

# Prihvat modela zrakoplova za ispitni postav zračnog tunela

---

Jureša, Marko

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:924042>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-18**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Marko Jureša**

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Miho Klaić, mag. ing.

Student:

Marko Jureša

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Mihi Klaiću, mag. ing. za uspješnu realizaciju ovog rada. Svojim trudom, uložnim vremenom, strpljenjem i spremnošću na pomoć u svakom trenutku uvelike je olakšao izradu ovog rada te ga učinio sjajnim iskustvom.

Također se želim zahvaliti obitelji i prijateljima na kontinuiranoj podršci tijekom čitavog trajanja studija.

Marko Jureša



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

|  |        |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |        |
| Datum  | Prilog |
| Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1                                 |        |
| Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -                                    |        |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Marko Jureša** JMBAG: **0035229444**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Prihvat modela zrakoplova za ispitni postav zračnog tunela**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Aircraft model holder for the wind tunnel testbed**

Opis zadatka:

Projekt revitalizacije zračnog tunela zajednički je projekt Katedre za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje te Zavoda za aeronautiku Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. U sklopu dosadašnjih aktivnosti realiziran je eksperimentalni postav, osmišljen je i izrađen upravljački sustav te je razvijena programska podrška navedenog postava. Mjerenja se vrše s trokomponentnim senzorom sila na koji treba ugraditi ispitni model zrakoplova. Da bi postav bio cjelovit i spreman za ispitivanja i istraživanja u ovom radu je potrebno:

1. Dati idejno konstrukcijsko rješenje prihvata modela zrakoplova
2. Raspisati tehnologiju izrade navedenog dijela
3. Dovršiti upravljački ormar sa svim potrebnim ožičenjem.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

30. 11. 2022.

1. rok: 20. 2. 2023.  
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.  
3. rok: 18. 9. 2023.

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.  
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.  
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Miho Klaić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| POPIS SLIKA .....   | III  |
| POPIS TABLICA.....  | V    |
| POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....                                      | VI   |
| POPIS KRATICA .....   | VII  |
| POPIS OZNAKA .....  | VIII |
| SAŽETAK.....  | IX   |
| SUMMARY .....   | X    |
| 1. UVOD.....  | 1    |
| 1.1. Zračni tunel za mjerenje sila na modelu zrakoplova.....            | 2    |
| 1.2. Opis ispitnog postava Fakulteta prometnih znanosti .....           | 3    |
| 1.2.1. Senzor sila .....  | 4    |
| 2. KORIŠTENI PROGRAMSKI PAKET I STROJEVI .....                          | 5    |
| 2.1. CATIA .....  | 5    |
| 2.2. Korišteni strojevi.....  | 5    |
| 2.2.1. Trens SBL 500 CNC tokarski obradni centar .....                  | 5    |
| 2.2.2. Laboratorijska 3-osna CNC glodalica.....                         | 6    |
| 3. ZAVRŠNA IZRADA UPRAVLJAČKOG ORMARA .....                             | 8    |
| 3.1. Ugradnja metlica na poklopac upravljačkog ormara .....             | 8    |
| 3.2. Montaža glavne sklopke i tipkala na vrata upravljačkog ormara..... | 10   |
| 3.3. Ugradnja temeljne ploče u upravljački ormar .....                  | 11   |
| 4. UGRADNJA RAZVODNE KUTIJE .....                                       | 12   |
| 5. OBRADA POZICIJA EKSPERIMENTALNOG POSTAVA .....                       | 13   |
| 5.1. Prirubnica stezne glave .....                                      | 14   |
| 5.2. Bušenje stezne glave .....   | 16   |
| 5.3. Prihvat senzora za mjerenje sila.....                              | 17   |
| 5.4. Prihvat modela zrakoplova.....                                     | 18   |

---

|   |    |
|---|----|
| 6. IZRAĐEN ZRAČNI TUNEL SPREMAN ZA ISPORUKU ..... | 19 |
| 7. ZAKLJUČAK.....                                 | 20 |
| LITERATURA.....                                   | 21 |
| PRILOZI.....                                      | 22 |

---

**POPIS SLIKA**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Strujanje zraka oko loptice za tenis [2] .....                             | 1  |
| Slika 2.  | Virtualna simulacija pomoću računalne dinamike fluida [3] .....            | 2  |
| Slika 3.  | Ispitivanje modela zrakoplova u zračnom tunelu NASA-e [2] .....            | 2  |
| Slika 4.  | Model ispitnog postava zračnog tunela .....                                | 3  |
| Slika 5.  | ATI Mini 27 Titanium mjerna ćelija [7] .....                               | 4  |
| Slika 6.  | Trens SBL 500 CNC tokarski obradni centar .....                            | 6  |
| Slika 7.  | Laboratorijska 3-osna CNC glodalica .....                                  | 7  |
| Slika 8.  | Model držača metlice .....   | 8  |
| Slika 9.  | Pogled na metlice na poklopcu upravljačkog ormara izvana .....             | 9  |
| Slika 10. | Pogled na metlice na poklopcu upravljačkog ormara iznutra .....            | 9  |
| Slika 11. | Poklopac upravljačkog ormara izvana .....                                  | 9  |
| Slika 12. | Poklopac upravljačkog ormara iznutra .....                                 | 10 |
| Slika 13. | Sklopka i tipkala na vratima upravljačkog ormara .....                     | 10 |
| Slika 14. | Temeljna ploča u upravljačkom ormaru .....                                 | 11 |
| Slika 15. | Zaštita ožičenja do sklopke i tipkala na vratima upravljačkog ormara ..... | 11 |
| Slika 16. | Razvodna kutija .....  | 12 |
| Slika 17. | Ugrađena razvodna kutija .....   | 12 |
| Slika 18. | Sklop izrađenih dijelova .....   | 13 |
| Slika 19. | Model prirubnice .....   | 14 |
| Slika 20. | Stežanje priprema u CNC tokarski obradni centar .....                      | 14 |
| Slika 21. | Izrada utora na CNC glodalici .....  | 15 |
| Slika 22. | Rezanje prirubnice na tračnoj pili .....                                   | 15 |
| Slika 23. | Prirubnica .....   | 16 |



---

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 24. | Stezanje stezne glave u CNC tokarski obradni centar.....     | 16 |
| Slika 25. | Probušena stezna glava.....                                  | 17 |
| Slika 26. | Model prirubnice za prihvat senzora sila .....               | 17 |
| Slika 27. | Izrađena i ugrađena prirubnica za prihvat senzora sila ..... | 18 |
| Slika 28. | Model prihvata modela zrakoplova .....                       | 18 |
| Slika 29. | Izrađen postav zračnog tunela .....                          | 19 |
| Slika 30. | Pogled na ispitni postav i upravljački sustav.....           | 19 |

## POPIS TABLICA

|   |   |
|---|---|
| Tablica 1. Tehnički podaci ATI Mini 27 Titanium mjerne ćelije [7].....      | 4 |
| Tablica 2. Karakteristike Trens SBL 500 CNC tokarskog obradnog centra ..... | 6 |
| Tablica 3. Karakteristike laboratorijske 3-osne CNC glodalice.....          | 6 |

---

## POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

|                  |                                    |
|------------------|------------------------------------|
| MJ-ZR-022023-001 | Držač metlice                      |
| MJ-ZR-022023-002 | Prirubnica                         |
| MJ-ZR-022023-003 | Inox cijev                         |
| MJ-ZR-022023-004 | Prirubnica za prihvat senzora sila |
| MJ-ZR-022023-005 | Prihvat modela zrakoplova          |

## **POPIS KRATICA**

|       |  |
|-------|--|
| CFD   | Computational fluid dynamics                             |
| CNC   | Computer numerical control                               |
| CATIA | Computer-aided three-dimensional interactive application |
| CAD   | Computer aided design                                    |
| CAM   | Computer aided manufacturing                             |
| CAE   | Computer aided engineering                               |
| PLM   | Product lifecycle management                             |

