&R je bil preveriti, ali operater kakor koli vpliva na rezultate meritve pri uporabi nove vpenjalne priprave in novega merilnega programa ter kakšen delež variabilnosti pripisujemo merilnemu sistemu.

V analizo so bile vključene:

- ponovljivost – variabilnost, ki jo povzroča sam merilni sistem pri ponovitvenih meritvah;
- obnovljivost – variabilnost med operaterji;
- Part to Part variacija – dejanska variabilnost med izdelki.

Za preverjanje ustreznosti merskega sistema bomo uporabili Tabela 1.

Tabela 1: Referenčne vrednosti GRR za ocenjevanje ustreznosti

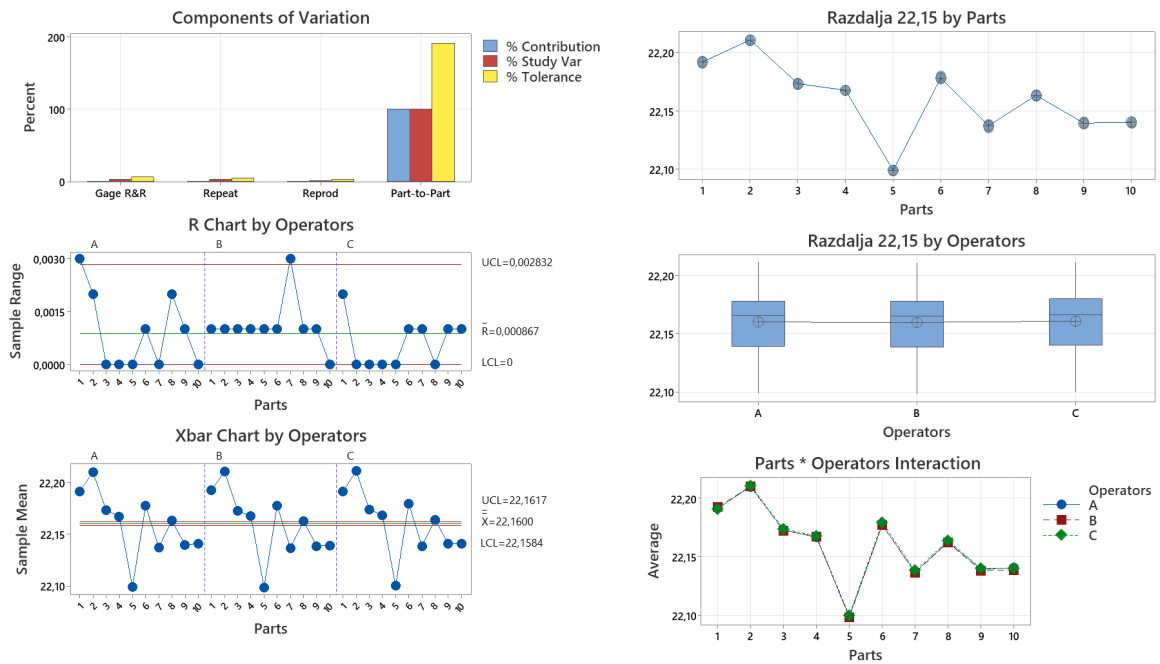
GRR	Odločitev	Komentarji
< 10 %	Na splošno velja za sprejemljiv merski sistem.	Priporočeno, še posebej uporabno pri poskusu razvrščanja ali klasificiranja delov ali kadar je potreben strožji nadzor procesa.
10–30 %	Morda sprejemljivo za nekatere aplikacije.	Odločitev mora temeljiti na primer na pomembnosti meritve uporabe, stroškov merilne naprave, stroškov predelave ali popravila. Odobriti jo mora stranka.
> 30 %	Šteje se za nesprejemljivo.	Potruditi se je treba za izboljšanje merilnega sistema. To stanje je mogoče odpraviti z uporabo ustrezne strategije merjenja, na primer z uporabo povprečnega rezultata več odčitkov iste značilnosti dela, da se zmanjša končno odstopanje meritve

Vir: Measurement Systems Analysis, Fourth Edition (prevedeno)

Gage R&R (ANOVA) Report for Razdalja 22,15

Reported by: Pintar T.

Gage name:
Date of study: 6.9.2025



Slika 39: Gage R&R – Dimenzija 22,15

Vir: (Lastni vir)

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,0010441	0,006264	3,27	6,26
Repeatability	0,0008792	0,005275	2,76	5,27
Reproducibility	0,0005632	0,003379	1,77	3,38
Operators	0,0005632	0,003379	1,77	3,38
Part-To-Part	0,0318845	0,191307	99,95	191,31
Total Variation	0,0319016	0,191410	100,00	191,41

