

Izrada topološki optimiranog robota

Meštrić, Lovro

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:764574>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lovro Meštrić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Petar Čurković, dipl. ing.

Student:

Lovro Meštrić

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru, izv. prof. dr. sc. Petru Ćurkoviću, dipl. ing. na pruženom znanju kroz studij te na savjetima i stručnoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Također posebna zahvala mojoj obitelji i prijateljima na pruženoj podršci tijekom izrade ovog rada te tokom preddiplomskog studija.

Lovro Meštrić



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 Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Lovro Meštrić**

JMBAG: **0035227775**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izrada topološki optimiranog robota**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Manufacturing of a topologically optimized robot**

Opis zadatka:

Pojavom aditivnih proizvodnih tehnologija potaknut je i razvoj komplementarnih metoda za optimiranje geometrije dijelova. Ovako optimirana geometrija često je vrlo kompleksna, slobodna u prostoru, i u praksi neizvediva konvencionalnim proizvodnim postupcima. Kriterij optimiranja najčešće usmjeren na minimizaciju mase, uz zadovoljavanje ograničenja maksimalnog naprezanja te minimizacije podatljivosti.

U ovom radu potrebno je ispitati mogućnosti implementacije topološkog optimiranja pri izradi dijelova robota s četiri stupnja slobode gibanja. Kriterij optimiranja je minimizacija mase uz zadovoljenje ograničenja maksimalnog naprezanja. Dijelove je po optimiranju potrebno prilagoditi i pripremiti za izradu na 3D printeru Prusa i3 MK3 dostupnom u Laboratoriju za inteligentne proizvodne sustave (LIPS).

Ovako optimirane i izrađene dijelove potrebno je montirati s ostalim pripadajućim elementima – motorima, ožičenjem, upravljačkom jedinicom, napajanjem te osigurati ispravan rad robota.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Petar Čurković

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. KONSTRUIRANJE ROBOTA	3
2.1. Odabir pogonskog sustava	3
2.2. Konstruiranje robota	6
2.3. Proračun nosivosti koračnih motora	7
2.4. Izrada dijelova robota.....	14
3. PROGRAMIRANJE ROBOTA	18
3.1. Ručni mod rada	18
3.2. Automatski mod rada	19
4. TOPOLOŠKA OPTIMIZACIJA DIJELOVA.....	20
4.1. Topološka optimizacija u Solidworksu.....	20
4.2. Topološka optimizacija u Fusion 360	23
4.3. Topološka optimizacija u CREO Parametric	24
4.4. Topološka optimizacija u Altair Inspire.....	26
4.5. Topološka optimizacija u Ansys Discovery.....	29
4.6. Odabir dijelova za izradu i njihova izrada	31
5. REZULTATI	33
5.1. Usporedba početnih dijelova s optimiranim.....	33
5.2. Izgled gotove konstrukcije	37
6. ZAKLJUČAK.....	38
LITERATURA.....	39
PRILOZI.....	40

POPIS SLIKA

Slika 1. NEMA 17hs4401s koračni motor	3
Slika 2. MG995 servo motor	4
Slika 3. Arduino UNO mikrokontroler	5
Slika 4. A4988 driver	5
Slika 5. Arduino CNC shield.....	6
Slika 6. Nadlaktica robota	6
Slika 7. Podlaktica robota.....	7
Slika 8. Zapešće robota	7
Slika 9. Gripper	7
Slika 10. Planetarni prijenosnik [2].....	8
Slika 11. Djelovanje sila oko točke OB	9
Slika 12. Djelovanje sila oko točke O1	11
Slika 13. Djelovanje sila oko točke O2	12
Slika 14. Djelovanje sila oko točke O3	13
Slika 15. CAD model gotovog robota.....	14
Slika 16. Planetarni reduktor s koračnim motorom.....	15
Slika 17. Isprintano rame robota	16
Slika 18. Isprintano zapešće robota.....	16
Slika 19. Isprintana baza robota	17
Slika 20. Isprintana nadlaktica robota	17
Slika 21. Upravljačka kutija robota.....	18
Slika 22. Topološki optimirano rame u programu Solidworks	21
Slika 23. Topološki optimirana nadlaktica u programu Solidworks.....	21
Slika 24. Topološki optimirana podlaktica u programu Solidworks.....	22
Slika 25. Topološki optimirano zapešće u programu Solidworks.....	22
Slika 26. Topološki optimirano rame u programu Fusion 360	23
Slika 27. Topološki optimirana nadlaktica u programu Fusion 360	23
Slika 28. Topološki optimirana podlaktica u programu Fusion 360	24
Slika 29. Topološki optimirano zapešće u programu Fusion 360	24
Slika 30. Topološki optimirano rame u programu CREO Parametric	25
Slika 31. Topološki optimirana nadlaktica u programu CREO Parametric	26
Slika 32. Topološki optimirana podlaktica u programu CREO Parametric	26
Slika 33. Topološki optimirano rame u programu Altair Inspire	27
Slika 34. Topološki optimirana nadlaktica u programu Altair Inspire.....	28
Slika 35. Topološki optimirana podlaktica u programu Altair Inspire	28
Slika 36. Topološki optimirano zapešće u programu Altair Inspire	28
Slika 37. Topološki optimirano rame u programu Ansys Discovery	29
Slika 38. Topološki optimirana nadlaktica u programu Ansys Discovery	30
Slika 39. Topološki optimirana podlaktica u programu Ansys Discovery	30
Slika 40. Topološki optimirano zapešće u programu Ansys Discovery	30
Slika 41. Isprintano optimirano rame	31
Slika 42. Isprintana optimirana podlaktica.....	32
Slika 43. Isprintano optimirano zapešće	32
Slika 44. Izgled pripremljenog ramena za printanje	33
Slika 45. Izgled pripremljenog optimiranog ramena za printanje.....	34
Slika 46. Izgled pripremljene podlaktice za printanje.....	34
Slika 47. Izgled pripremljene optimirane podlaktice	35
Slika 48. Izgled pripremljenog zapešća za printanje.....	35

Slika 49. Izgled pripremljenog optimiranog zapešća	36
Slika 50. Gotov robot	37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehnički podatci za NEMA 17 koračni motor	4
Tablica 2. Tehnički podatci za MG995 servo motor.....	4

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
000-000-2023	Robot
000-001-2023	Nadlaktica
000-002-2023	Rame
000-003-2023	Podlaktica
000-004-2023	Zapešće
000-005-2023	Zglob lakta
000-006-2023	Vratilo s rupom
000-007-2023	Poklopac zgloba
000-008-2023	Poklopac od baze robota
000-009-2023	Baza ramena
000-010-2023	Baza od robota
000-011-2023	Zupčanik Ø60
000-012-2023	Distanca
000-013-2023	Zupčanik Ø20 na reduktor
000-014-2023	Zupčanik Ø20
000-015-2023	Zupčanik Ø20 kraći
000-016-2023	Zupčanik Ø35
000-017-2023	Zupčanik Ø50
000-018-2023	Zupčanik Ø100
001-000-2023	Gripper
001-001-2023	Kućište grippera
001-002-2023	Gripper ruka
001-003-2023	Veza za gripper
001-004-2023	Veza za gripper 2
002-000-2023	Reduktor drugi
002-001-2023	Vratilo reduktora za drugi motor
002-002-2023	Kućište reduktora 1 za drugi motor
003-000-2023	Reduktor prvi
003-001-2023	Kućište reduktora 2
003-002-2023	Vratilo reduktora za prvi motor
003-003-2023	Zupčanik Ø20 za reduktor

003-004-2023

Zupčanik Ø10

003-005-2023

Kućište reduktora 1 za prvi motor

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_B	N	Sila oko točke O_B
F'_B	N	Sila oko točke O_B od F'_t
F_t	N	Sila trenja
F'_t	N	Sila trenja od rezerve momenta
F_{Ti}	N	Teoretska nosivost koračnog motora
g	m/s^2	Ubrzanje sile teže
G_{GR}	N	Težina grippera
G_{KM_1}	N	Težina prvog koračnog motora
G_{KM_2}	N	Težina drugog koračnog motora
G_N	N	Težina nadlaktice
G_P	N	Težina podlaktice
G_{SM_1}	N	Težina prvog servo motora
G_{SM_2}	N	Težina drugog servo motora
G_Z	N	Težina zapešća
i_i		Prijenosni omjer
i'		Prijenosni omjer planetarnog prijenosnika
m_{GR}	kg	Masa grippera
m_{KM_1}	kg	Masa prvog koračnog motora
m_{KM_2}	kg	Masa drugog koračnog motora
m_N	kg	Masa nadlaktice
m_P	kg	Masa podlaktice
m_{SM_1}	kg	Masa prvog servo motora
m_{SM_2}	kg	Masa drugog servo motora
m_Z	kg	Masa zapešća
$M_{KM_{O_B}}$	Nm	Moment koračnog motora oko točke O_B
$M_{KM_{O_1}}$	Nm	Moment koračnog motora oko točke O_1
$M_{KM_{O_2}}$	Nm	Moment koračnog motora oko točke O_2
M_{O_B}	Nm	Moment oko točke O_B
$M_{KM_{O_3}}$	Nm	Moment koračnog motora oko točke O_3
M_{O_1}	Nm	Moment oko točke O_1
M_{O_2}	Nm	Moment oko točke O_2
M_{O_3}	Nm	Moment oko točke O_3
M_{R_i}	Nm	Rezerva momenta
n_i	s^{-1}	Brzina vrtnje zupčanika
S_i		Sigurnost koračnog motora
μ		Faktor trenja

SAŽETAK

U ovom radu je prikazana izrada robota s pet stupnjeva slobode gibanja koristeći topološku optimizaciju. Cilj je bio izraditi funkcionalan robot za obavljanje određenog zadatka te za ručno upravljanje. Pritom se fokus stavljao na topološku optimizaciju određenih dijelova robota. Za odabrane dijelove bilo je potrebno provesti topološku optimizaciju u pet odabranih softvera te nakon toga analizirati i usporediti međusobno rezultate koje je dao svaki softver te nakon toga odabrati najpovoljnije rezultate te ih izraditi pomoću 3D printera.

Ključne riječi: Topološka optimizacija, robot, analiziranje, softver, 3D printer

SUMMARY

In this thesis it was shown the making of a five degree of freedom robot with the help of topology optimization. The goal was to make a fully functional robot that can do a repeating task and also allows manual control. The focus was mostly on the topology optimization of the chosen robot parts. For the chosen parts topology optimization was done in five softwares and after that the results were analyzed and compared to each other. After that the most suitable parts were chosen for 3D printing.

Key words: Topology optimization, robot, analyzing, software, 3D printer

1. UVOD

Roboti su uređaji koji omogućuju ljudima obavljanje fizički zahtjevnih i preciznih zadataka pritom pazeći da se poštuju tri zakona robotike koji glase: 1. Robot svojim djelovanjem ne smije ugroziti čovjeka niti svojom pasivnošću dozvoliti da se čovjeku išta dogodi. 2. Robot mora slušati čovjeka osim kada se naredba krši s prvim zakonom. 3. Robot mora štititi sebe osim kada se to krši s prvim i drugim zakonom. Klasičan robot se sastoji od više dijelova koji su međusobno povezani zglobovima. Ti su zglobovi pogonjeni nekim električnim uređajem koji može biti elektromotor, koračni motor ili servo motor. Ovisno o broju pogonjenih zglobova robot dobiva stupnjeve slobode. Da bi robot obavljao neki praktičan zadatak poželjno je da ima barem tri stupnja slobode gibanja. Što robot ima više stupnjeva slobode može obavljati složenije zadatke. Stupnjevi slobode mogu biti translacijski ili rotacijski. Ovisno o tipu zadatka koji je potrebno obaviti pomoću robota odabire se robot s potrebnim brojem stupnjeva slobode te željenim vrstama stupnjeva slobode [11]. Također je za robot potrebno imati određeni upravljački uređaj te centralnu procesorsku jedinicu koja je između ostalog posrednik u komunikaciji između korisnika koji koristi upravljački uređaj i samog robota.

Topološka optimizacija je postupak kojim se smanjuje masa/volumen određenog dijela, ali uz uvjet da se nakon optimiranja dio može opteretiti jednakim opterećenjem kojim je bio opterećen i prije optimizacije te da se pod tim djelovanjem ne slomi. Kod topološke optimizacije korisnik ne donosi značajne odluke koje utječu na sam izgled gotovog dijela. Zadatak korisnika je da za odabrani komad u određenom softveru nanese vrste i iznose opterećenja koja djeluju na odabrani dio. Također korisnik može definirati koja područja želi spriječiti od optimiranja ako bi to utjecalo na samu funkcionalnost i izradu optimiranog dijela. Također korisnik je dužan prije početka optimiranja postaviti mrežu konačnih elemenata na odabrani dio. Što je mreža gušća bolji će biti rezultati optimiranja. Isto je tako važno da korisnik odredi koliki postotak od početne mase/volumena želi maknuti. Nakon postavljanja svih traženih parametara softver započinje postupak optimizacije gdje vlastitim odabirom uklanja dozvoljena područja. Rezultat topološke optimizacije odnosno njezin dizajn je u većini slučajeva ljudskom mozgu nezamisliv i da osoba to pokuša sama izraditi bilo bi praktički nemoguće pošto bi bilo teško odrediti koliko je na kojem mjestu minimalno potrebno materijala da se smanji masa početnog dijela za određeni postotak, a da se pritom postigne u jednu ruku nevjerojatan i nezamisliv dizajn gotovog dijela. Topološko optimiranje također se odlikuje prirodnom integracijom s

proizvodnim postupcima koji počivaju na konceptu digitalnih tehnologija, te se može koristiti pri izradi mekih robota [4, 5], ali i struktura s funkcionalnim mehaničkim svojstvima [6].

2. KONSTRUIRANJE ROBOTA

Prije svega bilo je potrebno konstruirati sve dijelove robota od kojih su se neki kasnije koristili za topološku optimizaciju kao početak ovog rada. Samim time su se i definirali sirovi dijelovi za kasniju topološku optimizaciju.

2.1. Odabir pogonskog sustava

Prije nego su se počeli modelirati dijelovi za robota bilo je potrebno odabrati pogonske elemente pošto su se oko njih modelirali dijelovi, odnosno ne bi imalo smisla raditi dijelove a tek kasnije odabrati pogonski sustav bez prethodnog proračuna. Kao pogonski uređaji za četiri stupnja slobode su odabrani koračni motori tipa NEMA 17 hs4401s. Koračni motori su bipolarni, imaju dovoljno mali korak po impulsu te zadovoljavajući moment te su time uvelike pogodni za različite projekte npr. robote, 3D printere, CNC strojeve i slično [7]. Za posljednja dva zgloba odabrani su MG 995 servo motori. Motori su male mase, velike preciznosti i brzi. Konkretno postoje dvije vrste servo motora. Oni koji se okreću za 360° te za 180° . U ovom radu korišteni su servo motori koji se okreću za 180° zbog toga što je takav raspon kuta zakreta bio dovoljan za zamišljen rad robota [8]. U nastavku su dane slike te tablice s tehničkim podacima za koračne i servo motore.



Slika 1. NEMA 17hs4401s koračni motor



Slika 2. MG995 servo motor

Tablica 1. Tehnički podatci za NEMA 17 koračni motor

Radni napon	12-24 V
Jakost struje po fazi	1,7 A
Radni moment	430 Nmm
Masa	280 g
Inercija	540 gcm ²
Kut zakreta po impulsu	1,8 °

Tablica 2. Tehnički podatci za MG995 servo motor

Radni napon	4,8-7,2 V
Maksimalni kut zakreta	120° (60° u svakom smjeru)
Raspon brzine	0,2s/60° - 0,16/60°
Radni moment	8,5 kgfcm – 10 kgfcm
Masa	55 g

Kao upravljačka jedinica robota uzet je Arduino UNO mikrokontroler. Arduino UNO mikrokontroler je jedan od mnogih modela svjetski poznate tvrtke Arduino. Spomenuti model je odabran zbog same veličine koja je dovoljno mala za ugradnju te same cijene, ali i broja digitalnih i analognih ulaza i izlaza. Sastoji se od 14 digitalnih ulaza i izlaza od kojih šestoro

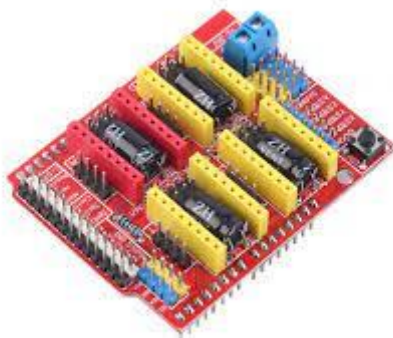
mogu davati PWM signal. Također imaju i šestero analognih ulaza [9]. Za ručno upravljanje robotom korištena su dva joystick modula te potenciometar. Da bi se moglo lakše upravljati koračnim motorima bilo je potrebno implementirati A4988 drivere za svaki motor posebno. Oni omogućuju miran i normalan rad koračnih motora te lakše upravljanje [12]. Radi lakše ugradnje drivera te zbog osiguranja kod transporta ili eventualnog pomicanja dijelova upravljačke elektronike driveri koračnih motora stavljeni su na tzv. CNC shield koji se stavi na Arduino UNO mikrokontroler te se time također uvelike smanji broj žica i eventualnih drugih potrebnih komponenti. Također je pomoću tehnologije 3D printanja izrađeno kućište za upravljačke dijelove.