---

**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Jedinica</b> | <b>Opis</b>                       |
|---------------|-----------------|-----------------------------------|
| $F_x$         | N               | Komponenta sile u smjeru x osi    |
| $F_y$         | N               | Komponenta sile u smjeru y osi    |
| $F_z$         | N               | Komponenta sile u smjeru z osi    |
| $M_x$         | Nm              | Komponenta momenta u smjeru x osi |
| $M_y$         | Nm              | Komponenta momenta u smjeru y osi |
| $M_z$         | Nm              | Komponenta momenta u smjeru z osi |

## **SAŽETAK**

U sklopu ovog završnog rada dovršen je projekt revitalizacije postojećeg zračnog tunela, koji je bio proveden od strane Katedre za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje te Zavoda za aeronautiku Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu. U svrhu dovršavanja ispitnog postava postojećeg zračnog tunela te isporuke naručitelju dovršen je upravljački ormar, ugrađena je razvodna kutija pojačala senzora sila, izrađeni su 3D modeli preostalih pozicija te i same fizičke pozicije koje su zatim ugrađene na zračni tunel. Dano je idejno konstrukcijsko rješenje prihvata modela zrakoplova na senzor sila.

Ključne riječi: zračni tunel, dovršavanje, isporuka naručitelju, upravljački ormar, 3D model, izrada pozicija, prihvata modela zrakoplova

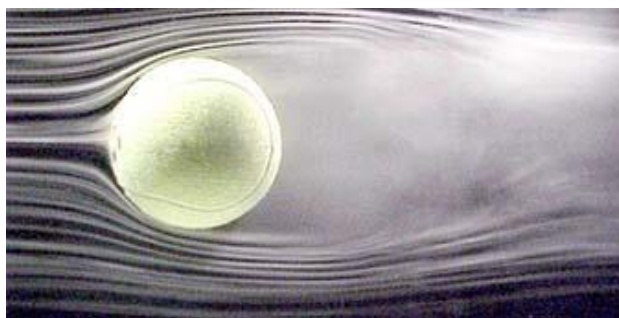
**SUMMARY**

As part of this final work, the revitalization project of the existing wind tunnel was completed which was carried out by the Department of Machine Tools, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture and the Department of Aeronautics, Faculty of Transport and Traffic Sciences, University of Zagreb. For the purpose of completing the test setup of the existing wind tunnel and delivering it to the customer, the control cabinet was completed, the distribution box of the force sensor amplifier was installed, 3D models of the remaining positions and the physical positions themselves were made, which were then installed on the wind tunnel. The conceptual design solution for accepting the aircraft model on the force sensor is given.

Key words: wind tunnel, completion, delivery to the customer, control cabinet, 3D model, making of positions, aircraft model acceptance

## 1. UVOD

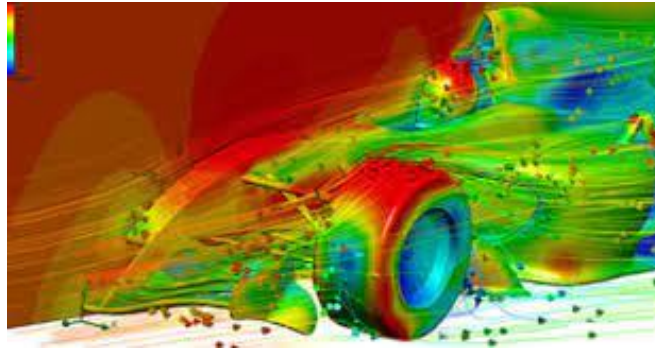
Zračni tunel služi za proizvodnju kontrolirane struje zraka u svrhu proučavanja prirode strujanja zraka oko tijela kao i njegove učinke na to tijelo. Neki zračni tuneli mogu prihvatiti i ispitivati modele u stvarnoj veličini, međutim zbog praktičnosti i troškova većina je izgrađena za umanjene modele. Služe za testiranje padobrana, automobila, zrakoplova, svemirskih letjelica, projektila, dronova, odnosno svih inženjerskih konstrukcija kojima je bitan učinak strujanja zraka oko tijela. Na slici 1. može se vidjeti strujanje zraka oko loptice za tenis. Ubrizgavanjem dima ili boje u struje zraka, možemo vizualizirati karakteristike strujanja zraka oko modela zrakoplova „čineći nevidljivi zrak vidljivim“. Zračni tuneli nisu ograničeni samo na vozila i predmete. Primjenjuju se i za testiranje aerodinamičkog otpora sportaša pri promjeni položaja tijela tijekom sportske aktivnosti. [1] [2]



Slika 1. Strujanje zraka oko loptice za tenis [2]

Prije pojave računalom potpomognutog dizajniranja, usavršavanje dizajna zahtijevalo je izradu uzastopnih modela koji su zatim išli na ispitivanje u zračni tunel. To je dodavalo velike troškove te dugo vrijeme ispitivanja i usavršavanja dizajna modela. Pojavom alata za računalnu dinamiku fluida (CFD) proces ispitivanja se uveliko ubrzao jer su inženjeri mogli virtualno testirati velik broj dizajna. Slika 2. prikazuje virtualnu simulaciju pomoću računalne dinamike fluida. Na samom kraju, samo konfiguracije dizajna koje najviše obećavaju odlaze na fizičko ispitivanje u zračni tunel. Time se uvelike smanjuju troškovi razvoja. [2]





**Slika 2.** Virtualna simulacija pomoću računalne dinamike fluida [3]

### **1.1. Zračni tunel za mjerenje sila na modelu zrakoplova**

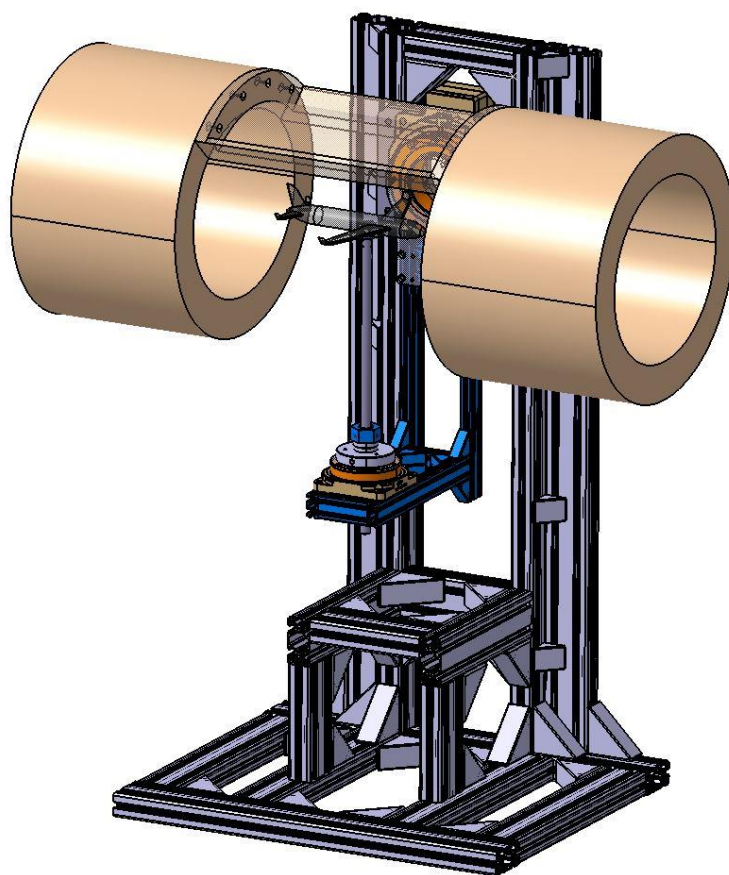
Kako bi se dobio uvid u aerodinamička svojstva zrakoplova, provodi se ispitivanje aerodinamičkih svojstava na umanjenom modelu zrakoplova u zračnom tunelu. Model zrakoplova postavlja se u tunel na način da mu se osigura krutost i stalni položaj tijela u prostoru. Zatim se kroz tunel, najčešće pomoću velikih ventilatora, pušta struja zraka koja struji oko modela zrakoplova te na taj način dobijemo uvid u aerodinamičke sile poput otpora i uzgona, koje djeluju na model zrakoplova, pomoću raznih mjernih uređaja za mjerenje opterećenja. Rezultat ispitivanja jest aerodinamičniji dizajn zrakoplova odnosno povećan uzgon i smanjen otpor što za posljedicu ima uštedu goriva. Na slici 3. prikazano je ispitivanje modela zrakoplova u zračnom tunelu NASA-e. [1] [2]