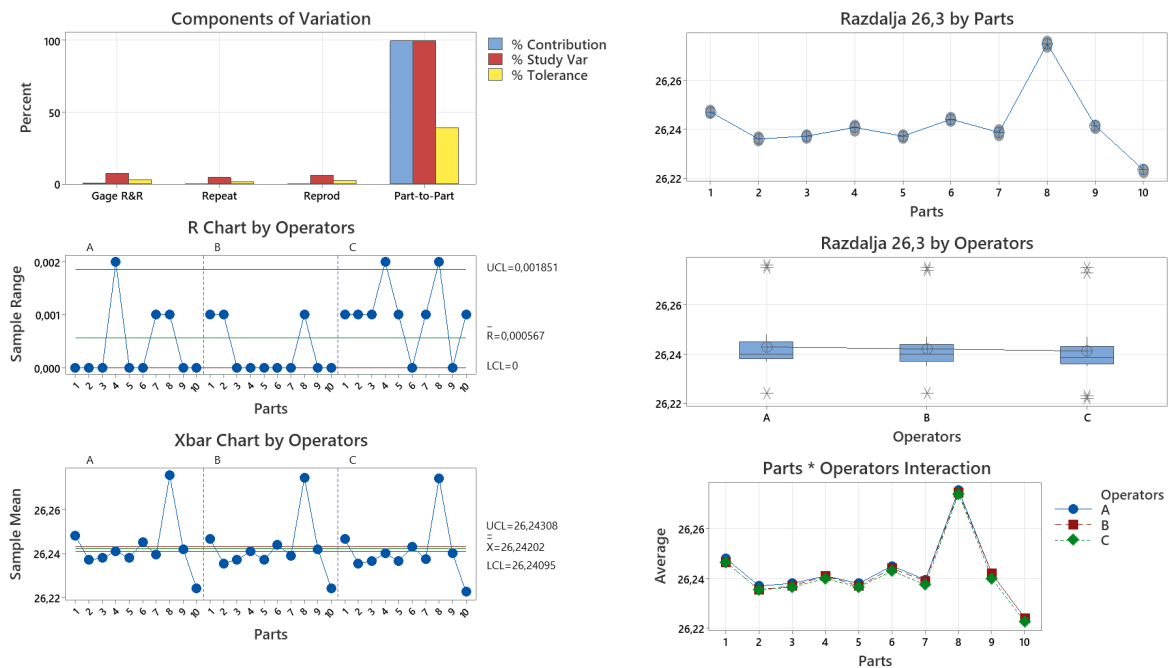
Slika 40: Gage R&R – Vrednosti dimenzije 22,15

Vir: (Lastni vir)

Gage R&R (ANOVA) Report for Razdalja 26,3

Reported by: Pintar T.

Gage name:
Date of study: 6.9.2025



Slika 41: Gage R&R – Dimenzija 26,3

Vir: (Lastni vir)

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,0009872	0,0059235	7,54	2,96
Repeatability	0,0005928	0,0035567	4,53	1,78
Reproducibility	0,0007895	0,0047368	6,03	2,37
Operators	0,0007895	0,0047368	6,03	2,37
Part-To-Part	0,0130550	0,0783297	99,72	39,16
Total Variation	0,0130922	0,0785534	100,00	39,28

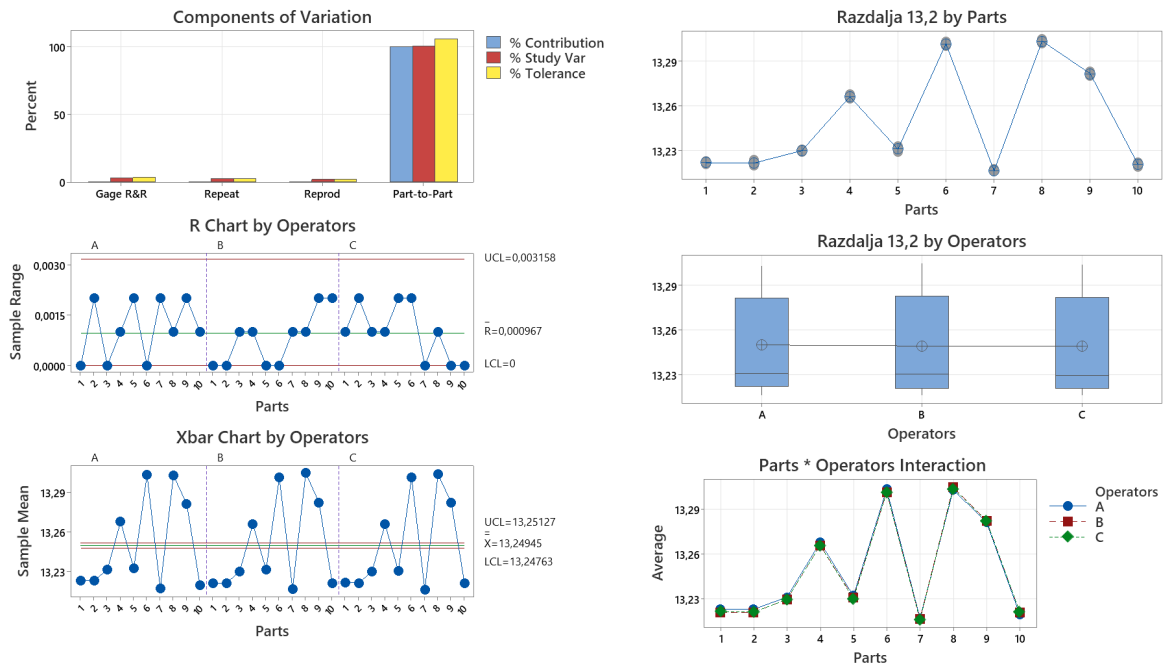
Slika 42: Gage R&R – Vrednosti dimenzije 26,3

Vir: (Lastni vir)

Gage R&R (ANOVA) Report for Razdalja 13,2

Reported by: Pintar T.