Slika 3. Arduino UNO mikrokontroler



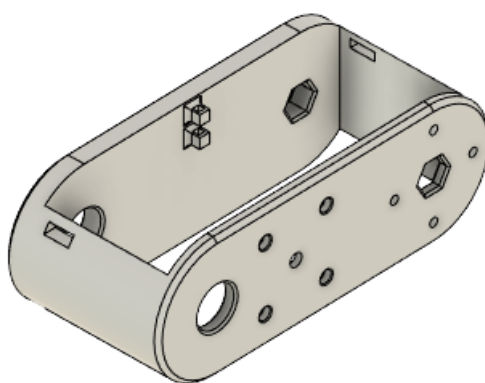
Slika 4. A4988 driver



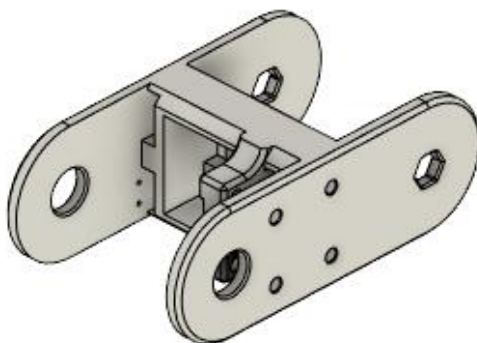
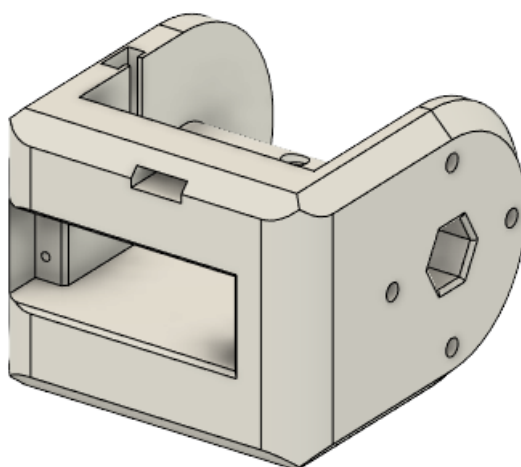
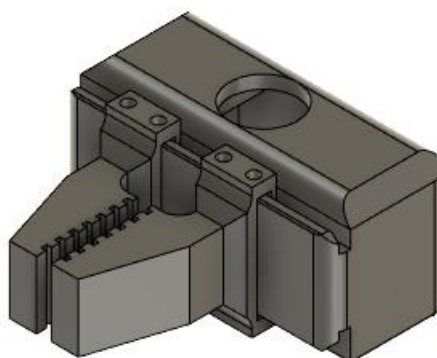
Slika 5. Arduino CNC shield

2.2. Konstruiranje robota

Nakon odabira svih komponenti bilo je potrebno započeti konstruiranje dijelova. Za to je korišten Solidworks programski paket. U njemu su izrađeni gotovo svi dijelovi od kojih se sastoji robot. Sama konstrukcija se odvijala oko odabranih motora, odnosno veličina samih dijelova se prilagođavala njima. Naravno nakon početnog izgleda dijelova, odnosno njihove konstrukcije proveden je proračun nosivosti motora u potpoglavlju niže gdje je detaljnije objašnjen sam postupak proračuna. Naravno nakon prve iteracije bilo je potrebno napraviti određene izmjene u konstrukciji dijelova te nakon što su one provedene proveden je i konačni proračun nosivosti koji je prikazan u potpoglavlju niže. U nastavku su dane slike dijelova konstruiranih u Solidworks programskom paketu koji su se uzimali u obzir prilikom provođenja proračuna.



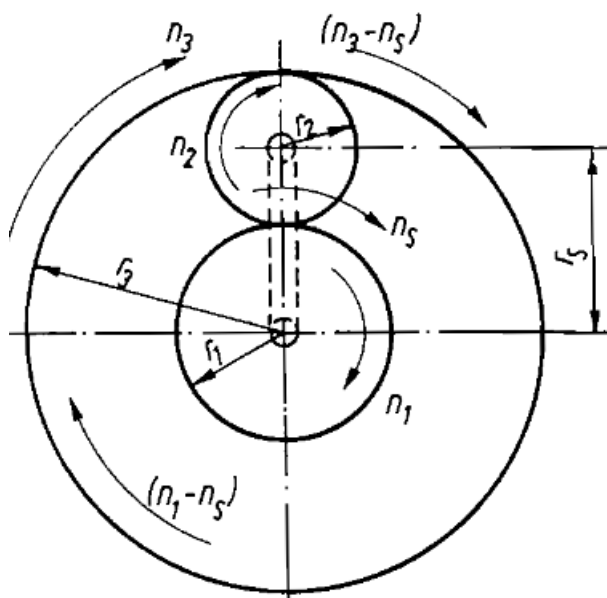
Slika 6. Nadlaktica robota

**Slika 7. Podlaktica robota****Slika 8. Zapešće robota****Slika 9. Gripper**

2.3. Proračun nosivosti koračnih motora

Kako su ranije odabrani koračni motori NEMA 17 bilo je potrebno vidjeti mogu li podnijeti težine komponenti. Kako je ranije zamišljen dizajn sirovih dijelova odnosno njihove osnovne dimenzije moglo se započeti s proračunom nosivosti. Naravno zbog veličine samih koračnih

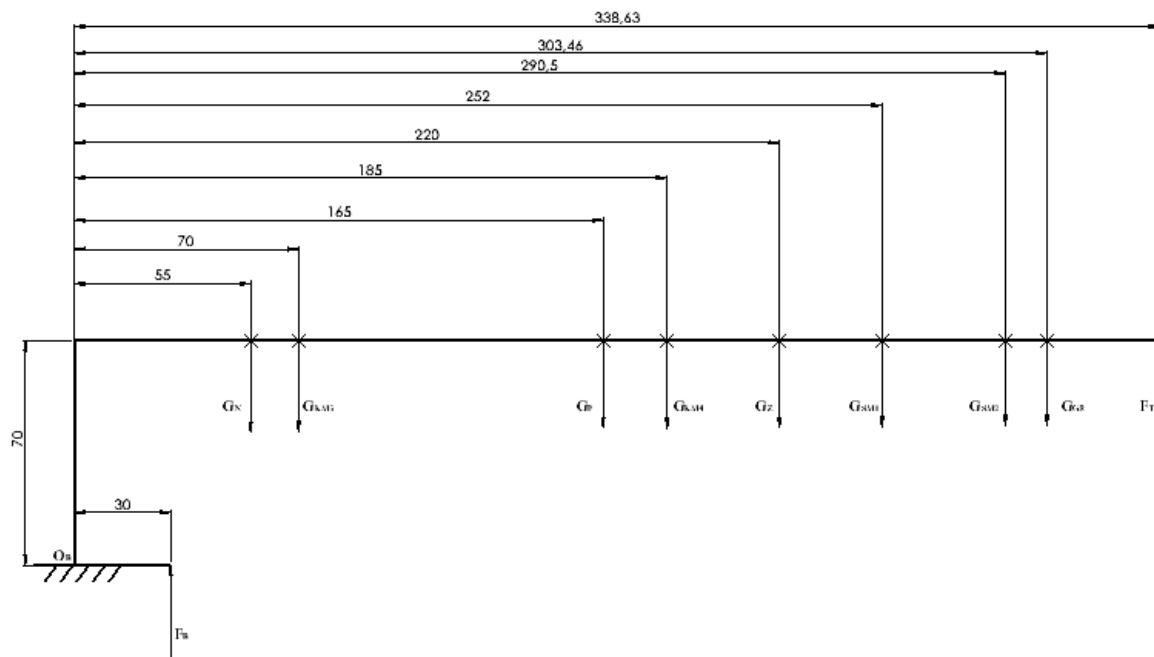
motora proporcionalno su i dijelovi bili malo većih dimenzija. Isto tako zbog ne prevelikog radnog momenta koračnih motora bilo je potrebno napraviti redukciju za svaki od četiri koračna motora. Kod prva dva koračna motora zbog najvećeg opterećenja stavljena je najveća redukcija. Za njih su konstruirani planetarni reduktori koji su prikazani u kasnijem poglavlju čiji su prijenosni omjeri $i_1 = 12$ i $i_2 = 18$. Kod planetarnih prijenosnika postoje više vrsta prijenosa snage i momenta s ulaznog na izlazno vratilo. U ovom slučaju se okretni moment prenosi sa središnjeg zupčanika (tzv. sunca) na držač te se prijenosni omjer može zapisati kao $i' = \frac{n_3}{n_1} + 1$ gdje je n_3 brzina vrtnje prstena, a n_1 brzina vrtnje središnjeg zupčanika [2]. Na slici niže može si vidjeti brzine vrtnje pojedinih zupčanika kod planetarnog prijenosnika.



Slika 10. Planetarni prijenosnik [2]

Kod sljedeća dva stavljeni su čeonu zupčanici kojima su se dobili prijenosni omjeri $i_3 = i_4 = 3$. Za servo motore nije bilo potrebno raditi redukciju jer nisu previše opterećeni odnosno imaju dovoljno rezerve podizanja i nakon ugradnje dijelova. Kako su dijelovi ređeni u Solidworks programskom paketu bilo je moguće izračunati masu svakog dijela te poziciju njegovog težišta. Pošto je odlučeno da će se dijelovi izrađivati pomoću tehnologije 3D printanja dijelovi koji su se izradili u Solidworksu su stavljeni u program za pripremu modela za 3D printanje. Pošto se željelo uštedjeti na masi, a samim time olakšati rad koračnim motorima u programu za pripremu 3D printeva, tzv. "Sliceru" stavljena je ispunjena dijelova od 20% te rešetkasta struktura unutar njih čime se značajno smanjila početna masa, a sama čvrstoća dijelova se zbog takve konstrukcije nije značajnije promijenila. Nakon što su prikupljeni podaci o masama svih dijelova mogla se početi proračunavati sigurnost i nosivost svakog od motora. Za prvi motor je

zbog njegove male brzine nakon reduktora provedena provjera u smislu dovoljnog momenta za pokrenuti sve mase. Zbog pojednostavljenja proračuna i zbog relativno velike mase svih komponenti na robotskoj ruci od ramena pa nadalje u odnosu na masu reduktora i drugog koračnog motora čija je os djelovanja okomita u odnosu na os ruke može se zanemariti utjecaj mase drugog koračnog motora i njegovog reduktora na mogućnost pokretanja sklopa od strane prvog koračnog motora. U konačnici je proveden momentni proračun oko točke O_B baze robota prema slici niže.



Slika 11. Djelovanje sila oko točke O_B

Stoga momentna jednadžba oko točke O_B glasi:

$$\sum M_{O_B} = 0 \quad (2.1)$$

odnosno:

$$F_B \cdot 30 = G_N \cdot 55 + G_{KM1} \cdot 70 + G_P \cdot 165 + G_{KM2} \cdot 185 + G_Z \cdot 220 + G_{SM1} \cdot 252 + G_{SM2} \cdot 290,5 + G_{GR} \cdot 303,46. \quad (2.2)$$

Gdje su:

$$\begin{aligned} G_N &= m_N g = 0,078 \cdot 9,81 = 0,77\text{N} \\ G_{KM1} &= m_{KM1} g = 0,287 \cdot 9,81 = 2,82\text{N} \\ G_P &= m_P g = 0,093 \cdot 9,81 = 0,91\text{N} \\ G_{KM2} &= m_{KM2} g = 0,287 \cdot 9,81 = 2,82\text{N} \\ G_Z &= m_Z g = 0,059 \cdot 9,81 = 0,58\text{N} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$G_{SM_1} = m_{SM_1}g = 0,057 \cdot 9,81 = 0,56\text{N}$$

$$G_{SM_2} = m_{SM_2}g = 0,057 \cdot 9,81 = 0,56\text{N}$$

$$G_{GR} = m_{GR}g = 0,040 \cdot 9,81 = 0,39\text{N}$$

Nakon uvrštavanja vrijednosti iz (2.3) u (2.2) i nakon njihovog sređivanja dobije se da je sila F_B oko točke O_B jednaka:

$$F_B = \frac{0,77 \cdot 55 + 2,82 \cdot 70 + 0,91 \cdot 165 + 2,82 \cdot 185 + 0,58 \cdot 220 + 0,56 \cdot 252 + 0,56 \cdot 290,5 + 0,39 \cdot 303,46}{30} \quad (2.4)$$

odnosno

$$F_B = 48,71 \text{ N}. \quad (2.5)$$

Pošto sila F_B djeluje okomito na zupčanik u točki gdje se ostvaruje valjanje metalnih kuglica u žlijebu zupčanika i dijela baze koji služi za centriranje ramena i ostalih dijelova robota može izračunati sila trenja između zupčanika i metalnih kuglica. Pošto je srednja vrijednost faktora trenja između metala i plastike otprilike jednaka $\mu = 0,33$ [1] dobijemo da je vrijednost sile trenja koju treba svladati motor jednaka:

$$F_t = F_B \mu = 48,71 \cdot 0,33 = 16,07 \text{ N}. \quad (2.6)$$

Moment koji sila trenja radi oko točke O_B je jednaka:

$$M_{O_B} = F_t \cdot 30 = 16,07 \cdot 30 = 482,1 \text{ Nmm}. \quad (2.7)$$

Kako je poznato da je maksimalni radni moment prvog koračnog motora jednak $M_{KM_1} = 430$ Nmm može se uz prijenosni omjer $i_1 = 2$ izračunati moment koji koračni motor radi oko točke O_B .

$$M_{KM_{O_B}} = M_{KM_1} i_1 = 430 \cdot 12 = 5160 \text{ Nmm}. \quad (2.8)$$

U konačnici sigurnost prvog koračnog motora je jednaka

$$S_1 = \frac{M_{KM_{O_B}}}{M_{O_B}} = \frac{5160}{482,1} = 10,7032 \quad (2.9)$$

Rezerva momenta je jednaka:

$$M_{R_1} = M_{KM_{O_B}} - M_{O_B} = 5160 - 482,1 = 4677,9 \text{ Nmm} \quad (2.10)$$

Preko gornjeg izraza može se izračunati teoretski najveća težina tereta koju prvi koračni motor može pokrenuti. Povratnom relacijom možemo doći do djelovanja vertikalnih sila oko točke O_B . Stoga slijedi da je:

$$F'_t = \frac{M_{R_1}}{30} = \frac{4677,9}{30} = 155,93 \text{ N} \quad (2.11)$$

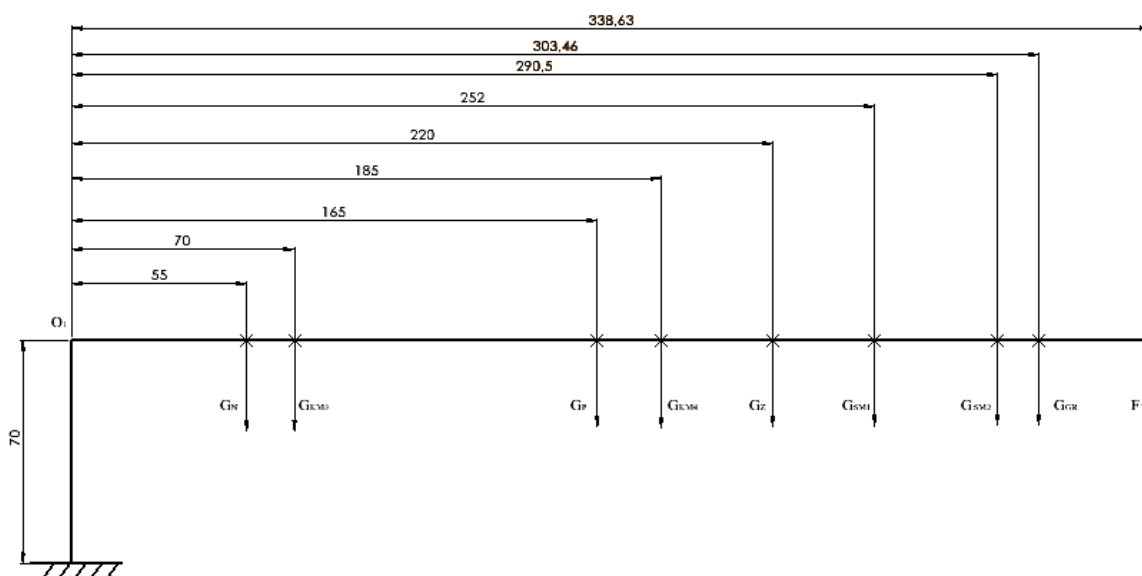
te iz toga da je:

$$F'_B = \frac{F'_t}{\mu} = \frac{155,93}{0,33} = 472,52 \text{ N} \quad (2.12)$$

U konačnici teoretski najveća težina tereta koju prvi koračni motor može pokrenuti je jednaka:

$$F_{T_1} = \frac{F_B \cdot 30}{338,63} = \frac{472,52 \cdot 30}{338,63} = 41,86 \text{ N} \quad (2.13)$$

Na slici niže je prikazana raspodjela sila za momentni proračun oko točke O_1 .