**Slika 3.** Ispitivanje modela zrakoplova u zračnom tunelu NASA-e [2]

## 1.2. Opis ispitnog postava Fakulteta prometnih znanosti

Zavod za aeronautiku Fakulteta prometnih znanosti Sveučilišta u Zagrebu provodi projekt izrade ispitnog postava zračnog tunela u suradnji s Katedrom za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, čiji se model može vidjeti na slici 4. U sklopu dosadašnjih aktivnosti razvijen je dvo-osni rotacijski posmični prigon za precizno pozicioniranje modela letjelice u zračnom tunelu. Središnji dio upravljačkog sustava čini softver otvorene arhitekture LinuxCNC, dok se komunikacija između upravljačkog računala i ostalih dijelova sustava ostvaruje pomoću EtherCAT sabirnice. [4] Razvijeno je grafičko sučelje koje omogućava upravljanje ispitnim postavom, odnosno precizno pozicioniranje modela letjelice. [5] Izrađene su prirubnice reduktora GSN 130-10K-SV i GSN 200-10K-SV te montažna ploča. [6] U ovom radu nastavljen je proces izrade ispitnog postava zračnog tunela te je u tu svrhu dano idejno konstrukcijsko rješenje prihvata modela zrakoplova na senzor sile, raspisana tehnologija izrade navedenog dijela te je dovršen upravljački ormar sa svim potrebnim ožičenjem.



Slika 4. Model ispitnog postava zračnog tunela

### 1.2.1. Senzor sila

Sile uzrokovane strujanjem zraka mjere se pomoću 6-osne piezoelektrične mjerne ćelije prikazane na slici 5. Glavne karakteristike mjerne ćelije su male dimenzije  $\text{Ø}27 \times 18,2$  mm, mala masa 0,0334 kg, vrlo fina razlučivost (može razlučiti do 0,06 N), izrazito visoka čvrstoća zbog titana razreda 5, velike dopuštene vrijednosti preopterećenja jedne osi u iznosu 7,4 – 15,0 nazivnog kapaciteta, velik omjer signala i samog šuma (silikonski mjerači daju 75 puta jači signal od konvencionalnih mjerača s folijom) te gotovo nulto izobličenje šuma. Najčešće se primjenjuje kod biomehaničkih istraživanja, mjerenja u jakom magnetskom okruženju te u medicini. Glavni tehnički podaci prikazani su u tablici 1. [7]



Slika 5. ATI Mini 27 Titanium mjerna ćelija [7]

Tablica 1. Tehnički podaci ATI Mini 27 Titanium mjerne ćelije [7]

|            | Mjerno područje | Rezolucija mjerjenja | Jednoosno preopterećenje |
|------------|-----------------|----------------------|--------------------------|
| $F_x, F_y$ | $\pm 80$ N      | 0,06 N               | $\pm 1500$ N             |
| $F_z$      | $\pm 160$ N     | 0,12 N               | $\pm 4600$ N             |
| $M_x, M_y$ | $\pm 4$ Nm      | 0,0015 Nm            | $\pm 30$ Nm              |
| $M_z$      | $\pm 2$ Nm      | 0,001 Nm             | $\pm 40$ Nm              |

---

## 2. KORIŠTENI PROGRAMSKI PAKET I STROJEVI

Prije početka modeliranja te same izrade preostalih dijelova i dovršavanja već unaprijed započetih dijelova, dan je pregled programskih alata i strojeva korištenih pri izradi ovog završnog rada. U nastavku su opisani korišteni programski paket i strojevi.

### 2.1. CATIA

Modeliranje pozicija ovog rada odrađeno je u softverskom paketu Catia razvijenog od strane francuske kompanije Dassault Systemes, kod kojeg su na raspolaganju moćni i intuitivni alati za oblikovanje, analizu, vizualizaciju te realizaciju i najkompleksnijih proizvoda. Primjenjuje se kod računalom potpomognutog projektiranja (CAD), računalom potpomognute proizvodnje (CAM), računalom potpomognutog inženjerstva (CAE), 3D modeliranja i upravljanja životnim ciklusom proizvoda (PLM). Pomoću Catia-e inženjeri mogu dobiti uvid u ključne čimbenike kvalitete i performansi rano u fazi razvoja proizvoda. [8] [9] [10]

### 2.2. Korišteni strojevi

U svrhu izrade pozicija za ovaj završni rad korišteni su Trens SBL 500 CNC tokarski obradni centar, laboratorijska 3-osna CNC glodalica, tračna pila te razni ručni alati. Svi strojevi nalaze se u laboratoriju Katedre za alatne strojeve. Pozicije su zbog jednostavne geometrije na CNC tokarskom obradnom centru i glodalici izrađene ručnim programiranjem te ciklusima koji su dostupni u upravljačkoj jedinici CNC alatnog stroja.

#### 2.2.1. Trens SBL 500 CNC tokarski obradni centar

Operacije tokarenja provedene su na Trens SBL 500 CNC tokarskom obradnom centru prikazanom na slici 6., dok su karakteristike stroja vidljive u tablici 2.

**Tablica 2. Karakteristike Trens SBL 500 CNC tokarskog obradnog centra**

|                                    |                        |
|------------------------------------|------------------------|
| Maksimalni broj okretaja vretena   | 4200 min <sup>-1</sup> |
| Maksimalna obradna posmična brzina | 10 000 mm/min          |
| Maksimalna brzina brzog hoda       | 20 000 mm/min          |
| Maksimalni broj alata              | 12                     |
| Veličina prihвата alata            | 25x25 mm               |

**Slika 6. Trens SBL 500 CNC tokarski obradni centar**

### 2.2.2. Laboratorijska 3-osna CNC glodalica

Operacije glodanja provedene su na laboratorijskoj CNC glodalici prikazanoj na slici 7., dok su karakteristike stroja vidljive u tablici 3.

**Tablica 3. Karakteristike laboratorijske 3-osne CNC glodalice**

|  |                          |
|--|--------------------------|
| Maksimalna posmična brzina               | 5 000 mm/min             |
| Maksimalna posmična brzina u obradi      | 5 000 mm/min             |
| Maksimalna brzina vrtnje glavnog vretena | 12 000 min <sup>-1</sup> |



**Slika 7. Laboratorijska 3-osna CNC glodalica**

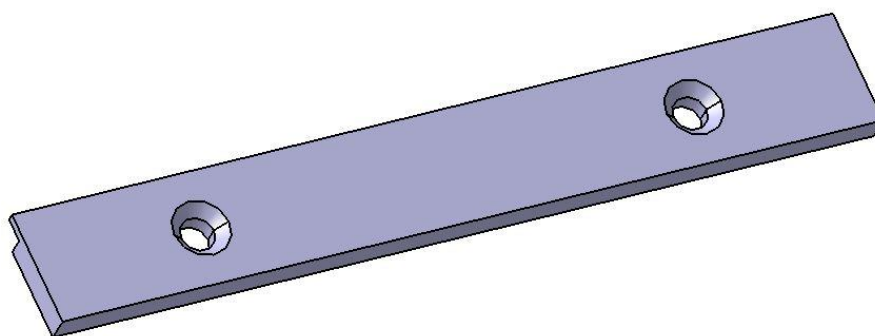


### 3. ZAVRŠNA IZRADA UPRAVLJAČKOG ORMARA

Za kompletiranje upravljačkog ormara prije ugradnje temeljne ploče sa elementima upravljačkog sustava, potrebno je prilagoditi sam upravljački ormar. Na poklopcu koji se nalazi na dnu ormara napravljen je otvor kroz kojeg će se provući vodiči od temeljne ploče do samog zračnog tunela. Inače je uvriježena praksa da se na dnu ili na vrhu elektro ormara postavljaju uvodnice koje služe za prihvat i sigurno „uvođenje“ vodiča u ormar, ovdje je napravljena mala izmjena. Umjesto uvodnica korištena je tzv. metlica koja dopušta čestu izmjenu ožičenja prema van koje je potrebno često provoditi zbog različitosti provođenja eksperimenata na ispitnom postavu. Na vrata upravljačkog ormara ugrađena je grebenasta sklopka i tipkala. Te je na kraju u upravljački ormar ugrađena temeljna ploča.