Gage name:
Date of study: 6.9.2025



Slika 43: Gage R&R – Dimenzija 13,2

Vir: (Lastni vir)

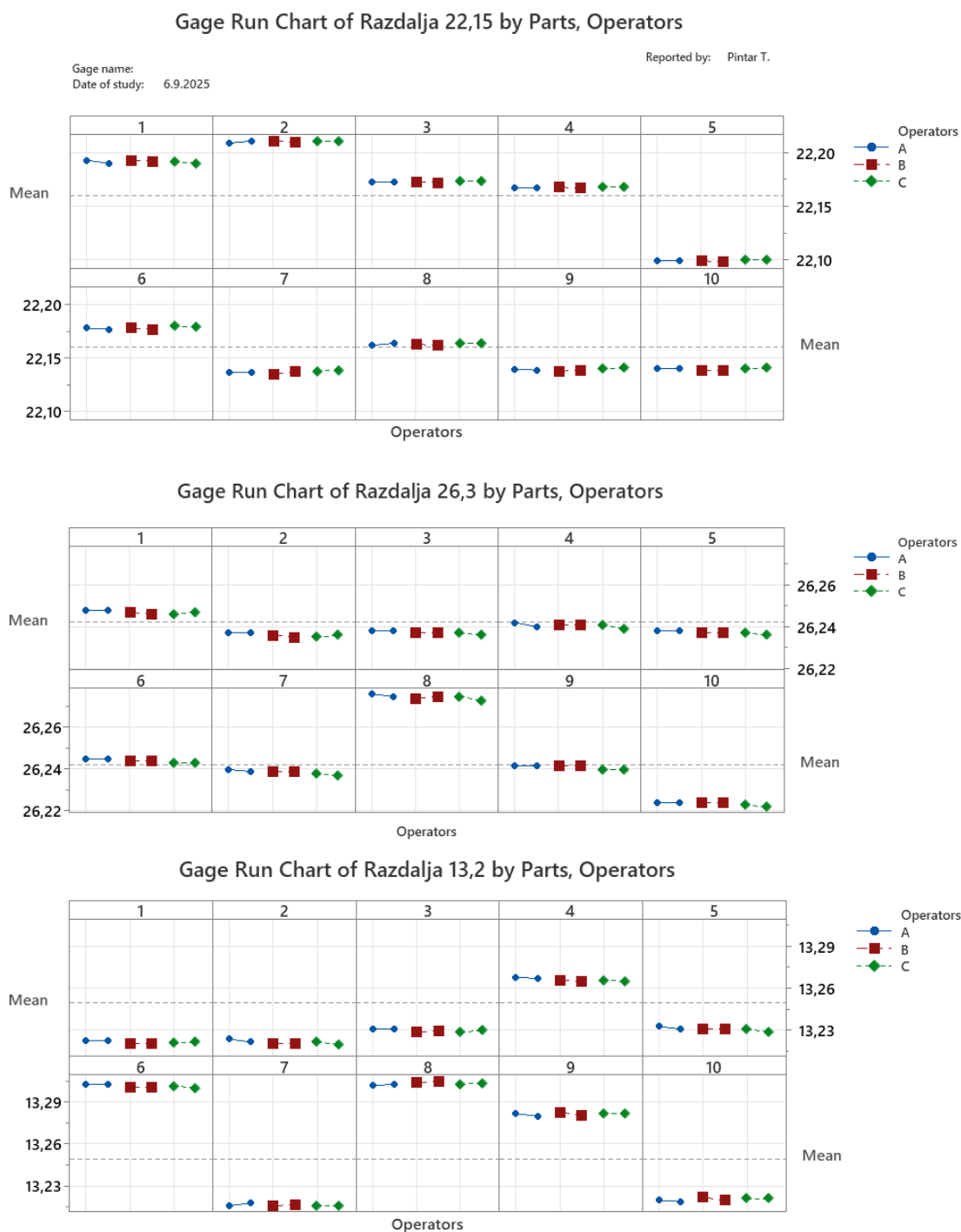
Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)	%Tolerance (SV/Toler)
Total Gage R&R	0,0011438	0,006863	3,25	3,43
Repeatability	0,0008851	0,005310	2,51	2,66
Reproducibility	0,0007246	0,004347	2,06	2,17
Operators	0,0003429	0,002058	0,97	1,03
Operators*Parts	0,0006383	0,003830	1,81	1,91
Part-To-Part	0,0351821	0,211093	99,95	105,55
Total Variation	0,0352007	0,211204	100,00	105,60

Slika 44: Gage R&R – Vrednosti dimenzije 13,2

Vir: (Lastni vir)

S sliko 45 želimo nazorneje prikazati razlike v meritvah med posameznimi kosi glede na operaterje A, B in C za vse tri opazovane dimenzije ter razpršenost meritev od celotnega povprečja.