Slika 12. Djelovanje sila oko točke O_1

Moment oko točke O_1 koji rade vertikalne sile se može zapisati na sljedeći način:

$$M_{O_1} = G_N \cdot 55 + G_{KM_1} \cdot 70 + G_P \cdot 165 + G_{KM_2} \cdot 185 + G_Z \cdot 220 + G_{SM_1} \cdot 252 + G_{SM_2} \cdot 290,5 + G_{GR} \cdot 303,46 \quad (2.14)$$

Nakon što se uvrste vrijednosti iz (2.3) u jednadžbu (2.13) ona izgleda sljedeće:

$$M_{O_1} = 0,77 \cdot 55 + 2,82 \cdot 70 + 0,91 \cdot 165 + 2,82 \cdot 185 + 0,58 \cdot 220 + 0,56 \cdot 252 + 0,56 \cdot 290,5 + 0,39 \cdot 303,46 \quad (2.15)$$

U konačnici moment oko točke O_1 je $M_{O_1} = 1461,35 \text{ Nmm}$.

Pošto se zna da je prijenosni omjer za drugi koračni motor kada se pomnože vrijednosti reduktora i čeonih zupčanika jednak $i_2 = 18$ te da je maksimalni dozvoljeni moment motora jednak $M_{KM_2} = 430 \text{ Nmm}$ može se izračunati da je moment oko točke O_1 gledano od strane koračnog motora ako se zanemare gubitci jednak:

$$M_{KM_{O_1}} = M_{KM_2} i_2 = 430 \cdot 18 = 7740 \text{ Nmm} \quad (2.16)$$

Nakon toga je potrebno provjeriti sigurnost drugog motora koja je jednaka:

$$S_2 = \frac{M_{KM_{O_1}}}{M_{O_1}} = \frac{7740}{1461,35} = 5,2965 \quad (2.17)$$

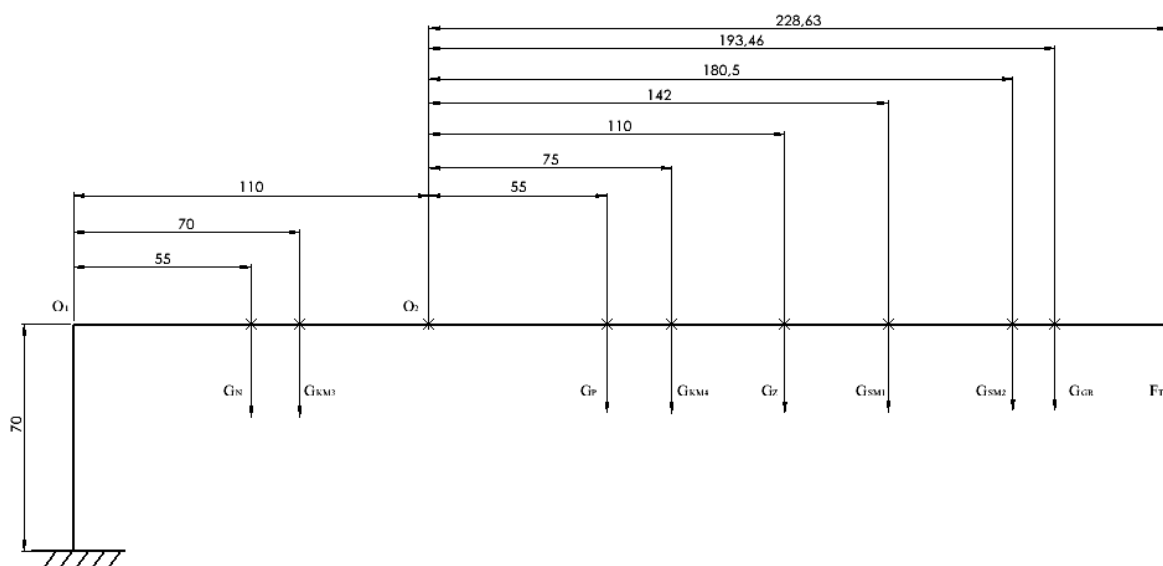
Također se može izračunati rezerva momenta koja je jednaka:

$$M_{R_2} = M_{KM_{0_1}} - M_{O_1} = 7740 - 1461,35 = 6278,65 \text{ Nmm} \quad (2.18)$$

Time se dakle može izračunati teoretski maksimalna nosivost tereta preko drugog motora. Stoga se težina tereta koja se može podići računa na sljedeći način:

$$F_{T_2} = \frac{M_{R_2}}{338,63} = \frac{6278,65}{338,63} = 18,54 \text{ N} \quad (2.19)$$

Za treći koračni motor se također preko jednadžbe momenta izračunala sigurnost i rezerva nosivosti tereta.



Slika 13. Djelovanje sila oko točke O₂

Kod slučaja za treći koračni motor za momentnu jednadžbu potrebno je gledati djelovanje sila oko točke O₂. S time valja uzeti u obzir da se sile s lijeve strane točke O₂ ne uzimaju u obzir jer one ne utječu na djelovanje trećeg koračnog motora. Kada se nova momentna jednadžba zapiše ona izgleda sljedeće:

$$M_{O_2} = G_P \cdot 55 + G_{KM_2} \cdot 75 + G_Z \cdot 110 + G_{SM_1} \cdot 142 + G_{SM_2} \cdot 180,5 + G_{GR} \cdot 193,46 \quad (2.20)$$

Nakon ubacivanja vrijednosti iz (2.) u (2.8) dobije se sljedeće:

$$M_{O_2} = 0,91 \cdot 55 + 2,82 \cdot 75 + 0,58 \cdot 110 + 0,56 \cdot 142 + 0,56 \cdot 180,5 + 0,39 \cdot 193,46 \quad (2.21)$$

Nakon izračunavanja dobije se da je moment oko točke O₂ jednak $M_{O_2} = 581,40 \text{ Nmm}$.

Kako su svi koračni motori istih karakteristika tako je i dopušteni moment trećeg motora jednak momentima prethodna dva tj. $M_{KM_3} = M_{KM_2} = 430 \text{ Nmm}$ i pošto je redukcija za treći motor na točku O₂ definirana preko prijenosnog omjera i_3 može se izračunati moment oko točke O₂ od strane trećeg koračnog motora, a on glasi:

$$M_{KM_{O_2}} = M_{KM_3} i_3 = 430 \cdot 3 = 1290 \text{ Nmm.} \quad (2.22)$$

Iz toga se može izračunati sigurnost na trećem koračnom motoru koja iznosi:

$$S_3 = \frac{M_{KM_{O_2}}}{M_{O_2}} = \frac{1290}{581,40} = 2,2188 \quad (2.23)$$

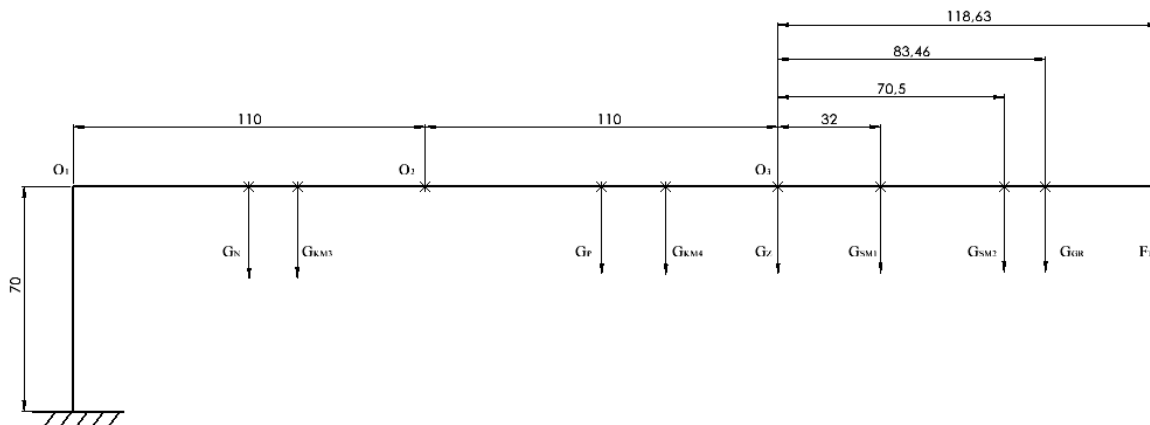
Iz toga se može izračunati rezerva momenta koja kada se uvrste vrijednosti prethodnih jednadžbi glasi:

$$M_{R_3} = M_{KM_{O_2}} - M_{O_2} = 1290 - 581,40 = 708,6 \text{ Nmm} \quad (2.24)$$

Nakon toga je izračunata teoretski maksimalna težina tereta koja se može podići pomoću trećeg motora, a ona je jednaka:

$$F_{T_3} = \frac{M_{R_3}}{228,63} = \frac{708,6}{228,63} = 3,1 \text{ N} \quad (2.25)$$

Za četvrti koračni motor slijedi ista relacija kao i za prethodne. Na slici 13. može se vidjeti položaj točke O_3 u odnosu na sile.



Slika 14. Djelovanje sila oko točke O_3

Ovdje se također prilikom zapisivanja momentne jednadžbe oko točke O_3 zanemaruju sile s lijeve strane točke. U konačnici momentna jednadžba oko točke O_3 izgleda sljedeće:

$$M_{O_3} = G_{SM_1} \cdot 32 + G_{SM_2} \cdot 170,5 + G_{GR} \cdot 83,46 \quad (2.26)$$

Kada se u prethodnu jednadžbu uvrste vrijednosti iz () dobijemo sljedeće:

$$M_{O_3} = 0,56 \cdot 32 + 0,56 \cdot 170,5 + 0,39 \cdot 83,46 \quad (2.27)$$

U konačnici moment oko točke O_3 iznosi $M_{O_3} = 145,95$ Nmm. Pošto je moment četvrtog motora jednak $M_{KM_4} = 430$ Nmm uz prijenosni omjer $i_4 = 3$ dobije se da je moment oko točke O_3 od strane motora jednak:

$$M_{KM_{O_3}} = M_{KM_4} i_4 = 430 \cdot 3 = 1290 \text{ Nmm.} \quad (2.28)$$

Stoga je sigurnost četvrtog motora jednaka:

$$S_4 = \frac{M_{KM_{O_3}}}{M_{O_3}} = \frac{1290}{145,95} = 8,8386 \quad (2.29)$$

Rezerva momenta oko točke O_3 glasi sljedeće:

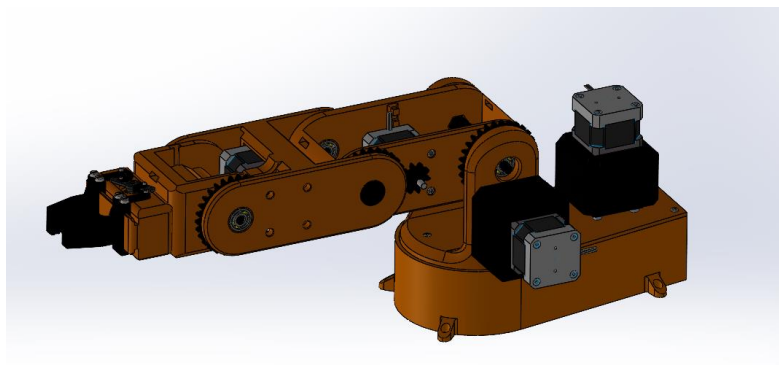
$$M_{R_4} = M_{KM_{O_3}} - M_{O_3} = 1290 - 145,95 = 1144,05 \text{ Nmm} \quad (2.30)$$

Iz toga slijedi da je teorijski maksimalna težina koju četvrti motor može podići jednaka:

$$F_{T_4} = \frac{M_{R_4}}{118,63} = \frac{1144,05}{118,63} = 9,64 \text{ N} \quad (2.31)$$

Za prvi servo motor nije potrebno provjera nosivosti pošto motor ima relativno veliku propisanu nosivost te mora podnijeti najmanje tereta u odnosu na ostale te se sa sigurnošću može reći da mu sigurnost nije manja od najmanje sigurnosti ostalih motora, a isto tako ima dovoljno rezerve da može podnijeti najveću dopuštenu masu kad se usporede nosivosti svih motora.

Na kraju kada se usporede nosivosti svih motora može se zaključiti da je teoretski maksimalna dozvoljena nosivost robota jednaka nosivosti trećeg koračnog motora i ona iznosi 3,1 N odnosno 0,32 kilograma.



Slika 15. CAD model gotovog robota

Radni opseg robota je jednak 350,23 mm.

2.4. Izrada dijelova robota

Nakon provedenog proračuna i nakon što je on zadovoljio bilo je potrebno izraditi dijelove da bi se moglo započeti s programiranjem samog robota. Za izradu dijelova korištena je

tehnologija 3D printanja. Tehnologija 3D printanja je odabrana zbog kompleksnosti izrade optimiranih dijelova koji za tu tehnologiju ne predstavljaju nikakav problem. Korišteni su printeri na FDM principu printanja. FDM postupak printanja radi na način da se plastična nit određene vrste plastike (u ovom slučaju PET-G) zagrije na predviđenu temperaturu te se ona u dovoljno mekanom stanju istiskuje kroz mlaznicu te se model koji se izrađuje printa sloj po sloj koji može biti različitih debljina ovisno o konfiguraciji prilikom pripreme modela u odabranom softveru te o veličini same mlaznice. Za naš slučaj debljina sloja je iznosila 0,2 mm. Naravno smanjenjem debljine sloja dobije se ljepši konačni rezultat te je samim time i model preciznije napravljen dok s druge strane zbog toga raste vrijeme printanja. Kako je i ranije navedeno kao materijal za izradu je odabrana PET-G plastika. Ima vrlo dobra svojstva koja joj omogućuju široko područje primjene. Ima veliku čvrstoću te dosta dobru otpornost na povišene temperature. Time je ona savršena opcija u sredini između PLA koji se lakše printa no ima lošija mehanička svojstva te ABS-a koji ima puno bolja mehanička svojstva no puno se teže printa. Nakon što su dijelovi izrađeni i nakon što je isprobana njihova međusobna kompatibilnost moglo se započeti s izradom programa za upravljanje robotom. U nastavku je dano nekoliko slika gotovih dijelova izvornog dizajna izrađenih pomoću 3D printanja.



Slika 16. Planetarni reduktor s koračnim motorom



Slika 17. Isprintano rame robota



Slika 18. Isprintano zapešće robota



Slika 19. Isprintana baza robota



Slika 20. Isprintana nadlaktica robota

3. PROGRAMIRANJE ROBOTA

Za rad robota bilo je potrebno izraditi program tako da se njime može upravljati te je uz to bilo potrebno napisati program za automatsko obavljanje nekog zadatka. Programiranje je provedeno u Arduino IDE softveru koji je baziran na C++ programskom jeziku što omogućuje jednostavan rad. Softver je besplatan za preuzimanje. Sam program je bilo moguće napisati u bilo kojem softveru koji je baziran na C++. Kako je ranije navedeno, bilo je potrebno izraditi dio za ručni mod rada te isto tako za automatski. U nastavku slijedi detaljno objašnjenje svakog moda rada.

3.1. Ručni mod rada

U ručnom modu rada bilo je potrebno izraditi program tako da se može upravljati svim stupnjevima slobode robota. Upravljanje se vrši po zglobovima pojedinačno te zbog većeg broja zglobova omogućuje vrlo velik broj mogućih položaja. Motorima odnosno zglobovima se može upravljati jedan po jedan ili više njih odjednom. Za upravljanje se koristi upravljačka kutija prikazana na slici niže.



Slika 21. Upravljačka kutija robota

Upravljanje prva četiri motora se vrši pomoću dva joystick modula od kojih svaki omogućuje upravljanje dvoje motora. Okretanje zapešća se vrši pomoću potenciometra dok se hvataljka aktivira pritiskom tipkala.

3.2. Automatski mod rada

U automatskom modu rada bilo je potrebno napisati program pomoću kojega robot obavlja određeni zadatak. Program je napisan tako da se iskoriste svi stupnjevi slobode kako bi se pokazale mogućnosti robota. Pokretanjem automatskog moda rada robot postavlja sve stupnjeve u nulte vrijednosti odnosno pozicionira se u početni položaj. Nakon toga kreće u izvođenje zadanog programa čija je radnja uzimanje dijela s jedne točke u prostoru te njegovo stavljanje u drugu točku. Radnja će se ponavljati tako dugo dok se ne prekine pomoću prekidača na upravljačkoj kutiji. Program je izrađen u offline načinu što bi u industrijskom programiranju značilo da se ne prekida proizvodnja, odnosno rad robota tijekom pisanja programa. U ovom slučaju je bilo potrebno svakih nekoliko koraka isprobati ispravnost programa robota da se spriječi pojavljivanje greške kada bi program bio gotov što bi onda uvelike zakompliciralo njezino pronalaženje i otklanjanje.