#### 3.1. Ugradnja metlica na poklopac upravljačkog ormara

Na poklopcu ormara koji se nalazi na dnu ugrađene su metlice kako bi se kroz njih mogli provući vodiči, a kako bi bila omogućena česta izmjena ožičenja. Na slici 8. prikazan je model držača metlice.



Slika 8. Model držača metlice

Držači metlica izrađeni su od aluminija AlMgSi0,5 na laboratorijskoj CNC glodalici. Na poklopcu ormara izrezan je utor potrebnih dimenzija te su skošeni bridovi kako ne bi bilo oštih rubova. Slijedilo je bušenje provrta na poklopcu preko kojih su se vijcima držači metlica pričvrstili na poklopac ormara. Na samom kraju uslijedilo je rezanje metlica na potrebnu duljinu te sklapanje. Svaki držač metlica je pričvršćen pomoću dva vijka ISO 10642 M5x16 mm,

podložnih pločica ISO 7089 te matica ISO 10511 M5. Na slici 9. i na slici 10. prikazan je poklopac upravljačkog ormara sa ugrađenim metlicama.



**Slika 9. Pogled na metlice na poklopcu upravljačkog ormara izvana**



**Slika 10. Pogled na metlice na poklopcu upravljačkog ormara iznutra**

Završno je poklopac ugrađen na upravljački ormar, što je vidljivo na slici 11. i slici 12.



**Slika 11. Poklopac upravljačkog ormara izvana**





**Slika 12. Poklopac upravljačkog ormara iznutra**

### **3.2. Montaža glavne sklopke i tipkala na vrata upravljačkog ormara**

Grebenasta sklopka te tipkala za reset i zaustavljanje u nuždi montirana su na vrata na optimalnoj visini gdje su dostupne ruci kako bi im bio omogućen pristup u svakom trenutku. Slika 13. prikazuje sklopku i tipke na vratima upravljačkog ormara.



**Slika 13. Sklopka i tipkala na vratima upravljačkog ormara**

### 3.3. Ugradnja temeljne ploče u upravljački ormar

Nakon svih obavljenih priprema uslijedila je ugradnja temeljne ploče sa elementima upravljačkog sustava u upravljački ormar. Slika 14. prikazuje temeljnu ploču nakon ugradnje u upravljački ormar, dok slika 15. prikazuje zaštićeno ožičenje prema sklopki i tipkalima na vratima upravljačkog ormara.



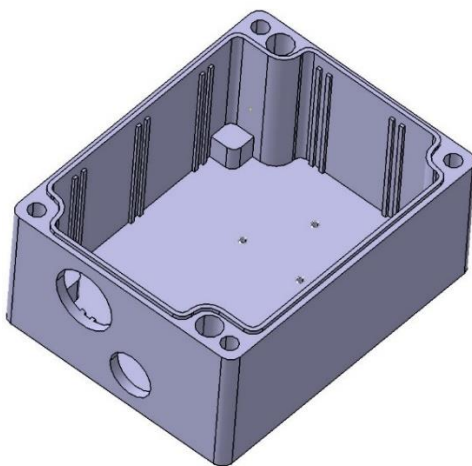
Slika 14. Temeljna ploča u upravljačkom ormaru



Slika 15. Zaštita ožičenja do sklopke i tipkala na vratima upravljačkog ormara

#### 4. UGRADNJA RAZVODNE KUTIJE

Na postav zračnog tunela ugrađena je kutija sa pojačalom senzora sila u koju se priključuje mrežni vod iz upravljačkog ormara. Na laboratorijskoj 3-osnoj CNC glodalici su izbušena 3 provrta te je izvršeno urezivanje navoja pomoću kojih se pričvršćuje tiskana pločica, te 2 provrta za kabelsku uvodnicu i priključak za mrežni vod. Kutija je zatim ugrađena na stražnju stranu postava zračnog tunela. Na slici 16. prikazan je model razvodne kutije sa potrebnim provrtima, dok je na slici 17. prikazana ugrađena razvodna kutija u koju je također ugrađeno pojačalo senzora sila.



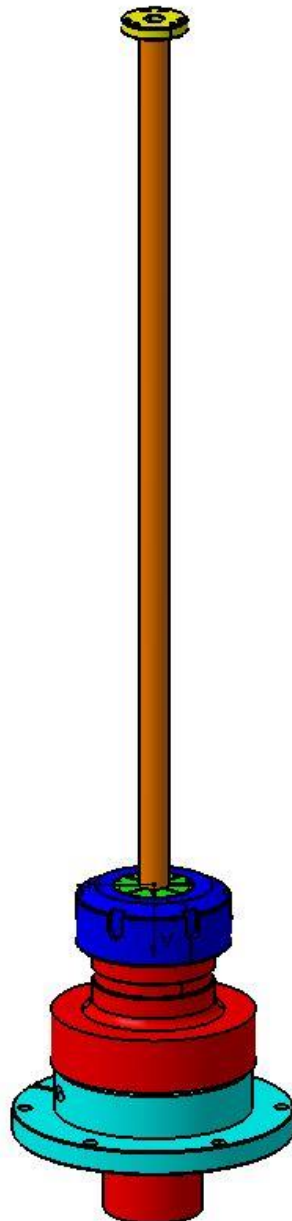
Slika 16. Razvodna kutija



Slika 17. Ugrađena razvodna kutija

## 5. OBRADA POZICIJA EKSPERIMENTALNOG POSTAVA

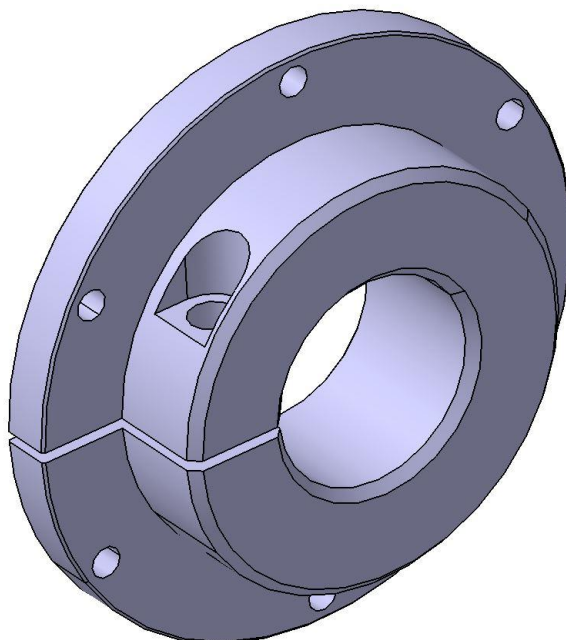
Za osposobljavanje ispitnog postava je potrebno izraditi prirubnicu za prihvat stezne glave (držača alata), dodatno obaviti operaciju bušenja stezne glave, izraditi prihvat senzora sila te osmisliti prihvat modela zrakoplova. Na slici 18. prikazan je sklop dijelova koji je potrebno izraditi kako bi se mogao ugraditi senzor sila.