Slika 45: Vizualni prikaz meritev operaterjev glede na merjenje

Vir: (Lastni vir)

6.4 Prva hipoteza

Vpenjalni del priprave smo zasnovali z namenom dobrega naleganja izdelka na površine naseda, kar je omogočilo ponovljivo vpetje. Dodatno smo z vzmetnimi zatiči zagotovili fiksno pozicioniranje izdelka. S tem smo ustvarili pogoje za zanesljive meritve, z analizo tipa 1 pa smo dokazali, da je merilni sistem ponovljiv, kar je tudi odraz stabilnosti vpetja izdelkov. Na podlagi rezultatov analize tipa 1 hipotezo **potrdimo**.

6.5 Tretja hipoteza

Za preverjanje te hipoteze smo analizirali merilni sistem in vpenjalno pripravo z analizo MSA Gage R&R, pri čemer smo ugotavljali ponovljivost in obnovljivost merilnega sistema. Rezultati analize so pokazali, da je Gage R&R za vsako od opazovanih dimenzij $\leq 10\%$, zato na podlagi teh podatkov hipotezo **potrdimo**.

6.6 Zanesljivost vpenjalne priprave in merilnega programa

Za zagotavljanje dolgoročne natančnosti in ponovljivosti meritev je ključnega pomena sistematično spremljanje zanesljivosti vpenjalne priprave. Referenčne meritve nasedov ter periodične meritve bodo namenjene preverjanju površin, ki so podvržene obrabi. Vključeni bodo redni pregledi vpenjalne priprave na predpisan interval, predvsem notranjih površin nasedov, saj bodo ti najbolj podvrženi obrabi pri menjavanju merjencev. Obenem se bo preverjalo morebitne poškodbe vzmetnih elementov, saj so poleg nasedov ključen del vpenjalne priprave.

Poleg tega se izvajajo redni pregledi in servisi KMS, s čimer se zagotavljata brezhibno delovanje opreme in zanesljivost merilnih rezultatov. Za odpravljanje morebitnih odstopanj so predvidene redne kalibracije s strani pooblaščenih oseb ter dodatne interne kalibracije tipal, ki služijo kot hitra preventiva pred nastankom napak pri meritvah.

Pomemben vidik zanesljivosti predstavlja tudi hitro odkrivanje in reševanje morebitnih napak še pred nastankom večjih poškodb. Tako se preprečita neuporabnost posameznih delov vpenjalne priprave in posledično neizvedba meritev v zahtevanem času med proizvodnim procesom. Vzpostavljen sistem rednega vzdrževanja, kalibracij in nadzora tako zagotavlja stabilno, ponovljivo in zanesljivo merilno okolje, ki je osnova za kakovostno izvedbo meritev in dolgoročno zaupanje v rezultate.

V primerjavi z načinom reaktivnega vzdrževanja, kjer se poškodbe in nepravilnosti rešujejo ob nastanku, se z načinom prediktivnega vzdrževanja izognemo večjim nepravilnostim še pred nastankom.

Na sliki 46 so prikazane prve meritve oblik nasedov po izdelavi. Te bodo služile kot referenca za odstopke za vse naslednje periodične meritve.

PART NAME : Proverjanje funkcijskega cilindra priprave							REV NUMBER : V1		
september 24, 2025		7:35 dop.		SER NUMBER :			STATS COUNT : 1		
FEAT	ID	AK	MEAS	NOMINAL	+TOL	-TOL	DEV	BONUS	OK
CYL_K051	VPENJALNO MESTO 1	D	30.659	30.600	0.100	0.000	0.059		
CYL_K052	VPENJALNO MESTO 2	D	30.662	30.600	0.100	0.000	0.062		
CYL_K053	VPENJALNO MESTO 3	D	30.661	30.600	0.100	0.000	0.061		
CYL_K054	VPENJALNO MESTO 4	D	30.661	30.600	0.100	0.000	0.061		
CYL_K055	VPENJALNO MESTO 5	D	30.663	30.600	0.100	0.000	0.063		
CYL_K056	VPENJALNO MESTO 6	D	30.663	30.600	0.100	0.000	0.063		
CYL_K057	VPENJALNO MESTO 7	D	30.661	30.600	0.100	0.000	0.061		
CYL_K058	VPENJALNO MESTO 8	D	30.660	30.600	0.100	0.000	0.060		
CYL_K059	VPENJALNO MESTO 9	D	30.661	30.600	0.100	0.000	0.061		
CYL_K0510	VPENJALNO MESTO 10	D	30.665	30.600	0.100	0.000	0.065		
CYL_K0511	VPENJALNO MESTO 11	D	30.662	30.600	0.100	0.000	0.062		
CYL_K0512	VPENJALNO MESTO 12	D	30.660	30.600	0.100	0.000	0.060		
CYL_K051	KROČNOST 0.1		0.010	0.000	0.100		0.010		
CYL_K052			0.005	0.000	0.100		0.005		
CYL_K053			0.003	0.000	0.100		0.003		
CYL_K054			0.007	0.000	0.100		0.007		
CYL_K055			0.003	0.000	0.100		0.003		
CYL_K056			0.006	0.000	0.100		0.006		
CYL_K057			0.002	0.000	0.100		0.002		
CYL_K058			0.002	0.000	0.100		0.002		
CYL_K059			0.003	0.000	0.100		0.003		
CYL_K0510			0.002	0.000	0.100		0.002		
CYL_K0511			0.009	0.000	0.100		0.009		
CYL_K0512			0.005	0.000	0.100		0.005		