4. TOPOLOŠKA OPTIMIZACIJA DIJELOVA

Nakon što je u uvodu ukratko objašnjeno što je to topološka optimizacija sada je važno objasniti zašto je ona odabrana za temu ovog rada. Razlog je sljedeći. Naime kako su ljudske sposobnosti i um ograničeni, a tržište zahtjeva sve kompleksnije i kreativnije konstrukcije uz pomoć nikad razvijenije tehnologije moguće je udovoljiti svim zahtjevima tržišta. Kako je topološka optimizacija relativno nova tehnologija u usporedbi s klasičnim konstruiranjem i modeliranjem samim time nije toliko poznata u širem svijetlu. U ovom radu se željela prikazati jednostavnost postupka topološke optimizacije što se tiče korištenja softvera koji to omogućuju. Isto tako se htjelo pokazati da topološki optimirani dijelovi nisu samo zanimljivog izgleda već su i funkcionalni kao i prije optimizacije uz dodatne benefite što se tiče samog postupka proizvodnje. Valja također naglasiti da su softveri koji su korišteni u nastavku odabrani nakon određenog istraživanja glede kvalitete same optimizacije te su se u konačnici uzeli softveri za koje bilo moguće dobiti valjanu studentsku/akademsku licencu.

4.1. Topološka optimizacija u Solidworksu

Kako je i ranije spomenuto u Solidworks programskom paketu su rađeni "sirovi" dijelovi koji su kasnije optimirani. Za početak je potrebno postaviti zadani materijal, sva uklještenja dijelova te nakon toga zadana opterećenja na odgovarajuća mjesta. Solidworks nudi razne vrste opterećenja što omogućuje u konačnici točnije rezultate. Također omogućuje biranje minimalne dozvoljene debljine optimiranog dijela. Isto tako je moguće označiti određena područja na komadu koja se žele sačuvati od optimizacije. Kod toga je problem da se ne može jednostavno označiti određeni dio na npr. ravnoj ploči te odrediti veličinu sačuvanog dijela. To je potrebno napraviti unaprijed izvan same topološke optimizacije. Jedna korisna stvar koja unaprijeđuje konačni izgled je mogućnost simetrije odnosno time bi se dobile dvije jednako optimirane strane u odnosu na odabranu os simetrije. Isto tako je moguće kontrolirati samo optimizaciju tako da se gotov komad može koristiti kao pozitiv u izradi kalupa. Nakon što se svi početni parametri potrebno je odrediti za koliko se želi smanjiti početna masa. Kako je i ranije navedeno odabrano je da će se za sve dijelove u svim softverima pa tako i ovdje koristiti redukcija mase/volumena za 20%. Potrebno je nakon toga postaviti mrežu konačnih elemenata po cijelome dijelu. Što je mreža gušća sama optimizacija će kasnije biti kvalitetnija i preciznija. Naravno povećanjem gustoće mreže produljuje se i vrijeme optimiranja. Solidworks ne nudi opciju da se odmah vide konačni rezultati već je dobiveni rezultati potrebno spremati kao novi *Part* te staviti opciju zaglađivanja čime se sve interpolirane linije oblikuju u krivulje i dobije se gladi konačni dio. U nastavku su dane slike konačnih dijelova nakon optimiranja.



Slika 22. Topološki optimirano rame u programu Solidworks



Slika 23. Topološki optimirana nadlaktica u programu Solidworks



Slika 24. Topološki optimirana podlaktica u programu Solidworks



Slika 25. Topološki optimirano zapešće u programu Solidworks

4.2. Topološka optimizacija u Fusion 360

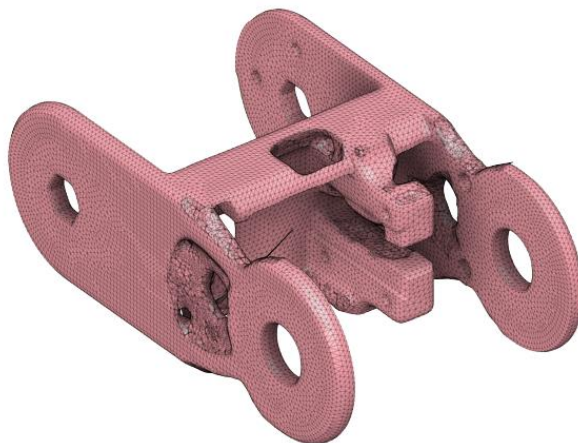
U Fusion 360 programskom paketu slične su opcije kao i kod Solidworksa. Značajnija razlika u odnosu na Solidworks je ta da se topološka optimizacija ne odvija direktno u softveru nego na njegovom *cloud-u* [3]. Iako postoji studentska licenca za Fusion 360 topološka optimizacija nije besplatna. Kao početni paket za studente dobije se 100 besplatnih tokena kojima se plaćaju sve operacije na cloudu pa tako i topološka optimizacija. Velika prednost u odnosu na Solidworks je ta da se jednostavnije mogu odrediti elementi koji će se izuzeti iz optimizacije i ta je opcija dostupna u samoj rubrici za optimiranje. Također je moguće sve dijelove koji su direktno izrađeni u Solidworksu ubaciti unutra bez ikakve modifikacije odnosno promjene vrste datoteke. U konačnici kad se postave iste postavke za modele kao i u Solidworksu dobije se sljedeće:



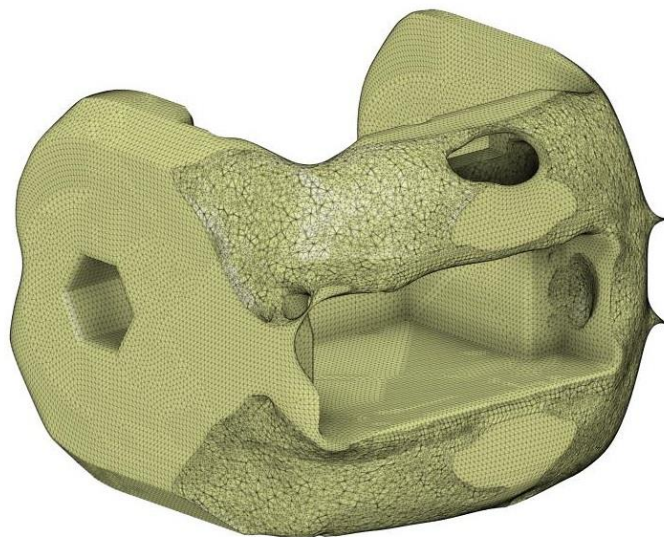
Slika 26. Topološki optimirano rame u programu Fusion 360



Slika 27. Topološki optimirana nadlaktica u programu Fusion 360



Slika 28. Topološki optimirana podlaktica u programu Fusion 360

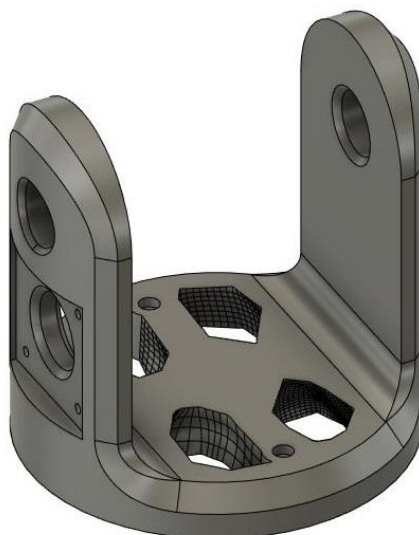


Slika 29. Topološki optimirano zapešće u programu Fusion 360

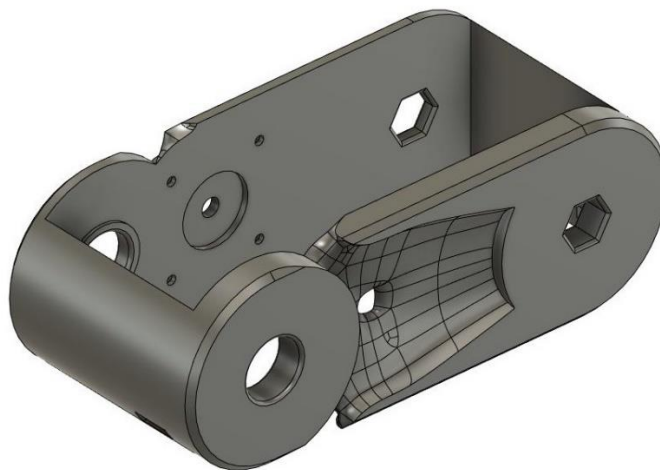
4.3. Topološka optimizacija u CREO Parametric

U CREO Parametric softveru malo je kompliciraniji postupak topološke optimizacije. Prije svega je važno da se svaka topološka optimizacija spremi pod novim imenom ili u novu mapu iz razloga što u slučaju da se radi nova topološka optimizacija pod istim imenom kao i stara makar to bio neki drugu model za razliku od prethodnog novi će se spremiti na mjestu staroga te će se stara optimizacija izbrisati. Od svih ispitanih softvera u ovom radu CREO je jedini koji radi na takav način. Kod svih ostalih softvera je situacija takva da se rezultat optimizacije sprema zajedno s sirovim modelom. Također kako je i ranije spomenuto CREO Parametric je dosta kompliciraniji za korištenje u odnosu na ostale. Potrebna je složenija konfiguracija svih koraka koji se u ostalim softverima riješe jednim klikom ovdje je potrebno preciznije definirati zahtjeve prema softveru. Također je potrebno sve dijelove koji se žele isključiti iz optimizacije

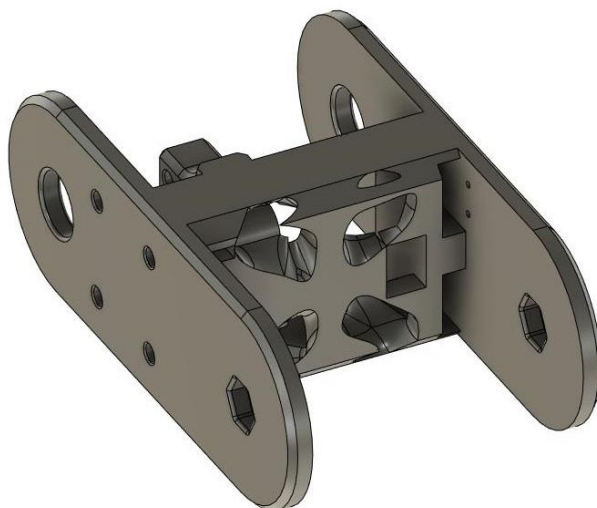
prethodno označiti i izdvojiti ih od samoga dijela što na kraju ispada dosta komplicirano u odnosu na npr. Fusion 360 i Solidworks. Isto tako što se tiče postavljanja sile na kraku potrebno je prethodno nacrtati točku na točnoj poziciji na kojoj djeluje sila za razliku od prethodna dva softvera gdje je potrebno upisati samo koordinate sile u odnosu na globalni ili lokalni koordinatni sustav te upisati vrijednost sile. Također se pokazalo da je softver dosta osjetljiv prilikom stavljanja mreže konačnih elemenata gdje je u velikom broju slučajeva bacaو grešku zbog nepravilno generiranih trokuta. Stoga je bilo potrebno napraviti novu mrežu različite gustoće. U konačnici dosta kompliciranija topološka optimizacija u odnosu na ostale isprobane softvere no te ne potkrepljuje previše s rezultatima. Također valja napomenuti da softver nije uspio napraviti topološku optimizaciju zapešća. U nastavku su dani rezultati optimiranja dijelova.



Slika 30. Topološki optimirano rame u programu CREO Parametric



Slika 31. Topološki optimirana nadlaktica u programu CREO Parametric

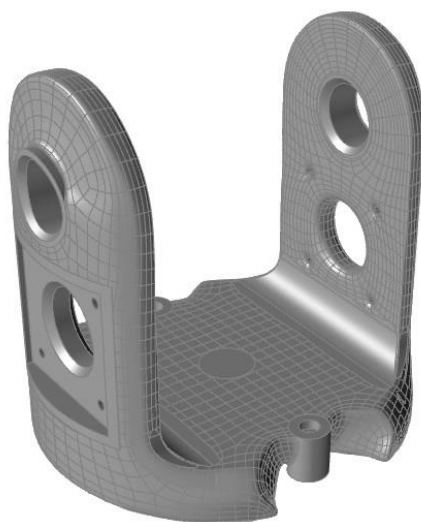


Slika 32. Topološki optimirana podlaktica u programu CREO Parametric

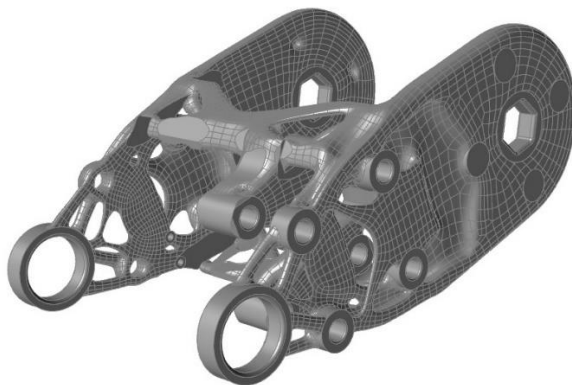
4.4. Topološka optimizacija u Altair Inspire

Altair Inspire se od svih ispitanih softvera pokazao kao najjednostavniji za korištenje što je posljedica jednostavnih naredbi koje ne traže puno konfiguracije. Naravno ta jednostavnost za sobom nosi i neke mane. U odnosu na prethodno ispitane ne nudi toliko opcija za odabir zadane vrste naprezanja, materijala i simetrije. Što se tiče isključivanja određenih elemenata iz topološke optimizacije samu selekciju tih elemenata nije moguće napraviti u njemu. Potrebno je najprije odijeliti u nekom drugom softveru kao npr. Solidworks dijelove koji će se optimizirati, a koji ne. Nakon toga je tek moguće pravilno konfigurirati model za optimizaciju. Kako je spomenuto da postoje problemi kod simetrije što nije situacija kod ostalih ispitanih softvera, a razlog je taj što Altair radi simetriju samo između spojenih dijelova. Kako je ranije

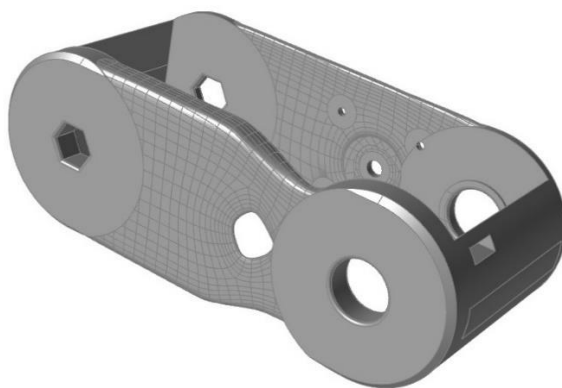
spomenuto da se model mora podijeliti na dvije grupe može se dogoditi problem kao kod podlaktice da se željena simetrija ne može ostvariti zato što softver dijelove koji su i istoj grupi, razdijeljeni su dijelom iz druge grupe smatra u neku ruku različitim modelima. Prilikom odabira optimizacije moguće je odabrati više opcija koje su sljedeće: Topoloy, Topography, Gauge, Topography and Gauge, Lattice te Poly nurbs shape. U našem slučaju je odabrana opcija topology kao i u ostalim softverima. Isto tako se može odrediti vrsta cilja kojem se teži optimizacijom. Ona može biti smanjenje mase, povećanje krutosti te povećanje kritične frekvencije. Kako je i spomenuto na početku poglavlja ovdje je bio cilj smanjenje mase za 20% početne vrijednosti. Nakon postavljanja svih traženih parametara softver relativno brzo izbaci rezultat i to više nego zadovoljavajući što se tiče početne grubosti površine. Kako je nekoliko puta spomenuto da je softver relativno jednostavan za korištenje tako je ugladivanje najjednostavnije napraviti u usporedbi s ostalim ispitanim softverima. Iako jednostavan za korištenje rezultati su sve samo ne jednostavnog oblika. U nastavku su prikazani optimirani dijelovi.