Slika 18. Sklop izrađenih dijelova

## 5.1. Prirubnica stezne glave

Kako bi se stezna glava VDI ER40 pričvrstila za reduktor GSN130-10K-SV, potrebno je izraditi prirubnicu. Na slici 19. prikazan je model prirubnice.



Slika 19. Model prirubnice

Prirubnica od sivog lijeva SL 25 izrađena je na Trens SBL 500 CNC tokarskom obradnom centru i laboratorijskoj 3-osnoj CNC glodalici. Slika 20. prikazuje stezanje sirovca na CNC tokarski obradni centar, dok slika 21. prikazuje izradu utora za glavu vijka ISO 4762 M8x35 mm na CNC glodalici.



Slika 20. Stezanje priprema u CNC tokarski obradni centar





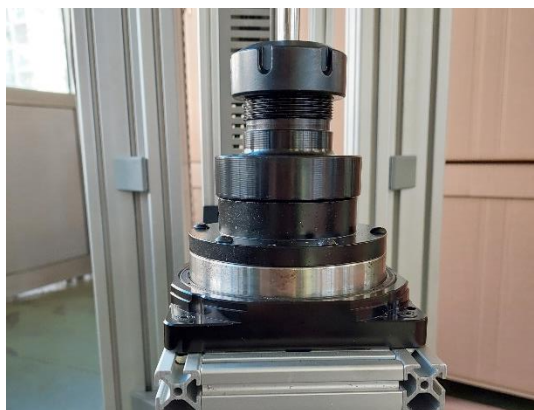
**Slika 21. Izrada utora na CNC glodalici**

Zadnja operacija na prirubnici obuhvaća rezanje jedne strane prirubnice na tračnoj pili s ciljem centriranja stezne glave što je vidljivo na slici 22.



**Slika 22. Rezanje prirubnice na tračnoj pili**

Prirubnica se ugradila na reduktor vijcima ISO 7380 M5x20 mm dok je stezanje stezne glave realizirano s jednim vijkom ISO 4762 M8x35 mm. Zbog postojanosti te vizualnog efekta prirubnica je obojana mat crnom bojom. Ugrađenu prirubnicu možemo vidjeti na slici 23.



**Slika 23. Prirubnica**

## **5.2. Bušenje stezne glave**

Za steznu glavu korišten je držač alata VDI ER 40 koji inače služi kao držač alata na CNC tokarilicama ili obradnim centrima. Prvotno kupljen držač alata kroz svoje tijelo nije imao provrt što je bio problem za konstrukcijsko rješenje predmetne stezne glave. Iz tog razloga obavljena je operacija bušenja što je predstavljalo veliki izazov u smislu obrade termički obrađene pozicije (držača alata). Iz navedenog razloga korišteno je specijalno svrdlo s izmjenjivim tvrdometalnim pločicama promjera 28 mm. Na slici 24. prikazano je stezanje stezne glave na CNC tokarski obradni centar, dok je na slici 25. prikazana probušena stezna glava.



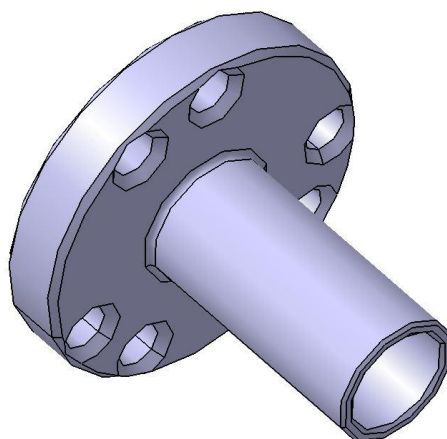
**Slika 24. Stezanje stezne glave u CNC tokarski obradni centar**



**Slika 25. Probušena stezna glava**

### **5.3. Prihvat senzora za mjerenje sila**

Prihvat senzora sila realiziran je izradom prirubnice koja se nakon obrade lijepila i uprešala u vertikalnu cijev promjera 12 mm. Slika 26. prikazuje model prirubnice za prihvat senzora sila.



**Slika 26. Model prirubnice za prihvat senzora sila**

Prirubnica je izrađena od materijala AlMgSi0,5 postupkom tokarenja te naknadnog bušenja provrta s ciljem ugradnje senzora sila. Senzor je pričvršćen na prirubnicu s 6 vijaka ISO 10642 M3x8 mm. Navedeno rješenje je kompaktno i osigurava točnu poziciju. Izrađena i ugrađena prirubnica za prihvat senzora sila može se vidjeti na slici 27.

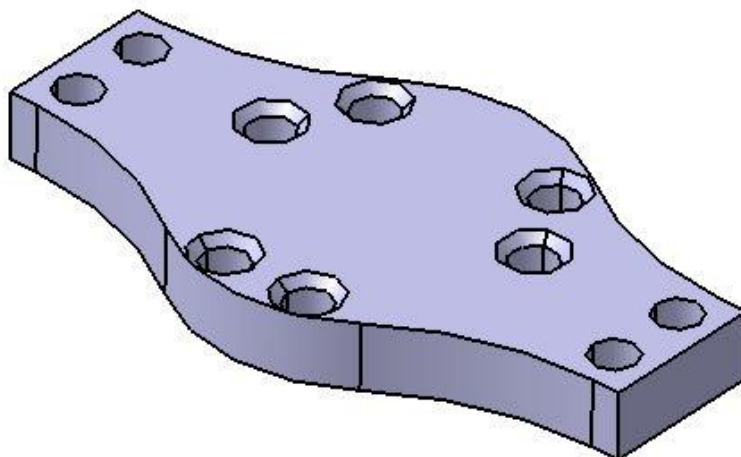




Slika 27. Izrađena i ugrađena prirubnica za prihvat senzora sila

#### 5.4. Prihvat modela zrakoplova

Prihvat modela zrakoplova služi za čvrsto povezivanje modela zrakoplova sa senzorom sila. Izrazito je važno da prihvat modela zrakoplova što manje utječe na strujnice zraka te naposljetku na sile kojima zrak koji struji utječe na model zrakoplova. Predviđeno je da se prihvat modela zrakoplova, prikazan na slici 28., izradi postupkom glodanja na laboratorijskoj glodalici od materijala AlMgSi0,5.



Slika 28. Model prihvata modela zrakoplova

## 6. IZRAĐEN ZRAČNI TUNEL SPREMAN ZA ISPORUKU

Na slici 29. i slici 30. prikazan je u potpunosti izrađen ispitni postav zračnog tunela koji je spreman za isporuku.



Slika 29. Izrađen postav zračnog tunela



Slika 30. Pogled na ispitni postav i upravljački sustav

## **7. ZAKLJUČAK**

Cilj ovog završnog rada bio je u potpunosti dovršiti ispitni postav zračnog tunela. U tu svrhu dovršen je upravljački ormar, izrezan je otvor na poklopcu kako bi omogućio prolaz ožičenja te su ugrađene metlice kao zaštita, kako taj otvor ne bi bio stalno otvoren. Na vrata ormara ugrađena je grebenasta spojka te tipkala za reset i zaustavljanje u nuždi. Dovođeno je potrebno ožičenje elemenata upravljačkog sustava na temeljnoj ploči te je ploča ugrađena u upravljački ormar. Osmišljene su, izrađene te ugrađene sve preostale pozicije ispitnog postava koje su potrebne kako bi se senzor sila mogao pozicionirati na odgovarajuću poziciju u prostoru tunela te osigurati adekvatan spoj s ispitnim modelom. Pozicije su izrađene sukladno pravilima sigurnosti na radu uz nadzor mentora. Preostalo je sustav instalirati u prostorijama laboratorija Zavoda za aeronautiku na Fakultetu prometnih znanosti te prilagoditi programsku podršku zahtjevima naručitelja.