Slika 46: Referenčne meritve

Vir: (Lastni vir)

6.7 Četrta hipoteza

Redni pregledi in servisi KMS, skupaj s kalibracijami pooblaščenih oseb ter internimi kalibracijami tipal, bodo omogočili pravočasno odkrivanje in odpravljanje odstopanj. To bo zagotovilo, da morebitne napake ne bodo vplivale na zanesljivost meritev. Poleg tega se bodo izvajali preventivni pregledi vzmetnih elementov in drugih delov vpenjalne priprave skupaj s periodičnimi meritvami pomembnih površin nasedov za preverjanje obrabe oblik. Z rednimi pregledi in morebitno menjavo vzmetnih zatičev bomo preprečili nepravilna kot tudi nestabilna vpetja izdelkov.

Sprejeti so bili ukrepi vzdrževanja, nadzora in kalibracij, ki zagotavljajo dolgoročno zaupanje v rezultate meritev ter višjo stopnjo zanesljivosti, zato hipotezo **potrdimo**.

7 POVZETKI REZULTATOV

Iz grafov lahko za analizo tipa 1 razberemo, da sta pri vseh treh dimenzijah za vseh 12 vpenjalnih mest izpolnjena pogoja za ustreznost ponovljivosti merilnega sistema $C_g \geq 1,33$ ter $C_{gk} \geq 1,33$, kar pomeni, da je ponovljivost merilnega sistema zadovoljiva. Poleg tega pa so rezultati pristranskosti minimalnih vrednosti, kar dokazuje natančnost merilnega sistema.

Največji raztros meritev je jasno viden pri grafih dimenzije 22,15, kar se tudi odraža na slabših rezultatih C_g in C_{gk} , pri dimenzijah 26,3 pa je od 16 meritev naprej viden odklon meritev navzdol, na kar bi lahko vplivala sprememba okolja v merilnici.

Hipotezo 1 smo z analizo MSA tipa 1 in na podlagi rezultatov te analize potrdili, saj se je izkazalo, da vpenjalna priprava omogoča stabilno vpetje in znatno pripomore k boljšim rezultatom MSA.

Hipotezo 2 smo preverjali na podlagi izdelanega jeklenega naseda, in sicer s testom vstavljanja ter preverjanjem naleganja površin med merjenci in nasedi ter stabilnosti vpetja. Hkrati je test pokazal enostavnejše in predvsem lažje vpenjanje merjencev, kar bo povečalo produktivnost. Hipotezo smo potrdili.

Analiza Gage R&R

Dimenzija 22,15

Glavni vir variacije je razlika med kosi, kar je tudi želeni rezultat. To pomeni, da sistem dobro razlikuje med merjenci. R-graf po operaterjih prikazuje razpone meritev za posamezne kose in operaterje, povprečni razpon meritev je 0,000867 mm, kar prikazuje dobro ponovljivost. Pri grafu po operaterjih so povprečja meritev različnih operaterjev zelo podobna, brez vidnih odstopanj. To pomeni, da operaterji merijo konsistentno in da v sistemu ni prisotne pristranskosti. Tudi X-bar graf potrjuje stabilnost in ponovljivost meritev med operaterji. V podatkih ni zaznati trendov ali posebnih vzorcev, ki bi kazali na težave z merilnim sistemom. Interakcijski graf kosi $\times$ operatorji prikazuje primerjavo povprečij meritev posameznih kosov med različnimi operaterji. Ker se simboli, ki odražajo posamezne operaterje, prekrivajo ali minimalno odstopajo, pomeni, da operaterji kose merijo na zelo podoben način brez večjih opaznih razlik.

Numerični izračun Gage R&R potrjuje ugotovitve grafične analize, saj vrednosti kažejo na to, da glavni vir variacije izhaja iz kosov, ne pa iz merilnega sistema. Na podlagi izračuna Gage R&R = 3,27 % lahko sklenemo, da je merilni sistem za dimenzijo 22,15 primeren, saj je rezultat manjši od 10 %, kar je mejna vrednost za ustreznost merilnega sistema.

Dimenzija 26,3

Analiza je pokazala, da glavni del celotne variacije izhaja iz razlik med kosi. Tudi pri tej dimenziji je glavni vir variabilnosti sam proces, kar je pozitiven rezultat. Povprečni razpon meritev na R-grafu je za to dimenzijo 0,000567 mm, kar tudi potrjuje ponovljivost merilnega sistema. Operaterji A, B in C imajo glede na graf po operaterjih zelo podobna povprečja in razpone meritev, nekaj pristranskosti je mogoče zaznati pri operaterju C. Interakcijski graf prikazuje primerna povprečja meritev med operaterji, z manjšimi odstopanji meritev operaterja C.

Na podlagi vseh rezultatov in izračuna sklenemo, da je merilni sistem tudi za to dimenzijo ustrezen, saj je Gage R&R = 7,54 %.