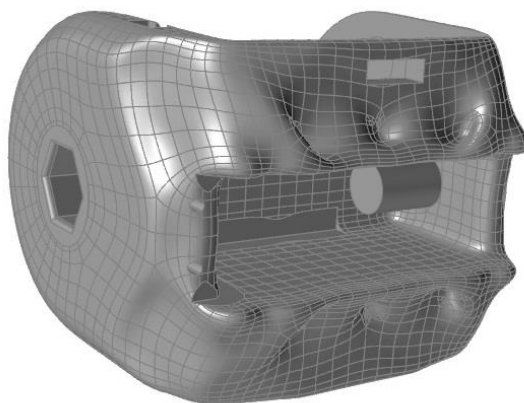
Slika 33. Topološki optimirano rame u programu Altair Inspire



Slika 34. Topološki optimirana nadlaktica u programu Altair Inspire



Slika 35. Topološki optimirana podlaktica u programu Altair Inspire



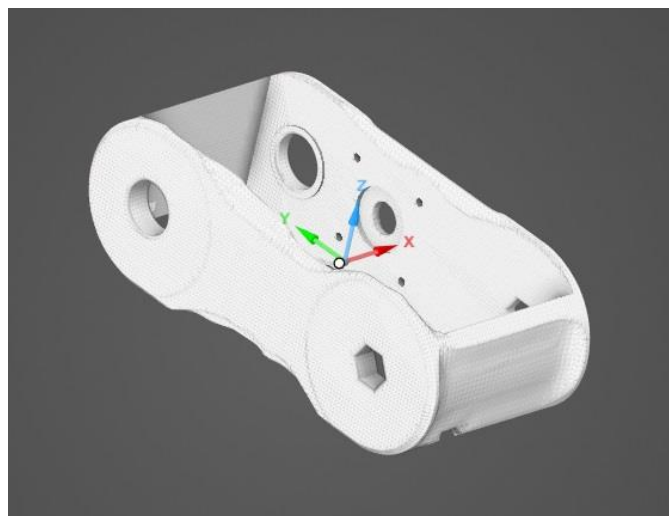
Slika 36. Topološki optimirano zapešće u programu Altair Inspire

4.5. Topološka optimizacija u Ansys Discovery

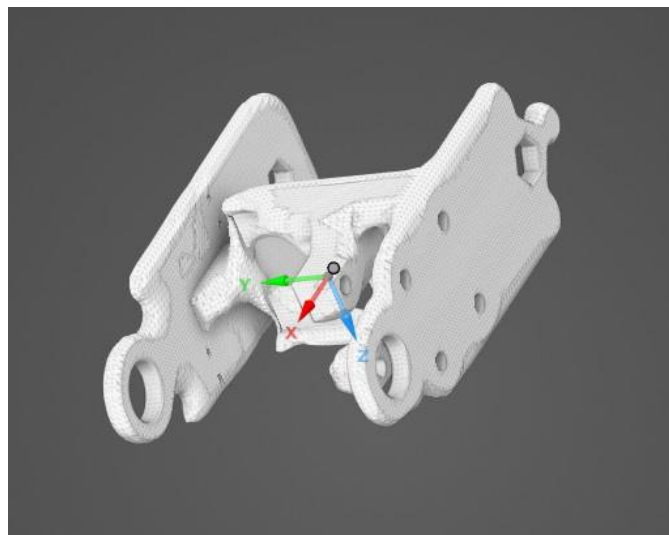
Ansys Discovery spada među sami vrh profesionalnih alata ne samo što se tiče topološke optimizacije. Pohvalno je što za nove korisnike pruža kratak tutorijal upoznavanja što uvelike pomaže kod kasnijeg rada s njim. Sam softver ima određene kriterije što se tiče grafike računala na kojem se radi. Također se moglo primijetiti prilikom korištenja da dosta optereći računalu koje nije imalo problema s prethodnim softverima kod optimizacije istih modela. Iako je to softver koji se koristi za krajnje profesionalne stvari sam dizajn je dosta jednostavno napravljen s naglaskom na lakše korištenje. Nakon što se prođe kroz tutorijal vrlo brzo se pohvataju sve željene opcije. Između ostalog nudi vrlo mnogo opcija za postavljanje opterećenja te vrste materijala. Kod označavanja dijelova koji se ne žele optimizirati dolazi do problema pošto se mogu označiti samo cijele površine te se jedino može prilagoditi dubina očuvanja. Također je potrebno datoteke koje se uvoze, ako su rađene u nekom drugom softveru spremi u oblik koji odgovara Ansys-u. Softver vrlo brzo optimizira model te se prilikom optimizacije prikazuje kako se postepeno mijenja oblik modela do konačnog izgleda. Valja napomenuti da iako softver radi na studentskoj licenci ima dosta više ograničenja od ostalih isprobanih softvera. Naime nakon optimiranja modela nije ga moguće spremi u obliku pogodnom za npr. 3D printanje, odnosno može se spremi samo u jednoj vrsti datoteke koja se može otvoriti samo u njemu. Također ima ograničen broj čvorova prilikom postavljanja mreže konačnih elemenata. U nastavku su prikazane fotografije optimiranih dijelova.



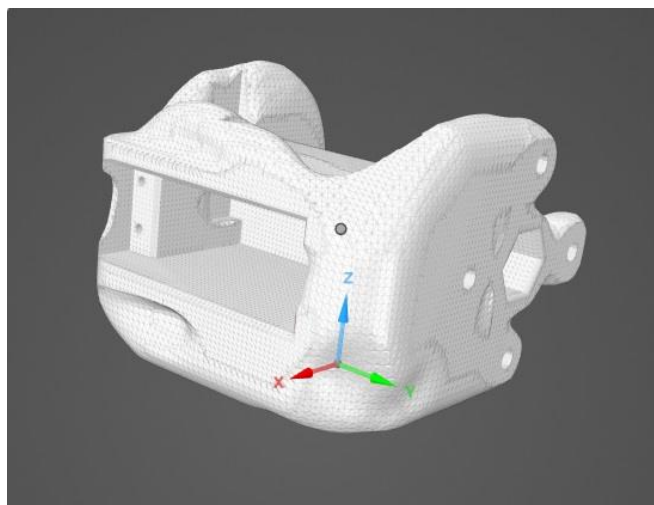
Slika 37. Topološki optimirano rame u programu Ansys Discovery



Slika 38. Topološki optimirana nadlaktica u programu Ansys Discovery



Slika 39. Topološki optimirana podlaktica u programu Ansys Discovery



Slika 40. Topološki optimirano zapešće u programu Ansys Discovery

4.6. Odabir dijelova za izradu i njihova izrada

Nakon što su provedene topološke optimizacije svih dijelova u svih programima bilo je potrebno odabrati dijelove koji će se izraditi. Nakon konzultacije s mentorom odlučeno je da će se izraditi rame, podlaktica i zapešće. Nadlaktica nije izrađena iz razloga što optimirani dijelovi nisu estetski bili na razini ostalih te se nije u potpunosti pokazala prednost topološke optimizacije glede zanimljivog unikatnog dizajna. U konačnici za rame je odabran topološki optimiran dio u CREO Parametric prikazan na slici 26. Za podlakticu je odabran dio koji je optimiran u programu Altair Inspire koji je prikazan slikom 30. Za zapešće je odabran komad optimiran u programu Fusion 360 prikazan na slici 25. Može se vidjeti da su svi odabrani dijelovi optimirani u različitim softverima. To dovodi do zaključka da niti jedan program nije idealan te da konačan rezultat ovisi o izgledu početnog dijela, odnosno njegovoj konstrukciji te sposobnosti programa da pokuša donijeti u najbolje rješenje u svim pogledima. To naravno ne znači da su drugi programi manje loši. Ovdje se prilikom odabira najviše gledalo na vizualno prezentaciju kojom se htjelo najbolje prikazati mogućnosti topološke optimizacije. U nastavku su dane slike isprintanih odabranih optimiranih dijelova.



Slika 41. Isprintano optimirano rame



Slika 42. Isprintana optimirana podlaktica



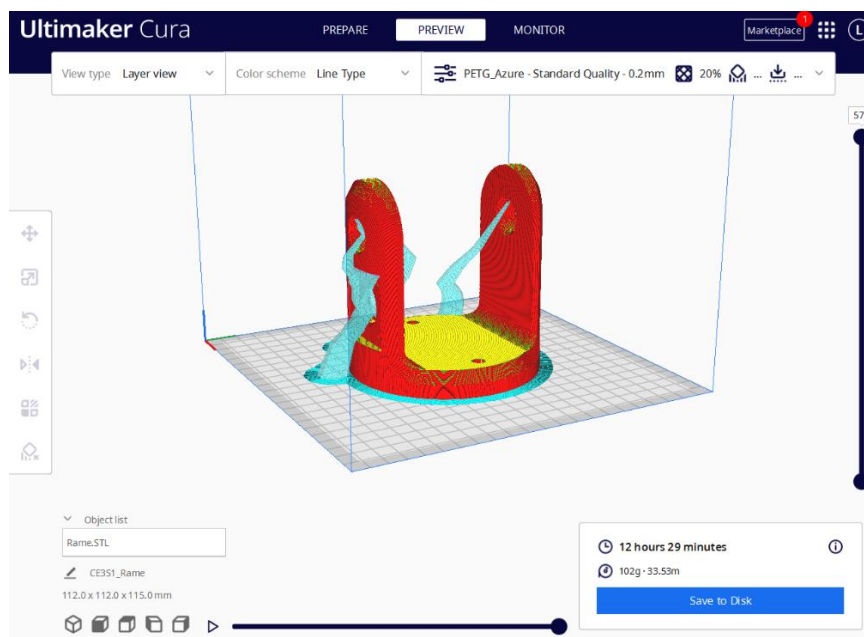
Slika 43. Isprintano optimirano zapešće

5. REZULTATI

Nakon što su isprintani odabrani dijelovi koji su prikazani u prethodnom poglavlju, zajedno s ostalim dijelovima sklopljen je željeni robot.

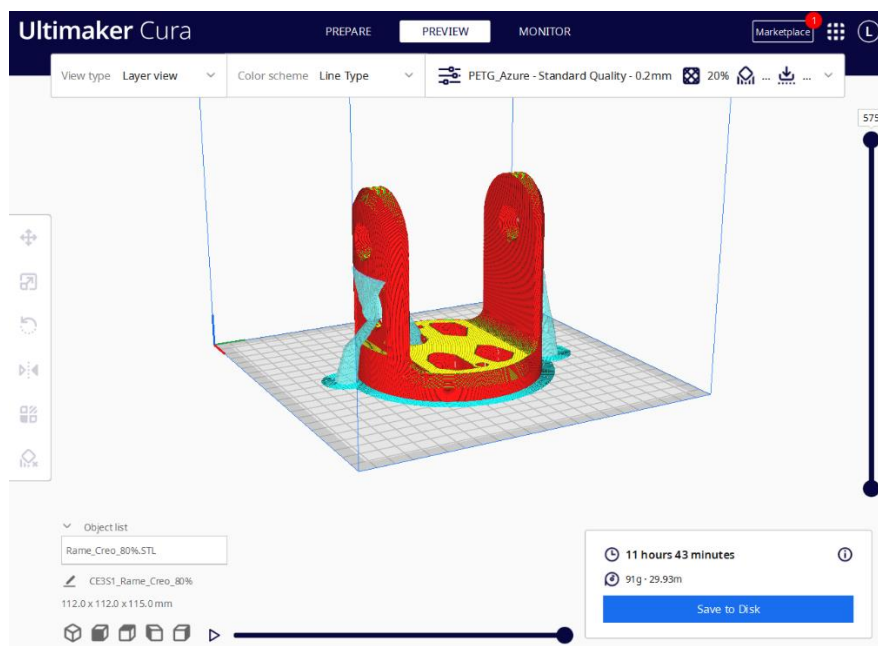
5.1. Usporedba početnih dijelova s optimiranim

Nakon što su izrađeni svi željeni dijelovi odlučeno je da se napravi usporedba optimiranih i osnovnih dijelova. Naravno što se tiče samog dizajna tu su puno bolji optimirani dijelovi. Isto tako optimirani dijelovi su za približno 20% lakši od početnih. Što se tiče raspodjele opterećenja te otpornost dijelova na njih u pravilu je za očekivati da optimirani dijelovi mogu podnijeti opterećenja istovjetna onima koja su unesena na početne dijelove tijekom konfiguriranja optimizacije. Kao program za pripremu dijelova za 3D printanje korišten je Cura softver. Cura je jedan od najpoznatijih i najkvalitetniji softvera za pripremu modela za 3D printanje. Vlasništvo je svjetski poznate marke 3D printera Ultimaker. Osim vlastitih nudi i na desetine drugih marki printera za koje je moguće složiti konfiguraciju modela po želji [10]. U njemu je dovoljno precizno pretpostavljeno vrijeme printanja te masa plastike potrebne za izradu. Početni i optimirani dijelovi koji su se printali su prilikom pripreme postavljeni na isti način na radnu ploču te su postavljeni iste postavke printanja. U nastavku su dane slike na kojima su prikazani dijelovi kako izgledaju neposredno nakon završetka printanja te predviđeno vrijeme trajanja printanja i potrošnja materijala. Kod ramena je za osnovni izgled potrebno 12 sati i 29 minuta da se dio isprinta. Za to je predviđena potrošnja materijala od 102 g što se može vidjeti na slici niže.



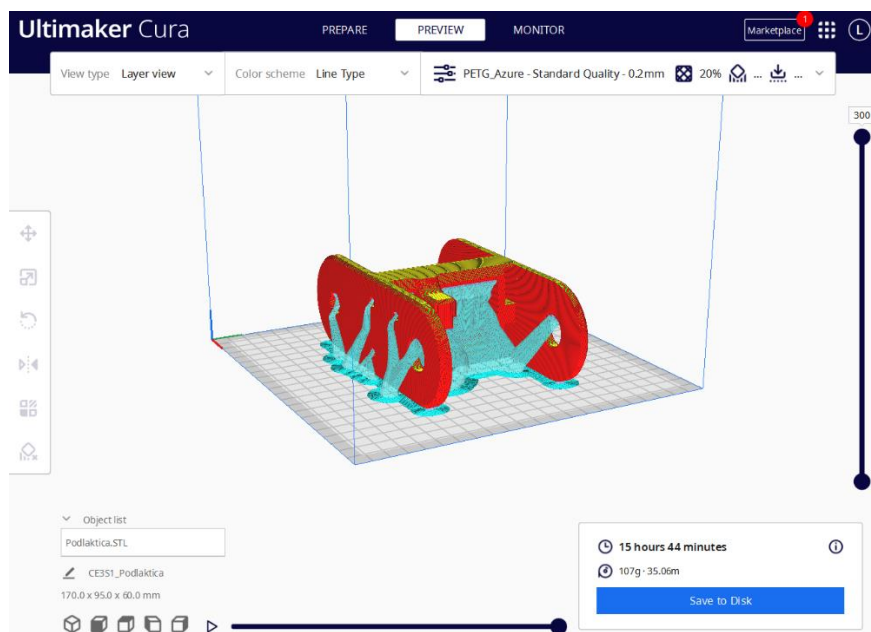
Slika 44. Izgled pripremljenog ramena za printanje

Kod optimiranog ramena predviđeno vrijeme printanja je otprilike 11 sati i 43 minute dok je predviđena potrošnja materijala jednaka 91g što se može vidjeti na slici niže.



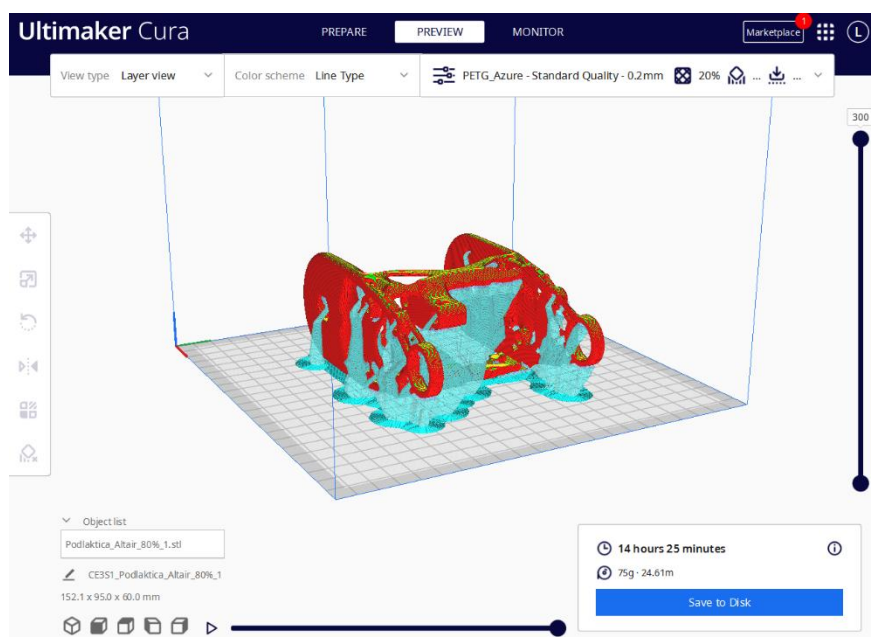
Slika 45. Izgled pripremljenog optimiranog ramena za printanje

Kod osnovnog modela podlaktice vrijeme potrebno za printanje je pridvedeno na otprilike 15 sati i 44 minute dok je masa potrebnog materijala jednaka 107g što se može vidjeti niže.