---

## LITERATURA

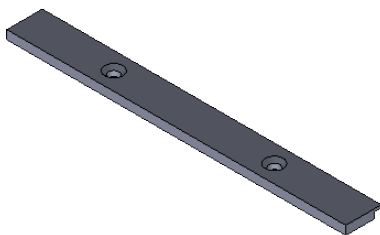
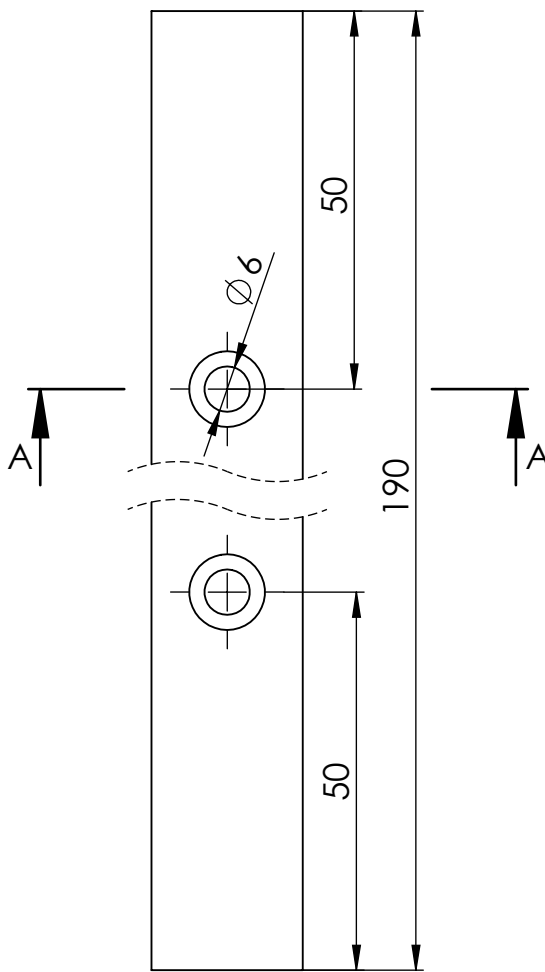
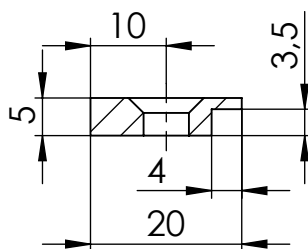
- [1] <https://boomsupersonic.com/flyby/post/what-is-wind-tunnel-testing> (30.01.2023.)
- [2] <https://www.nasa.gov/audience/forstudents/k-4/stories/nasa-knows/what-are-wind-tunnels-k4.html> (30.01.2023.)
- [3] <https://www.peritusint.com/benefits-and-limitations-of-computational-fluid-dynamics/> (30.01.2023.)
- [4] Zelić, F.: Razvoj prigona za orijentaciju modela u zračnom tunelu, 2021.
- [5] Zorić, V.: Razvoj programske podrške za ispitni postav zračnog tunela, 2022.
- [6] Haboić, I.: Izrada pozicija ispitnog postava zračnog tunela, 2022.
- [7] [https://www.ati-ia.com/products/ft/ft\\_models.aspx?id=Mini27+Titanium](https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Mini27+Titanium) (05.02.2023.)
- [8] <https://www.cadcam-group.eu/hr/po-aplikaciji/catia/> (06.02.2023.)
- [9] <https://www.3ds.com/products-services/catia/> (06.02.2023.)
- [10] <https://technicalfoamservices.co.uk/blog/blog-history-of-cad-cam/> (09.02.2023.)
- [11] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1981.
- [12] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 2006.