Dimenzija 13,2

Tudi pri analizi za to dimenzijo se je pokazalo, da je glavni vir variacije razlika med kosi, medtem ko je prispevek merilnega sistema majhen. Ponovljivost meritev po R-grafu je ustrezna tudi pri tej dimenziji, saj je povprečen razpon le 0,000967 mm. Na grafu pri operaterjih je opaziti podobna povprečja meritev, razpon meritev je pri vseh razmeroma velik, vendar brez večjih razlik med samimi operaterji, kar potrjuje, da ni prisotne pristranskosti. Pri interakcijskem grafu ni opaziti vidnih razlik med samimi povprečji meritev med operaterji, kar kaže na usklajenost operaterjev pri merjenju.

Rezultat izračuna Gage R&R = 3,25 % je manjši od 10 %, kar tudi za ta primer potrди ustreznost merilnega sistema.

Hipotezo 3 smo na podlagi rezultatov Gage R&R, ki je pokazala vrednosti, manjše od 10 % za vse opazovane dimenzije, potrdili.

Hipotezo 4 smo na podlagi uvedbe sistema periodičnih preverjanj in meritev, rednih kalibracij KMS ter preventivnega vzdrževanja vpenjalne priprave potrdili.

8 SKLEP

V sklopu diplomskega dela sem raziskal in odgovoril na vse zastavljene hipoteze, katerih rezultate sem podrobneje opisal v povzetkih rezultatov ter skozi celotno diplomsko delo. Na podlagi pridobljenih podatkov sem vse hipoteze tudi potrdil, kar dokazuje, da so bili cilji izboljšave procesa doseženi.

Z izvedeno raziskavo in praktično izvedbo sem dokazal, da je mogoče konstruirati vpenjalno pripravo, ki izpolnjuje tehnične zahteve ter omogoča stabilno in ponovljivo vpenjanje merjencev. Funkcionalnost priprave je bila preverjena s testiranjem v realnih pogojih uporabe, kjer sta bili potrjeni ustrezna natančnost in zanesljivost delovanja (**RV1**). Z novim optimiziranim merilnim programom kot tudi analizama tipa 1 ter Gage R&R sem dokazal, da je uporabljena merilna metoda ponovljiva, natančna (**RV1**) in primerna za vključitev v proizvodni proces.

Glede na sodobne trende v merilni tehnologiji in proizvodnih procesih, kjer vse bolj stremijo k avtomatizaciji in uporabi statističnih metod za zagotavljanje kakovosti, omenjena raziskava prispeva k razumevanju praktične implementacije rešitev, ki prinašajo tako tehnične kot ekonomske koristi.

Z ekonomskega vidika raziskava in vpeljava izboljšav prinašata več prednosti podjetju. S krajšanjem časa meritev se zmanjšuje neproduktivni čas operaterjev, omogoča se hitrejša prilagoditev proizvodnih strojev na podlagi hitrih meritev in izboljšuje izkoristek merilne opreme. Dolgoročno to pomeni znižanje stroškov na enoto izdelka in povečanje skupne produktivnosti. Izboljšani in optimizirani parametri proizvodnih strojev na podlagi meritev povečujejo učinkovitost in zanesljivost proizvodnje ter zmanjšujejo stroške morebitnih napak, s tem pa zmanjšajo možnost reklamacij, kar pa ne nazadnje pomeni manj stroškov. Poleg tega so natančne meritve ključne za zagotavljanje kakovosti končnih izdelkov, kar ima dolgoročno pozitiven vpliv na zadovoljstvo strank in konkurenčnost podjetja.

Rezultati raziskave niso pomembni le za konkretno podjetje, temveč se lahko uporabijo tudi v drugih industrijskih panogah, kjer so natančnost, ponovljivost in stabilnost ključni dejavniki v procesu. Pristop, ki združuje konstrukcijske izboljšave, optimizacijo merilnih metod in uporabo statističnih analiz, predstavlja primer dobre prakse pri uvedbi sodobnih metod zagotavljanja kakovosti. V današnjem industrijskem okolju, ki je vse bolj usmerjeno v avtomatizacijo, digitalizacijo in podatkovno podprto odločanje, so takšne rešitve nadvse dragocene. Prispevajo

ne le k večji učinkovitosti, temveč tudi k trajnostnemu poslovanju podjetij, saj zmanjšujejo porabo časa, materiala in energije.

Celotno delo tako predstavlja pomemben korak k večji vključitvi sodobnih merilnih metod in analitskih pristopov v proizvodne procese, hkrati pa potrjuje, da je sistematičen in podatkovno podprt pristop ključen za doseganje trajnostne kakovosti ter konkurenčnosti v industrijskem okolju.

Izvedba raziskave mi je omogočila poglobljeno razumevanje pomena načrtovanja merilnih postopkov ter mi ponudila vpogled v praktične izzive, s katerimi se inženirji srečujejo pri prenosu teoretičnih rešitev v realno proizvodno okolje. Spoznal sem, kako pomembno je, da so procesne izboljšave podprte z dejanskimi podatki, preverljivimi analizami in premišljenim načrtovanjem, saj takšne rešitve prinašajo dolgoročno vrednost. Pri delu sem pridobil dragocene izkušnje pri povezovanju konstrukcijskega načrtovanja, merilne tehnike in statistične analize, kar bo pomembno prispevalo k mojemu nadaljnjemu strokovnemu razvoju.