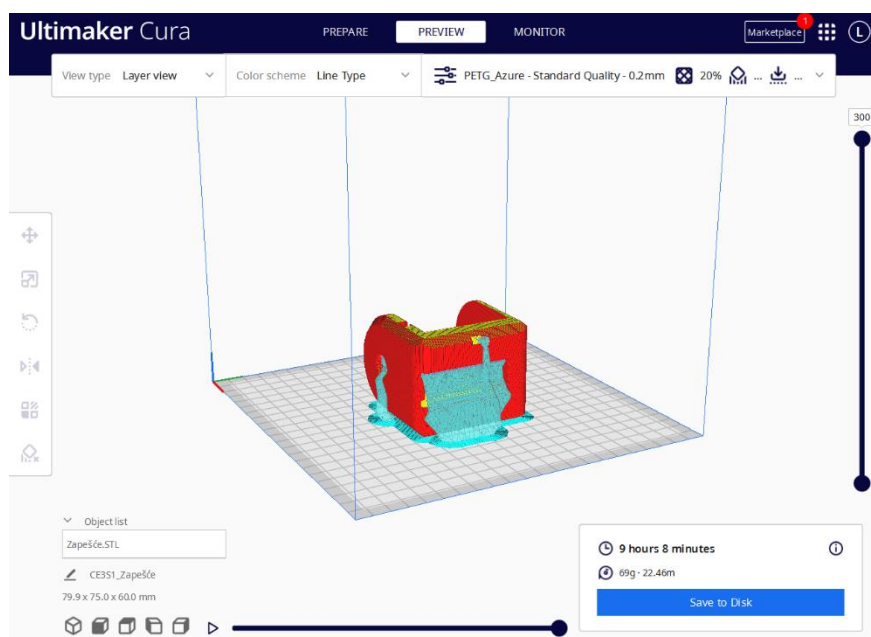
Slika 46. Izgled pripremljene podlaktice za printanje

Optimirana podlaktica ima predviđeno vrijeme printanja od 14 sati i 25 minuta dok je masa materijala potrebnog za izradu jednaka 75g.



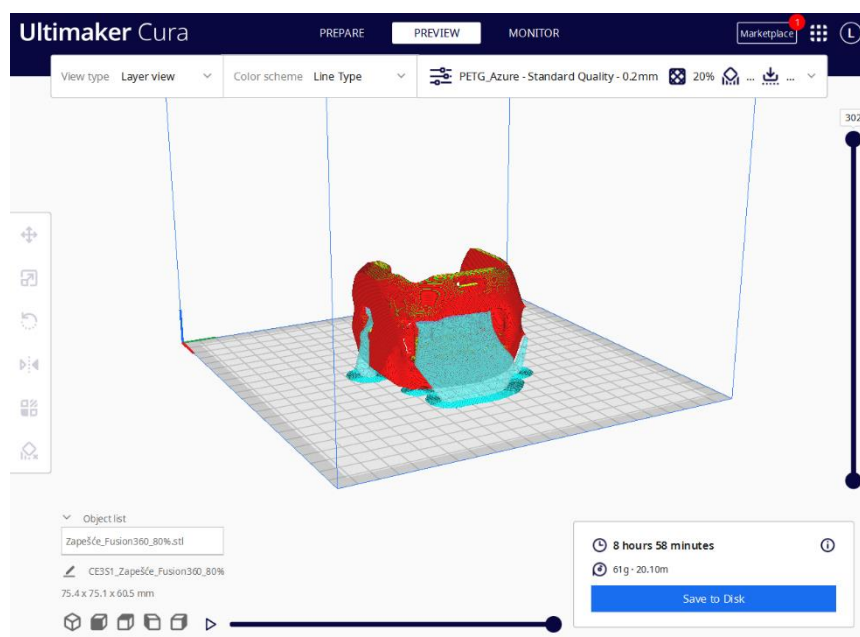
Slika 47. Izgled pripremljene optimirane podlaktice

Kod zapešća je vrijeme potrebno za isprintati osnovni model jednako 9 sati i 8 minuta dok je utrošena masa materijala jednaka 69g kako je i vidljivo na slici niže.



Slika 48. Izgled pripremljenog zapešća za printanje

Za optimirano zapešće predviđeno vrijeme printanja iznosi 8 sati i 58 minuta dok je masa materijala potrebnog za izradu jednaka 61g kako je i prikazano niže.

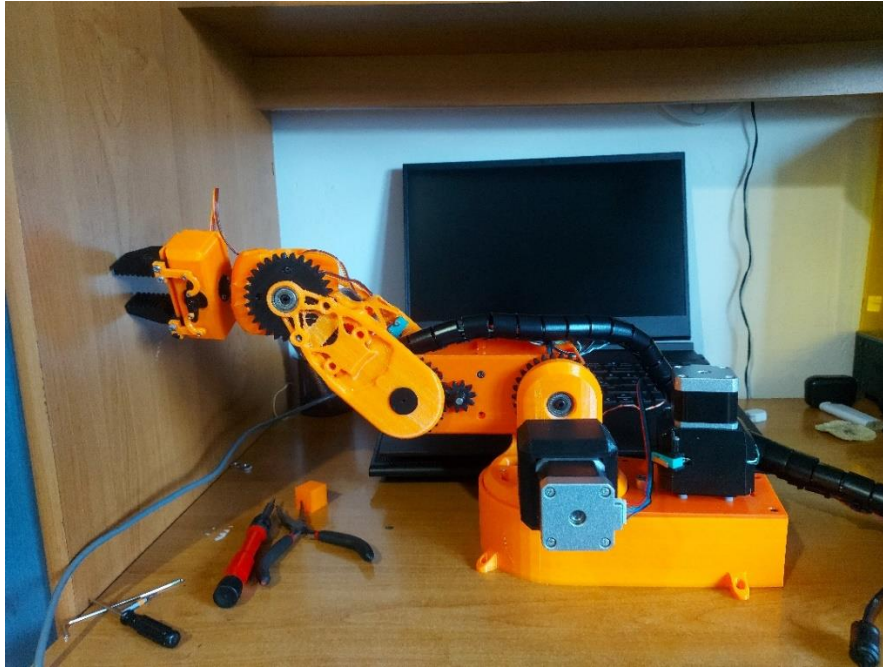


Slika 49. Izgled pripremljenog optimiranog zapešća

U konačnici se može zaključiti da su za svaki dio postignuta dva zahtjeva, a to je smanjenje mase i smanjenje vremena printanja. Isto tako se može zaključiti da što je dio manji teže je doći do željenog rezultata pa čak i nemoguće ako se postavi veći broj ograničenja prilikom pripreme dijela za optimizaciju. Može se vidjeti da najbolje rezultate pokazuje podlaktica koja je optimirana u Altair Inspire-u. Vrijeme printanja je smanjeno za otprilike jedan sat i devet minuta dok je masa smanjena za 32g.

5.2. Izgled gotove konstrukcije

U konačnici bilo je potrebno sklopiti robota te ga kao takvoga isprobati u radu. Svi optimirani dijelovi su bez problema ugrađeni kao i oni početnog dizajna. U nastavku je prikazana gotova konstrukcija.



Slika 50. Gotov robot

6. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je poslužio kao savršen primjer za bolje upoznavanje ne samo robotike u pogledu programiranja već i uvelike kao prilika za stjecanje novih znanja u području konstruiranja. Što se tiče samog programiranja i mogućnosti samog mikrokontrolera može se zaključiti sljedeće. Softver u kojem je izrađen program pokazao se kao jednostavan za korištenje doduše nije idealan za programiranje robota. Što se tiče odabranog mikro kontrolera pokazalo se da njegova memorija uvelike trpi što je složeniji program za automatsko izvođenje zadatka. Samim time se usporio i rad robota što je dovelo do toga da su se pojavile vibracije koračnih motora. Unatoč tome robot je i dalje uspješno izvršavao željene radnje. Što se tiče topološke optimizacije ona se pokazala kao uvelike koristan način konstruiranja dijelova. To je područje koje ima svijetlu budućnost u mnogim granama strojarstva.

LITERATURA

- [1] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 1970.
- [2] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [3] <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview> (15.01.2023.)
- [4] Ćurković, P. & Čubrić, G. (2021) FUSED DEPOSITION MODELLING FOR 3D PRINTING OF SOFT ANTHROPOMORPHIC ACTUATORS. International journal of simulation modelling, 20 (2), 303-314 doi:10.2507/IJSIMM20-2-560.
- [5] Ćurković, P. & Jambrečić, A. (2020) Improving structural design of soft actuators using finite element method analysis. Interdisciplinary description of complex systems, 18 (4), 490-500 doi:10.7906/indec.18.4.8.
- [6] Ćurković, P. (2021) Optimization of Generatively Encoded Multi- Material Lattice Structures for Desired Deformation Behavior. Symmetry, 13 (2), 293, 14 doi:10.3390/sym13020293.
- [7] <https://handsontec.com/index.php/product/17hs4401s-1-7a-nema-17-stepper-motor/> (17.01.2023.)
- [8] <https://www.towerpro.com.tw/product/mg995/> (20.01.2023.)
- [9] <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3> (20.01.2023.)
- [10] <https://ultimaker.com/learn> (21.01.2023.)
- [11] Bruno Siciliano, Oussama Khatib, Springer Handbook of Robotics, 2008.
- [12] <https://lastminuteengineers.com/a4988-stepper-motor-driver-arduino-tutorial/> (21.01.2023)

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Arduino kod
- III. Tehnička dokumentacija

II.Arduino kod

```
#include <Servo.h>
Servo zapesce;
Servo gripper;
int citanje=A5;
int brzina_u_auto_modu = 5000;
int stanje;
const int stepPin_x = 2;
const int dirPin_x = 5;
const int stepPin_y = 3;
const int dirPin_y = 6;
const int stepPin_z = 4;
const int dirPin_z = 7;
const int stepPin_A = 12;
const int dirPin_A = 13;
const int tipkalo = 10;
int stanje_tipkala;
int stanje_prekidaca;
int prekidac = 0;
int vr_x = A1;
int vr_y = A0;
int vr_x1= A2;
int vr_y1 = A3;
int zapesce_ulazno = A4;
int vr_x_stanje = 0;
int vr_y_stanje = 0;
int vr_x1_stanje = 0;
int vr_y1_stanje = 0;
int x = 0;
int y = 0;
int z = 0;
int A = 0;
int brzina_u_rucnom_modu = 500;
int val;
int x1;
int y1;
int x2;
int y2;
int x3;
int y3;
int x4;
int y4;
int home1;
int idemo;
int izlaz_auto=1;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(stepPin_x,OUTPUT);
  pinMode(dirPin_x,OUTPUT);
```

```
pinMode(stepPin_y,OUTPUT);
pinMode(dirPin_y,OUTPUT);
pinMode(stepPin_z,OUTPUT);
pinMode(dirPin_z,OUTPUT);
pinMode(stepPin_A,OUTPUT);
pinMode(dirPin_A,OUTPUT);
pinMode(vrx , INPUT);
pinMode(vry, INPUT);
pinMode(vrx1 , INPUT);
pinMode(vry1, INPUT);
zapesce.attach(9);
gripper.attach(11);
pinMode(tipkalo, INPUT);
pinMode(prekidac, INPUT);
pinMode(citanje,INPUT);
}
void loop(){
  vry1_stanje = analogRead(vry1);
  vrx1_stanje = analogRead(vrx1);
  vry_stanje = analogRead(vry);
  vrx_stanje = analogRead(vrx);
  stanje=analogRead(citanje);
  Serial.println(stanje);
  stanje_prekidaca=digitalRead(prekidac);

  if(stanje_prekidaca==LOW){
    izlaz_auto=0;
    Serial.println("Auto");
    Serial.println("Izlaz auto: ");
    Serial.println(izlaz_auto);
    auto_auto();
  }
  else{
    Serial.println("Rucno");
    rucno();
    idemo=0;
    home1=0;
    izlaz_auto=1;
  }
}
void rucno(){
  joystick1();
  joystick2();
  servo1();
  servo2();
}
void joystick1(){
  Serial.print("Vrx:");
  Serial.println(vrx_stanje);
  if ( (vrx_stanje > 490) && (vrx_stanje < 510)){
```

```
;
}
if (vrx_stanje > 700){
    digitalWrite(dirPin_x,HIGH);
    x=x + 1;
    digitalWrite(stepPin_x,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
    digitalWrite(stepPin_x,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
}
if ( vrx_stanje < 300){
    digitalWrite(dirPin_x,LOW);
    x = x - 1;
    digitalWrite(stepPin_x,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
    digitalWrite(stepPin_x,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
}
Serial.print("Vry:");
Serial.println(vry_stanje);
if ((vry_stanje > 490) && (vry_stanje < 510)){
    ;
}
if (vry_stanje > 700){
    digitalWrite(dirPin_y,HIGH);
    y = y + 1;
    digitalWrite(stepPin_y,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
    digitalWrite(stepPin_y,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
}
if (vry_stanje < 300){
    digitalWrite(dirPin_y,LOW);
    y = y - 1;
    digitalWrite(stepPin_y,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
    digitalWrite(stepPin_y,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
}
}
void joystick2(){
    Serial.print("Vrx1:");
    Serial.println(vrx1_stanje);
    if ( (vrx1_stanje > 490) && (vrx1_stanje < 510)){
        ;
    }
    if (vrx1_stanje> 700){
        digitalWrite(dirPin_z,HIGH);
        digitalWrite(stepPin_z,HIGH);
        delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
```

```
digitalWrite(stepPin_z,LOW);
delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
}
if ( vrx1_stanje < 400){
digitalWrite(dirPin_z,LOW);
digitalWrite(stepPin_z,HIGH);
delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
digitalWrite(stepPin_z,LOW);
delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
}
Serial.print("Vry1:");
Serial.println(vry1_stanje);
if ((vry1_stanje > 490) && (vry1_stanje < 510)){
;
}
if (vry1_stanje > 700){
digitalWrite(dirPin_A,HIGH);
digitalWrite(stepPin_A,HIGH);
delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
digitalWrite(stepPin_A,LOW);
delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
}
if ( vry1_stanje < 300){
digitalWrite(dirPin_A,LOW);
digitalWrite(stepPin_A,HIGH);
delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
digitalWrite(stepPin_A,LOW);
delayMicroseconds(brzina_u_rucnom_modu);
}
}
void servo1(){
val = analogRead(zapesce_ulazno);
val = map(val, 0, 1023, 0, 180);
zapesce.write(val);
delay(15);
}
void servo2(){
stanje_tipkala = digitalRead(tipkalo);
if(stanje_tipkala == LOW){
gripper.write(90);
}else{
gripper.write(0);
}
}
void auto_auto(){
homing_prvi();
homing_drugi();
homing_treci();
homing_cetvrti();
homing_peti();
}
```

```
program();
}
void homing_prvi(){
if(stanje>=900 && stanje<=1020){
digitalWrite(stepPin_z,LOW);
delay(1000);
for(x1=0;x1<30;x1++){
digitalWrite(dirPin_z,HIGH);
digitalWrite(stepPin_z,HIGH);
delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
digitalWrite(stepPin_z,LOW);
delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
y2=0;
y1=1;
x1=0;
delay(1000);
home1=1;
}
else if(y1!=1){
digitalWrite(dirPin_z,LOW);
digitalWrite(stepPin_z,HIGH);
delayMicroseconds(6000);
digitalWrite(stepPin_z,LOW);
delayMicroseconds(6000);
}
}
void homing_drugi(){
if(home1==1){
if(stanje>=100 && stanje<=170){
digitalWrite(stepPin_A,LOW);
delay(1000);
for(x2=0;x2<50;x2++){
digitalWrite(dirPin_A,LOW);
digitalWrite(stepPin_A,HIGH);
delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
digitalWrite(stepPin_A,LOW);
delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
y3=0;
y2=1;
x2=0;
delay(1000);
home1=2;
}
else if(y2!=1){
digitalWrite(dirPin_A,HIGH);
digitalWrite(stepPin_A,HIGH);
delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
digitalWrite(stepPin_A,LOW);
```