## **PRILOZI**

### **I. Tehnička dokumentacija**

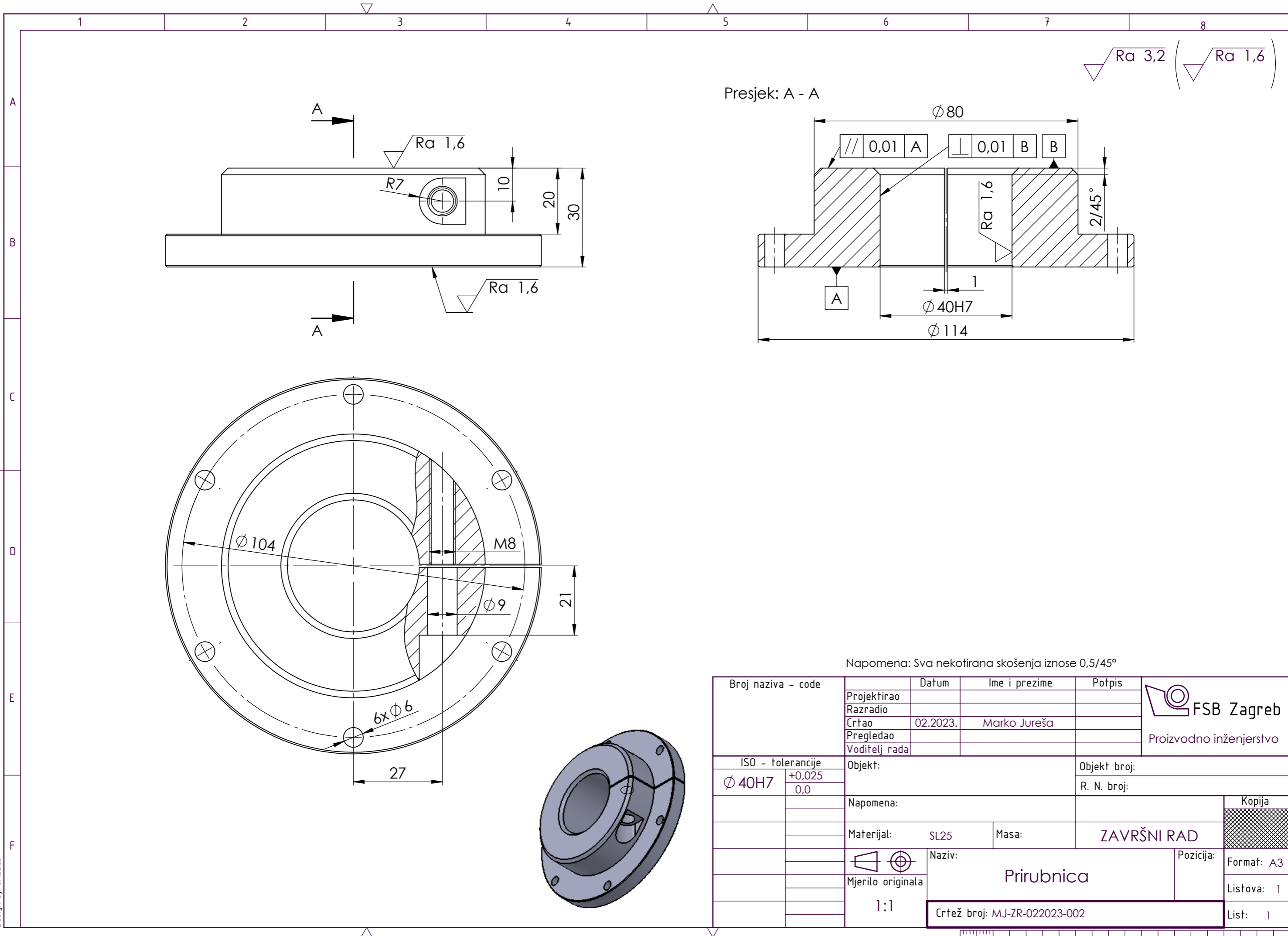
Ra 3,2

Presjek: A - A

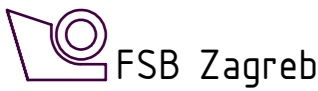


Napomena: Sva nekotirana skošenja iznose 2/45°

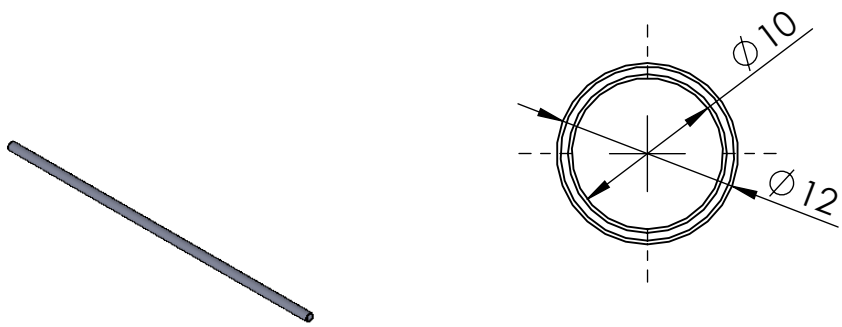
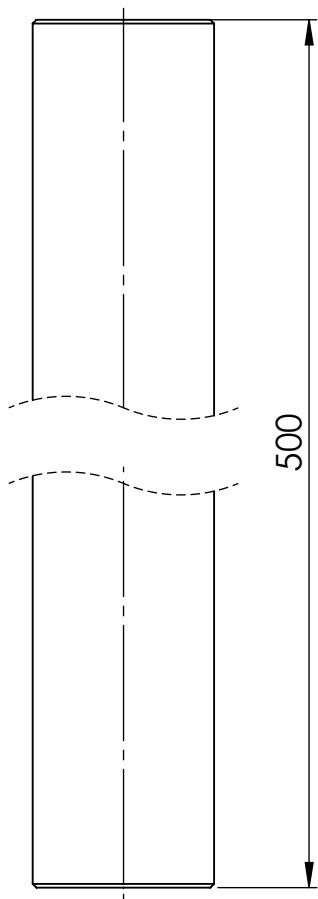
|                    |                   |                              |              |              |  |
|--------------------|-------------------|------------------------------|--------------|--------------|--|
| Broj naziva - code | Datum             | Ime i prezime                |              | Potpis       |  <b>FSB Zagreb</b><br>Proizvodno inženjerstvo |
|                    | Projektirao       |                              |              |              |  |
|                    | Razradio          |                              |              |              |  |
|                    | Crtao             | 02.2023.                     | Marko Jureša |              |  |
|                    | Pregledao         |                              |              |              |  |
| Voditelj rada      |                   |                              |              |              |  |
| ISO - tolerancije  | Objekt:           |                              |              | Objekt broj: |  |
|                    |                   |                              |              | R. N. broj:  |  |
|                    | Napomena:         |                              |              |              | Kopija   |
|                    |                   |                              |              |              |  |
|                    | Materijal:        | AlMgSi0,5                    | Masa:        | ZAVRŠNI RAD  |  |
|                    |                   | Naziv:                       |              |              | Pozicija:  |
|                    |                   | Držač metlice                |              |              | Format: A4   |
|                    | Mjerilo originala |                              |              |              |  |
|                    | 1:1               | Crtež broj: MJ-ZR-022023-001 |              |              | List: 1  |



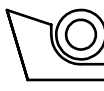
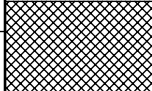


Napomena: Sva nekotirana skošenja iznose 0,5/45°

|                              |               |            |               |              |  |
|------------------------------|---------------|------------|---------------|--------------|--|
| Broj naziva - code           | Projektirao   | Datum      | Ime i prezime | Potpis       | <br>FSB Zagreb<br>Proizvodno inženjerstvo |
|                              | Razradio      |            |               |              |  |
|                              | Crtao         | 02.2023.   | Marko Jureša  |              |  |
|                              | Pregledao     |            |               |              |  |
|                              | Voditelj rada |            |               |              |  |
| ISO - tolerancije            |               | Objekt:    |               | Objekt broj: |  |
| $\varnothing 40H7$           | +0,025<br>0,0 |            |               | R. N. broj:  |  |
| Napomena:                    |               |            |               |              | Kopija   |
| Materijal:                   |               | SL25       | Masa:         | ZAVRŠNI RAD  |  |
| Mjerilo originala            |               | Naziv:     |               | Pozicija:    | Format: A3   |
| 1:1                          |               | Prirubnica |               |              | Listova: 1   |
| Crtež broj: MJ-ZR-022023-002 |               |            |               |              | List: 1  |





Napomena: Svi bridovi su skošeni 0,25/45°

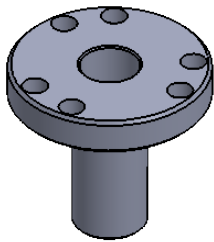
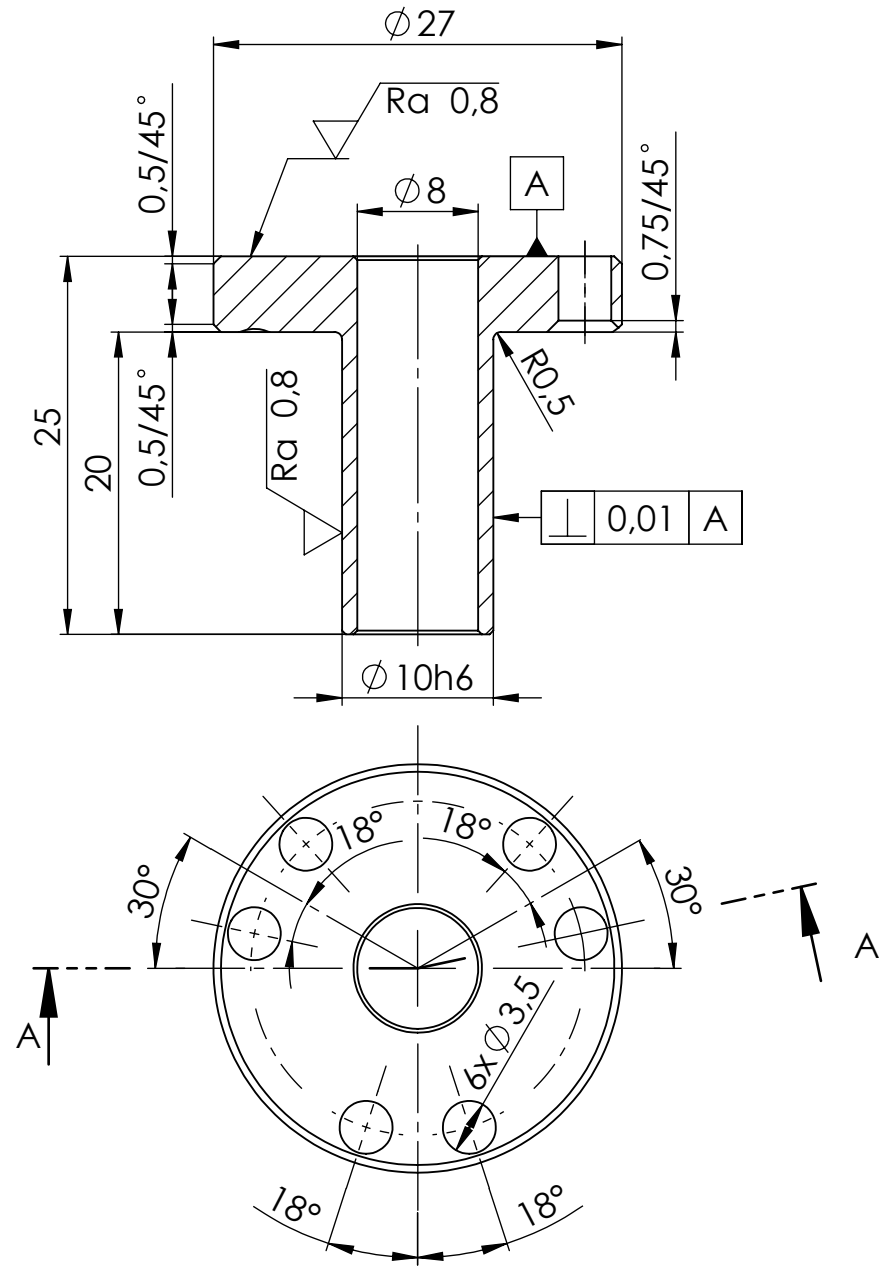
|                    |   |                              |               |              |  |
|--------------------|---|------------------------------|---------------|--------------|--|
| Broj naziva - code | Projektirao   | Datum                        | Ime i prezime | Potpis       |  <b>FSB Zagreb</b><br>Proizvodno inženjerstvo |
|                    | Razradio  |                              |               |              |  |
|                    | Crtao   | 02.2023.                     | Marko Jureša  |              |  |
|                    | Pregledao   |                              |               |              |  |
|                    | Voditelj rada   |                              |               |              |  |
| ISO - tolerancije  | Objekt:   |                              |               | Objekt broj: | Kopija   |
|                    |   |                              |               | R. N. broj:  |  |
|                    | Napomena:   |                              |               |              |   |
|                    | Materijal:  | AlSi 304                     | Masa:         | ZAVRŠNI RAD  |  |
|                    |   |                              |               |              |  |
|                    |   | Naziv:                       |               |              | Pozicija:  |
|                    | Mjerilo originala   | Inox cijev                   |               |              | Format: A4   |
|                    | 2:1   | Crtež broj: MJ-ZR-022023-003 |               |              | Listova: 1   |
|                    |   |                              |               |              | List: 1  |