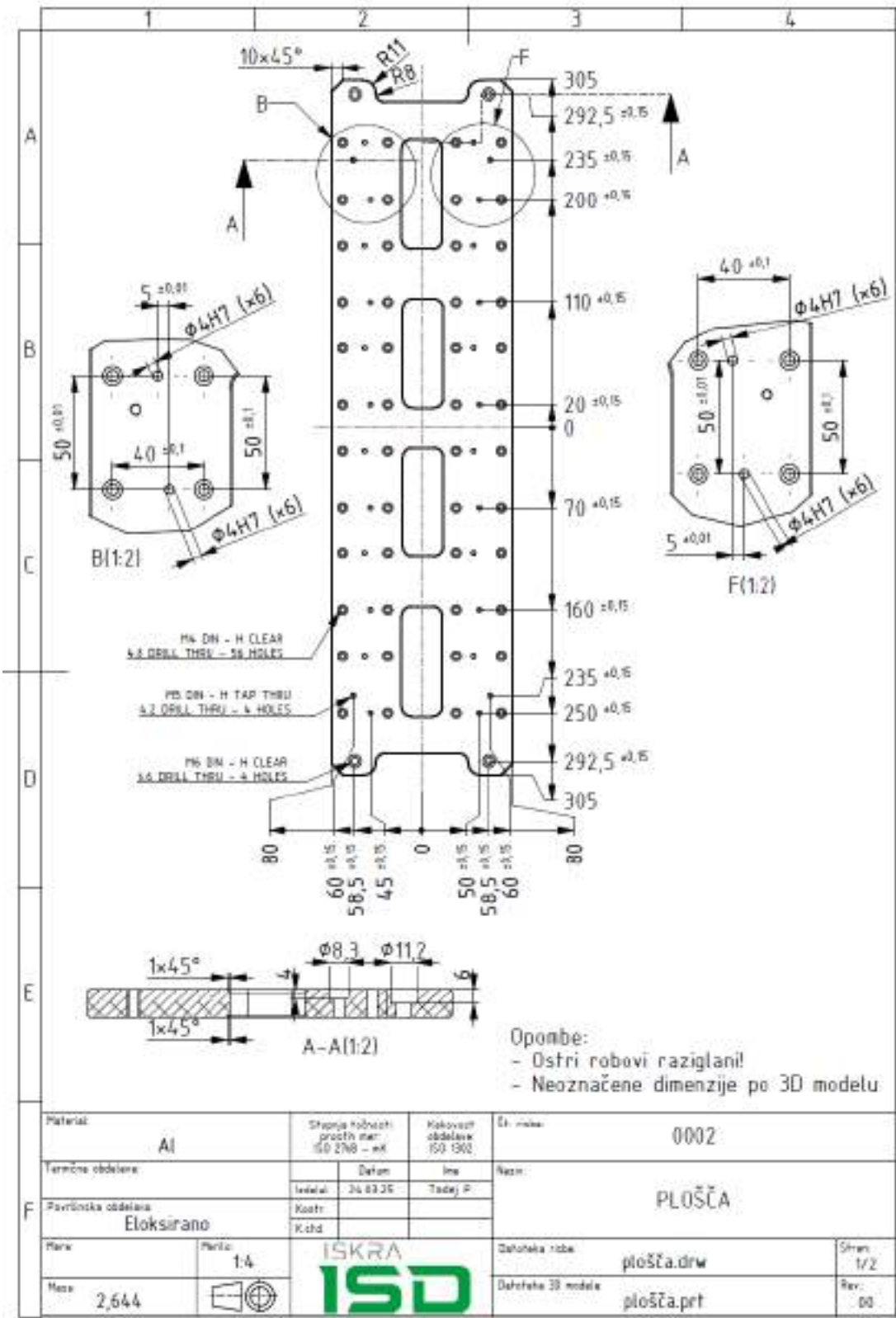
Na podlagi izvedene raziskave in implementacije nove merilne priprave lahko zaključim, da je diplomsko delo pomembno prispevalo k razvoju in optimizaciji merilnega procesa ter podjetju prineslo koristi tako na tehnični kot ekonomski ravni. Doseženi rezultati analize potrjujejo, da je kombinacija konstrukcije vpenjalne priprave, optimiziranih merilnih metod ter statistične analize učinkovita pot do izboljšane natančnosti, zanesljivosti in produktivnosti merilnih procesov v sodobni industriji.