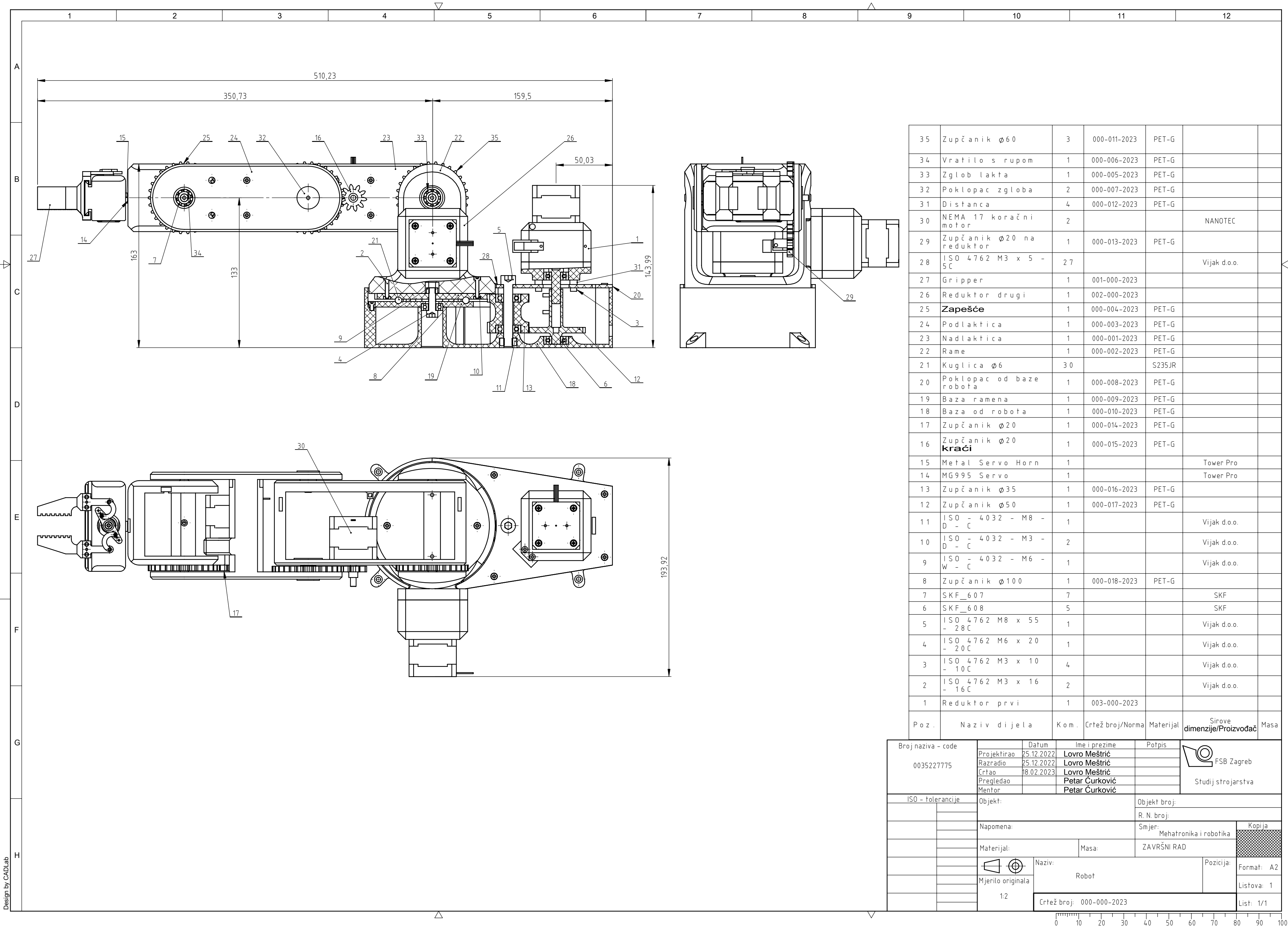
```
delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
}
}
void homing_treci(){
  if(home1==2){
    if(stanje>=32 && stanje<=50){
      digitalWrite(stepPin_y,LOW);
      delay(1000);
      for(x3=0;x3<50;x3++){
        digitalWrite(dirPin_y,HIGH);
        digitalWrite(stepPin_y,HIGH);
        delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
        digitalWrite(stepPin_y,LOW);
        delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
      }
      y3=1;
      x3=0;
      delay(1000);
      home1=3;
    }
    else if(y3!=1){
      digitalWrite(dirPin_y,LOW);
      digitalWrite(stepPin_y,HIGH);
      delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
      digitalWrite(stepPin_y,LOW);
      delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    }
  }
}
void homing_cetvrti(){
  if(home1==3){
    if(stanje>=5 && stanje<=30){
      digitalWrite(stepPin_x,LOW);
      delay(1000);
      for(x4=0;x4<50;x4++){
        digitalWrite(dirPin_x,LOW);
        digitalWrite(stepPin_x,HIGH);
        delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
        digitalWrite(stepPin_x,LOW);
        delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
      }
      y4=1;
      x4=0;
      delay(1000);
      home1=4;
    }
    else if(y4!=1){
      digitalWrite(dirPin_x,HIGH);
      digitalWrite(stepPin_x,HIGH);
```

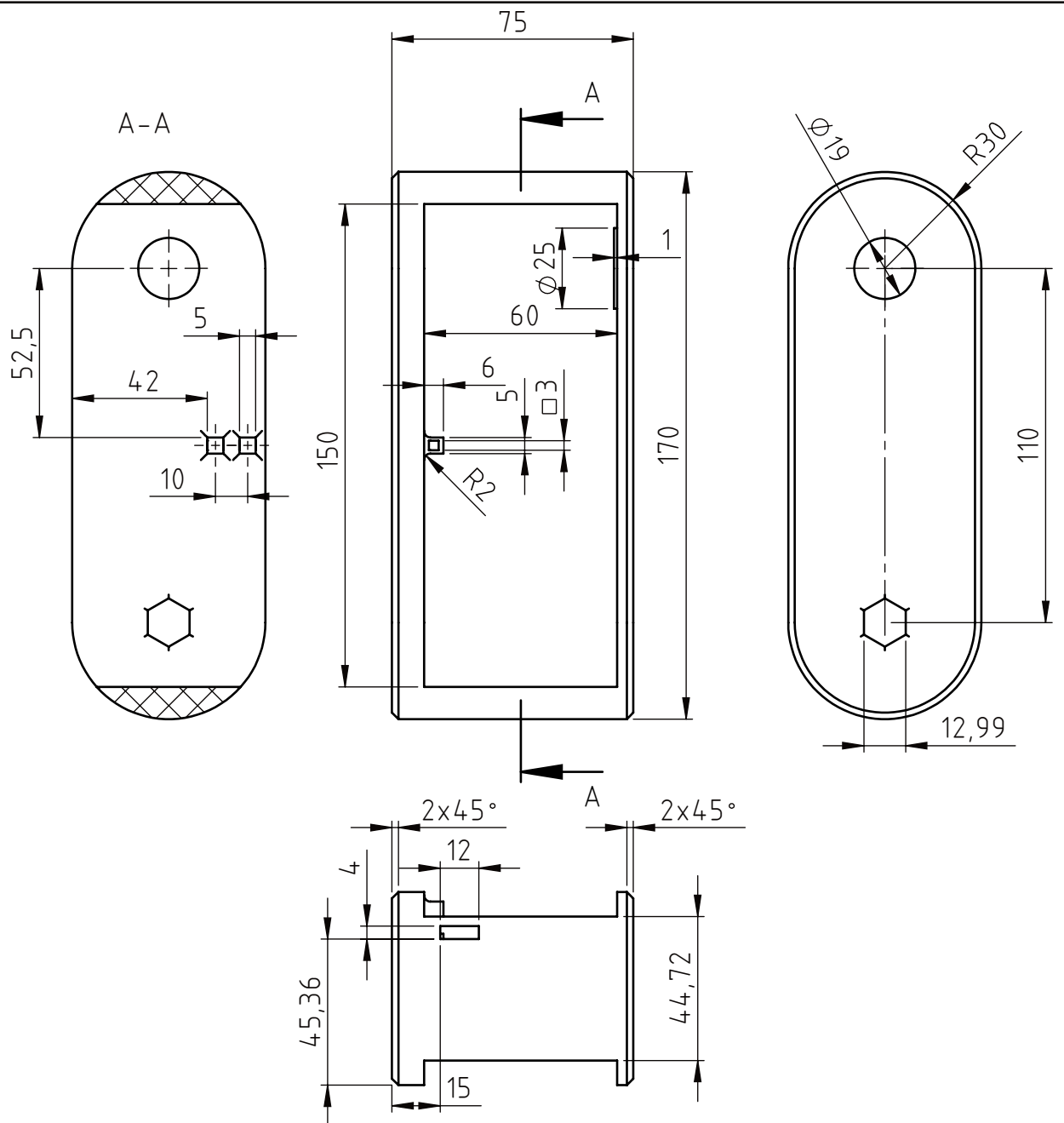
```
delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
digitalWrite(stepPin_x,LOW);
delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
}
}
void homing_peti(){
  if(home1==4){
    zapesce.write(0);
    gripper.write(0);
    home1=5;
    idemo=1;
  }
}
void program(){
  if(izlaz_auto==0){
    if(idemo==1){
      for(x3=0;x3<200;x3++){
        digitalWrite(dirPin_y,HIGH);
        digitalWrite(stepPin_y,HIGH);
        delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
        digitalWrite(stepPin_y,LOW);
        delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
      }
      idemo=2;
      delay(10);
    }
  }
  if(idemo==2 ){
    for(x3=0;x3<100;x3++){
      digitalWrite(dirPin_A,LOW);
      digitalWrite(stepPin_A,HIGH);
      delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
      digitalWrite(stepPin_A,LOW);
      delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    }
    idemo=3;
    delay(10);
  }
  if(idemo==3){
    for(x4=0;x4<300;x4++){
      digitalWrite(dirPin_x,LOW);
      digitalWrite(stepPin_x,HIGH);
      delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
      digitalWrite(stepPin_x,LOW);
      delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    }
    idemo=4;
    delay(10);
  }
}
```

```
if (idemo==4){
for(x1=0;x1<100;x1++){
    digitalWrite(dirPin_z,HIGH);
    digitalWrite(stepPin_z,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    digitalWrite(stepPin_z,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
    idemo=5;
    delay(10);
}
if(idemo==5){
    gripper.write(60);
    idemo=6;
    delay(10);
}
if(idemo==6){
for(x3=0;x3<200;x3++){
    digitalWrite(dirPin_y,HIGH);
    digitalWrite(stepPin_y,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    digitalWrite(stepPin_y,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
    idemo=7;
    delay(10);
}
if(idemo==7){
    zapesce.write(180);
    idemo=8;
    delay(10);
}
if(idemo==8){
for(x1=0;x1<100;x1++){
    digitalWrite(dirPin_z,LOW);
    digitalWrite(stepPin_z,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    digitalWrite(stepPin_z,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
    idemo=9;
    delay(10);
}
if(idemo==9){
for(x4=0;x4<300;x4++){
    digitalWrite(dirPin_x,LOW);
    digitalWrite(stepPin_x,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    digitalWrite(stepPin_x,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
```

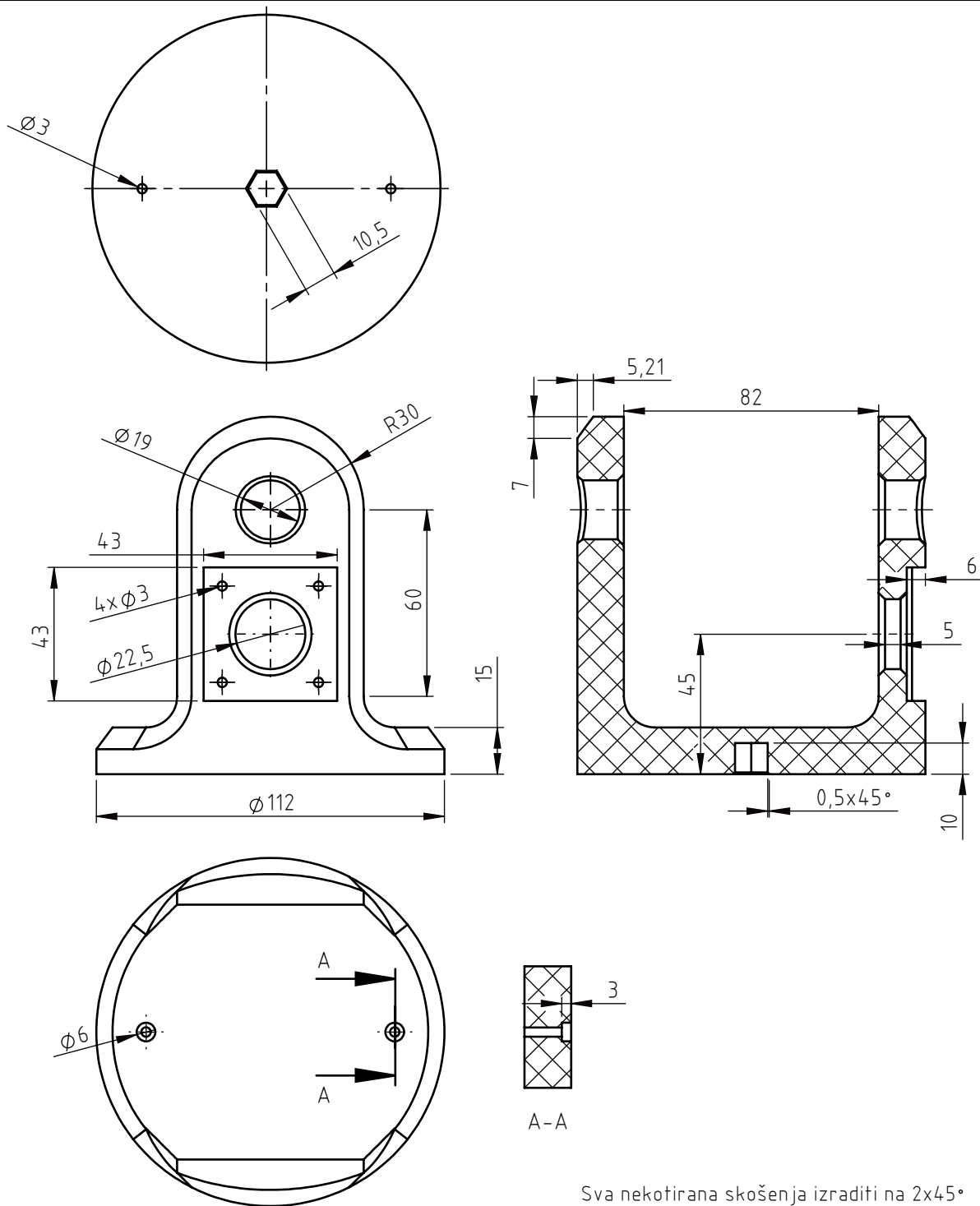
```
}
  idemo=10;
  delay(10);
}
if (idemo==10){
for(x3=0;x3<100;x3++){
  digitalWrite(dirPin_A,HIGH);
  digitalWrite(stepPin_A,HIGH);
  delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
  digitalWrite(stepPin_A,LOW);
  delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
  idemo=11;
  delay(10);
}
if(idemo==11){
for(x1=0;x1<35;x1++){
  digitalWrite(dirPin_z,HIGH);
  digitalWrite(stepPin_z,HIGH);
  delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
  digitalWrite(stepPin_z,LOW);
  delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
  idemo=12;
  delay(10);
}
if(idemo==12){
  gripper.write(0);
  idemo=13;
  delay(10);
}
if(idemo==13){
for(x1=0;x1<35;x1++){
  digitalWrite(dirPin_z,LOW);
  digitalWrite(stepPin_z,HIGH);
  delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
  digitalWrite(stepPin_z,LOW);
  delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
  idemo=14;
  delay(10);
}
if(idemo==14){
  zapesce.write(0);
  idemo=15;
  delay(10);
}
if(idemo==15){
for(x4=0;x4<600;x4++){
  digitalWrite(dirPin_x,HIGH);
```

```
    digitalWrite(stepPin_x,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    digitalWrite(stepPin_x,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
    idemo=16;
    delay(10);
}
if(idemo==16){
for(x3=0;x3<400;x3++){
    digitalWrite(dirPin_y,LOW);
    digitalWrite(stepPin_y,HIGH);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
    digitalWrite(stepPin_y,LOW);
    delayMicroseconds(brzina_u_auto_modu);
}
    idemo=1;
    delay(10);
}
}
```

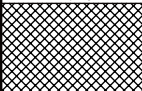
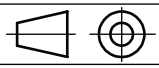


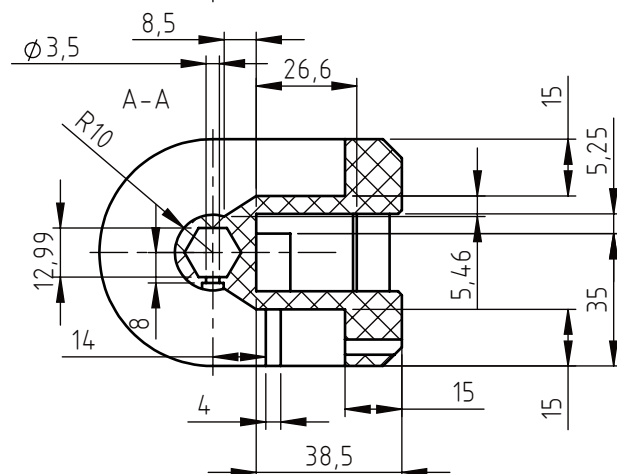
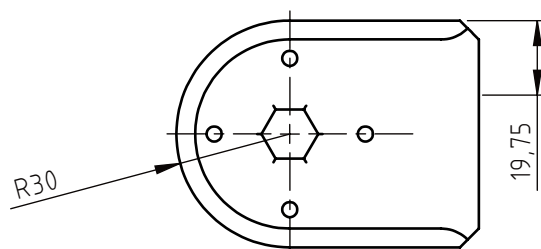
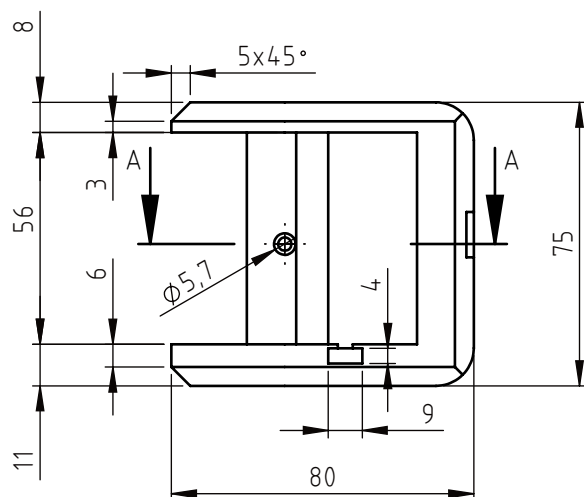
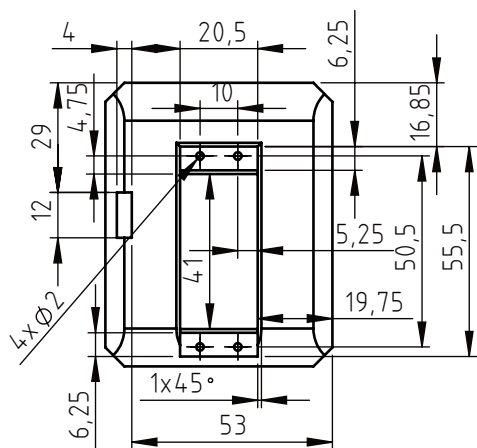