Design by CADL.ab

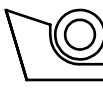
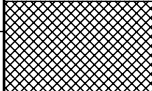


$\sqrt{Ra\ 3,2}$  ( $\sqrt{Ra\ 0,8}$ )

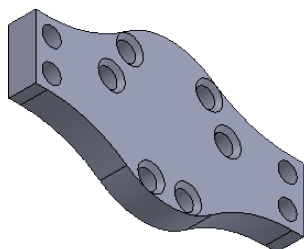
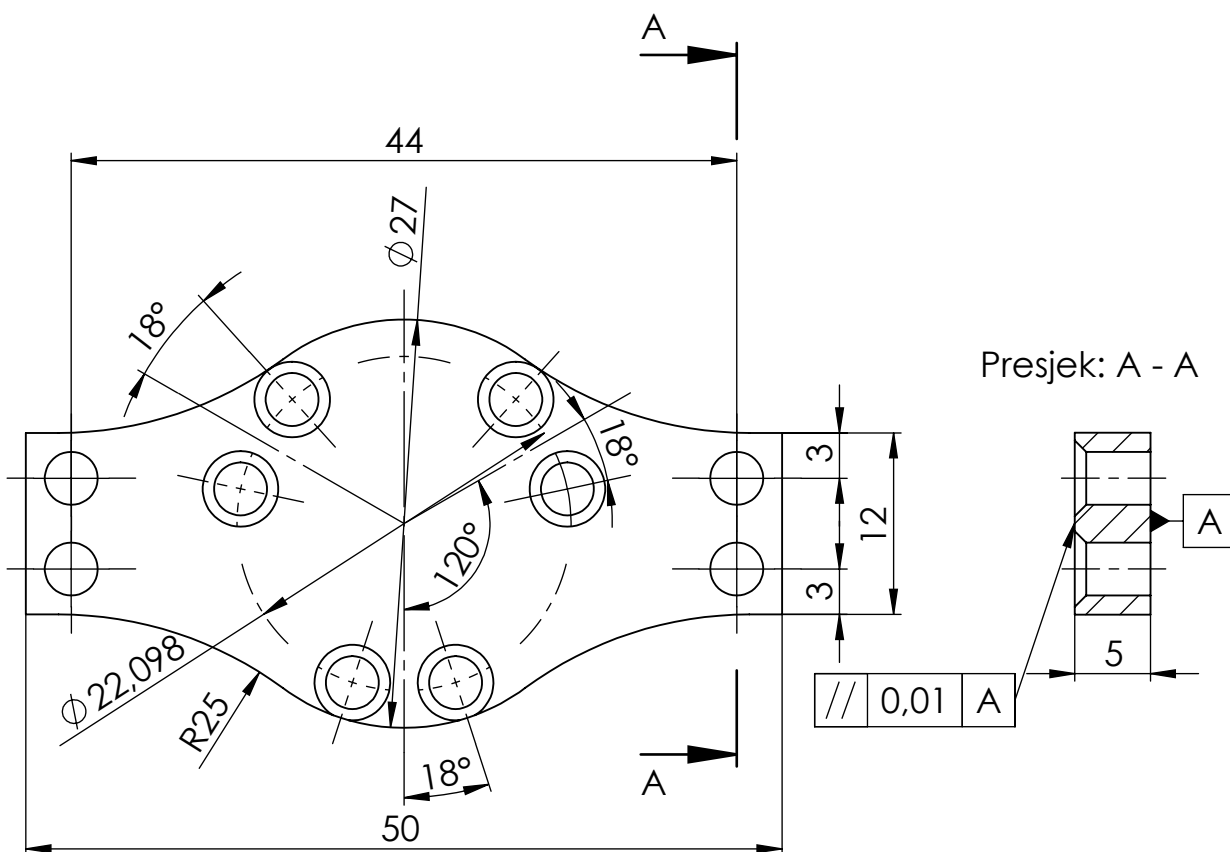
Presjek: A - A



Napomena: Sva nekotirana skošenja iznose 0,25/45°

|                      |               |   |              |        |  |
|----------------------|---------------|---|--------------|--------|--|
| Broj naziva - code   | Datum         | Ime i prezime                             |              | Potpis |  <b>FSB Zagreb</b><br>Proizvodno inženjerstvo |
|                      | Projektirao   |   |              |        |  |
|                      | Razradio      |   |              |        |  |
|                      | Crtao         | 02.2023.                                  | Marko Jureša |        |  |
|                      | Pregledao     |   |              |        |  |
| Voditelj rada        |               |   |              |        |  |
| ISO - tolerancije    |               | Objekt:                                   |              |        | Objekt broj:   |
| $\phi\ 10h6$         | 0,0<br>-0,009 |   |              |        | R. N. broj:  |
| Napomena:            |               |   |              |        | Kopija   |
| Materijal: AlMgSi0,5 |               | Masa:                                     | ZAVRŠNI RAD  |        |   |
| Mjerilo originala    |               | Naziv: Prirubnica za prihvat senzora sila |              |        |  |
| 2:1                  |               | Crtež broj: MJ-ZR-022023-004              |              |        | Pozicija:<br>Format: A4<br>Listova: 1<br>List: 1   |

Ra 1,6



Napomena: Sva nekotirana skošenja iznose 0,75/45°

|                    |   |                              |               |              |  |
|--------------------|---|------------------------------|---------------|--------------|--|
| Broj naziva - code | Projektirao   | Datum                        | Ime i prezime | Potpis       |  <b>FSB Zagreb</b><br>Proizvodno inženjerstvo |
|                    | Razradio  |                              |               |              |  |
|                    | Crtao   | 02.2023.                     | Marko Jureša  |              |  |
|                    | Pregledao   |                              |               |              |  |
|                    | Voditelj rada   |                              |               |              |  |
| ISO - tolerancije  | Objekt:   |                              |               | Objekt broj: |  |
|                    |   |                              |               | R. N. broj:  |  |
|                    | Napomena:   |                              |               |              | Kopija   |
|                    | Materijal:  | AlMgSi0,5                    | Masa:         | ZAVRŠNI RAD  |   |
|                    |   | Naziv:                       |               |              | Pozicija:  |
|                    | Mjerilo originala   | Prihvāt modela zrakoplova    |               |              | Format: A4   |
|                    | 2:1   | Crtež broj: MJ-ZR-022023-005 |               |              | Listova: 1   |
|                    |   |                              |               |              | List: 1  |