9 VIRI IN LITERATURA

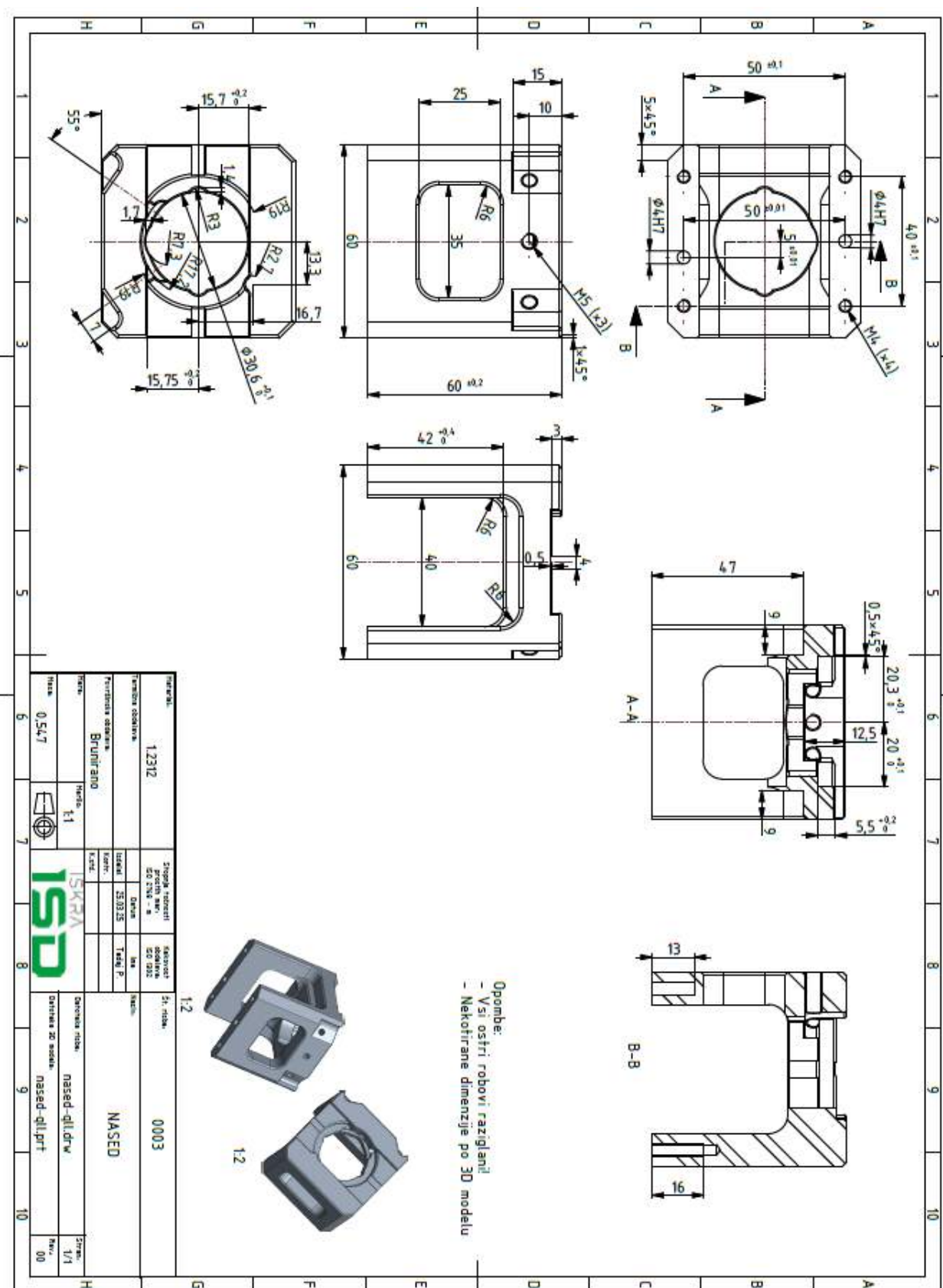
- AIAG. (2010). *Measurement System Analysis MSA, Reference manual, Fourth Edition*.
- Capvidia. (2023). *MSA explained: 2023 guide*. Pridobljeno 10. Junij 2025 iz <https://www.capvidia.com/blog/msa-guide>.
- DIN. (1987). *DIN 7167:1987-01 - Relationship between tolerances of size, form, and parallelism; envelope requirement without individual indication on the drawing*.
- Iskra ISD. (2025). *O podjetju*. Pridobljeno 7. Julij 2025 iz <https://iskra-isd.com/about>.
- ISO. (1989). *ISO 2768-2:1989 – General tolerances - Part 2: Geometrical tolerances for features without individual tolerance indications*.
- ISO. (2021). *ISO 21920-1:2021 - Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Profile - Part 1: Indication of surface texture*.
- ISO. (2021). *ISO 22081:2021 - Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing - General geometrical specifications and general size specifications*.
- Mantel, M. R. (1993). *V Coordinate Measuring machines: A Modern inspection Tool in Coordinate measuring machines (Master's thesis)*. New Jersey Institute of Technology.
- Minitab. (2025). *All statistics and graphs*. Pridobljeno 3. September 2025 iz <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/how-to/gage-study/type-1-gage-study/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/>
- Pahl, G., Beitz, W., Jorg, F., & Grote, K.-H. (2007). *A Systematic Approach, Third Edition. V Engineering Design*. Springer.
- Rolls-Royce. (2013). *Measurement System Analysis, How-to Guide, Version 6.1*.
- SIST. (2017). *SIST EN ISO 1101:2017 - Specifikacija geometrijskih veličin izdelka (GPS)*.
- ZEISS. (2025). *Industrijski računalniški tomograf*. Pridobljeno 6. Avgust 2025 iz <https://www.zeiss.si/metrology/sistemi/x-ray/3d-x-ray/metrotom-1500.html#Applications>.
- ZEISS. (2025). *Mostni koordinatni merilni stroji*. Pridobljeno 6. Avgust 2025 iz <https://www.zeiss.si/metrology/sistemi/kms/mostni-kms/druzina-prismo.html>.

10 PRILOGE

Priloga 1: Risba osnovne plošče



Priloga 2: Risba naseda



Priloga 3: Risba podložne noge