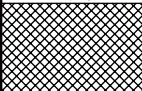
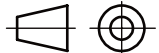
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	23.11.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	23.11.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	17.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer: Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Nadlaktica		23	Listova: 1
1:2	Crtež broj: 000-001-2023			List: 1

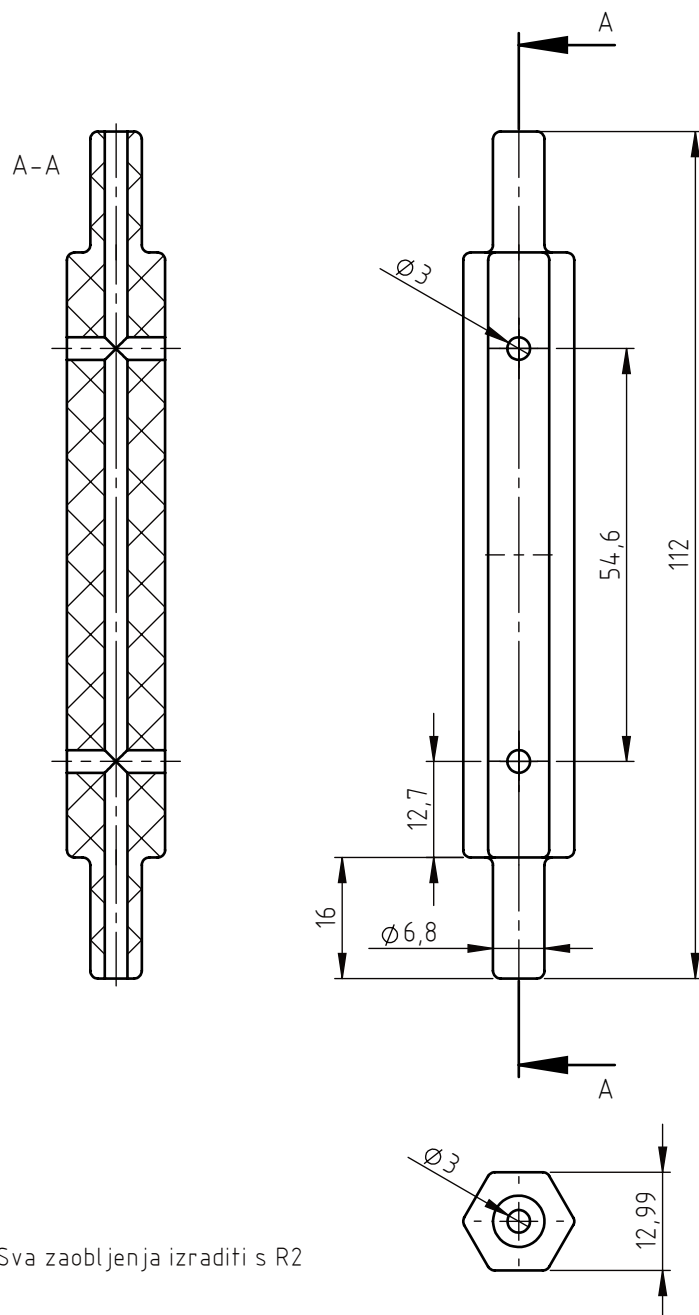


Sva nekotirana skošenja izraditi na $2 \times 45^\circ$

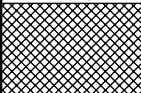
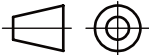
	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	27.11.2022	Lovro Meštrić			
Razradio	27.11.2022	Lovro Meštrić			
Crtao	17.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika		Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
 Mjerilo originala 1:2	Naziv:		Pozicija:	Format: A4	
	Rame		22	Listova: 1	
	Crtež broj: 000-002-2023			List: 1	

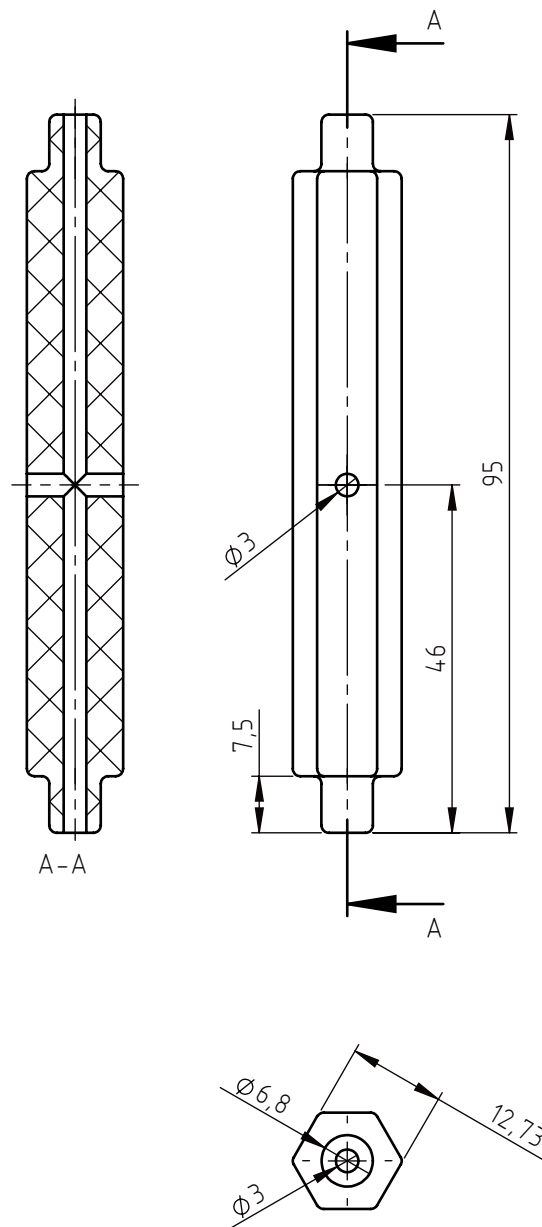


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	27.11.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	27.11.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal:	PET-G	Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv: Zapešće			Pozicija: 25
Mjerilo originala				Format: A4
1:2	Crtež broj: 000-004-2023			Listova: 1
				List: 1

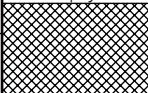


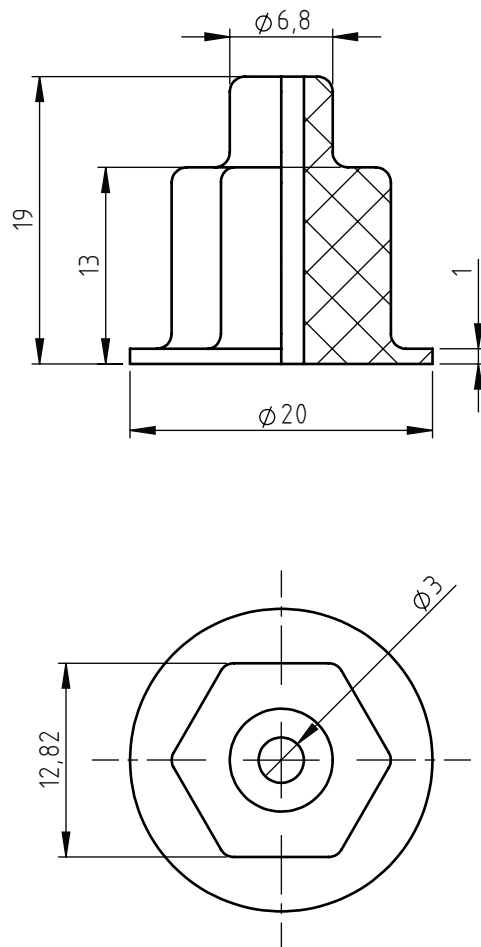
Sva zaobljenja izraditi s R2

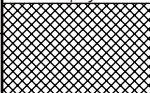
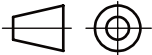
	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	27.11.2022.	Lovro Meštrić			
Razradio	27.11.2022.	Lovro Meštrić			
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija	
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
 Mjerilo originala 1:1	Naziv: Zglob lakta			Pozicija: 33	Format: A4
					Listova: 1
	Crtež broj: 000-005-2023			List: 1	



Sva zaobljenja izraditi s R2

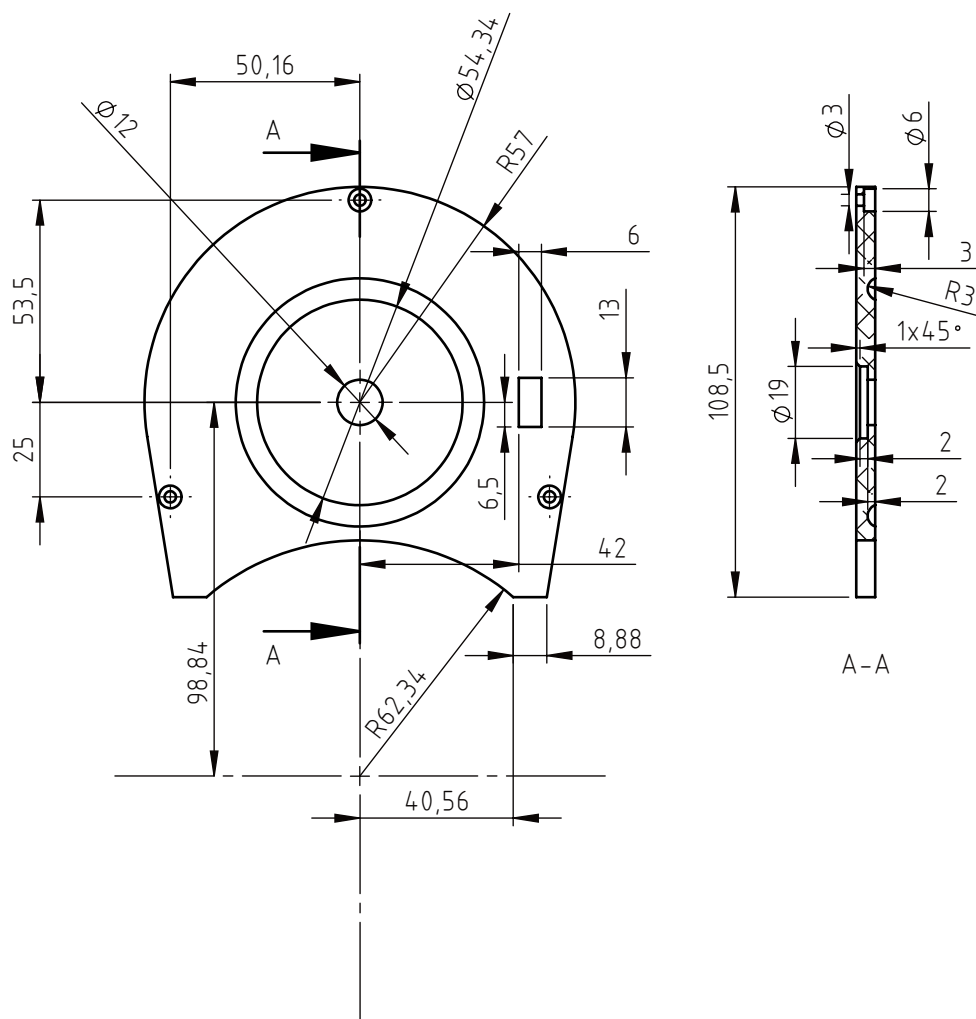
	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	27.11.2022	Lovro Meštrić			
Razradio	27.11.2022	Lovro Meštrić			
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika		Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4	
Mjerilo originala	Vratilo s rupom		34	Listova: 1	
1:1	Crtež broj: 000-006-2023			List: 1	

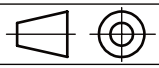


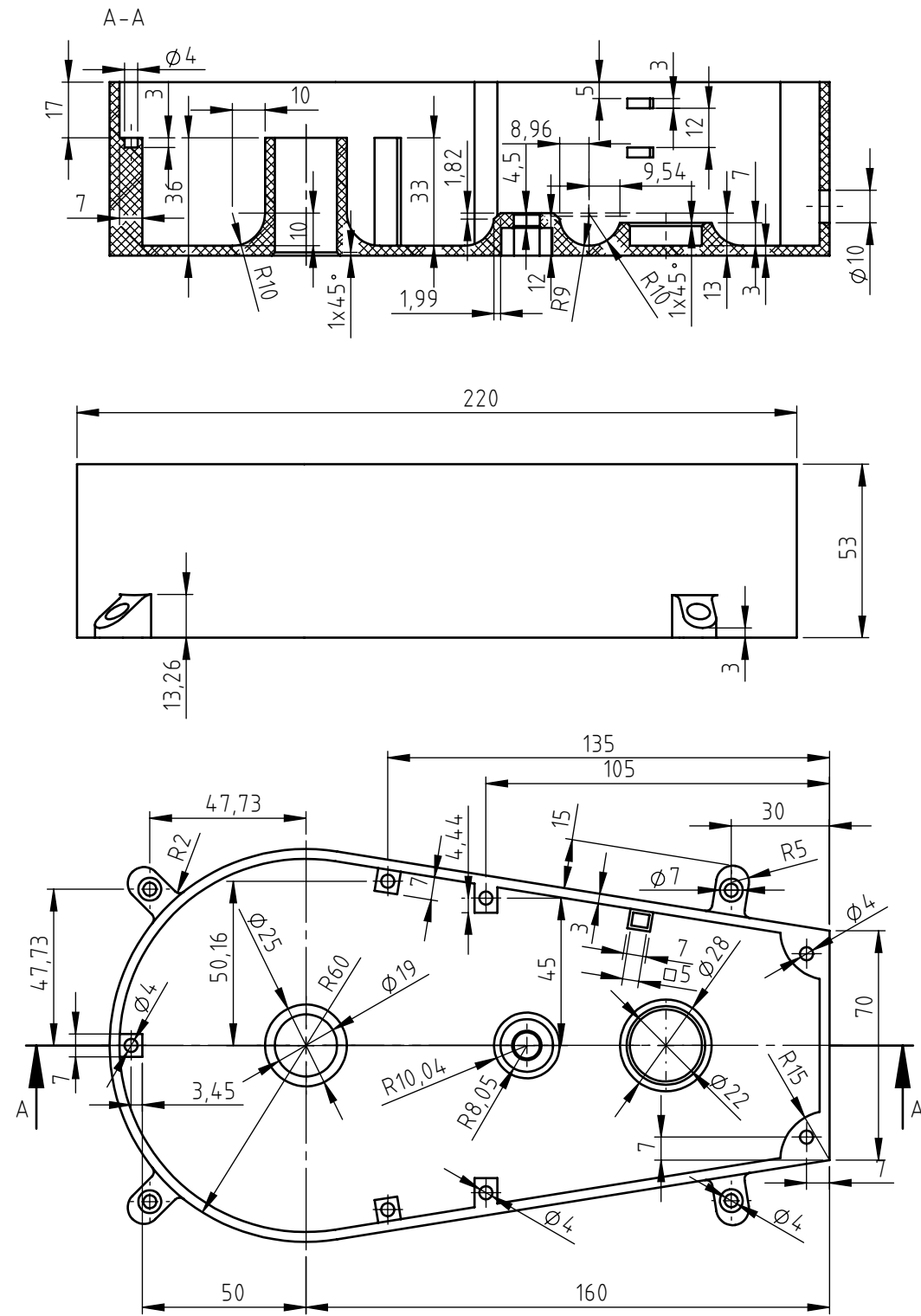
	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb Studij strojarstva		
Projektirao	28.11.2022	Lovro Meštrić				
Razradio	28.11.2022	Lovro Meštrić				
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić				
Pregledao		Petar Čurković				
Mentor		Petar Čurković				
Objekt:			Objekt broj:			
			R. N. broj:			
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika		Kopija	
Materijal: PET-G			Masa:	ZAVRŠNI RAD		
		Naziv:		Pozicija:		Format: A4
Mjerilo originala		Poklopac zgloba		32		Listova: 1
2:1		Crtež broj: 000-007-2023				List: 1

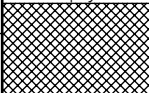
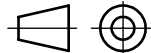


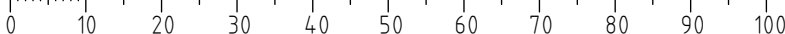
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	28.11.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	28.11.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
 Mjerilo originala 1:2		Naziv:		
		Pozicija:		
		Poklopac od baze robota Crtež broj: 000-008-2023		
		Format: A4		
		Listova: 1		
		List: 1		

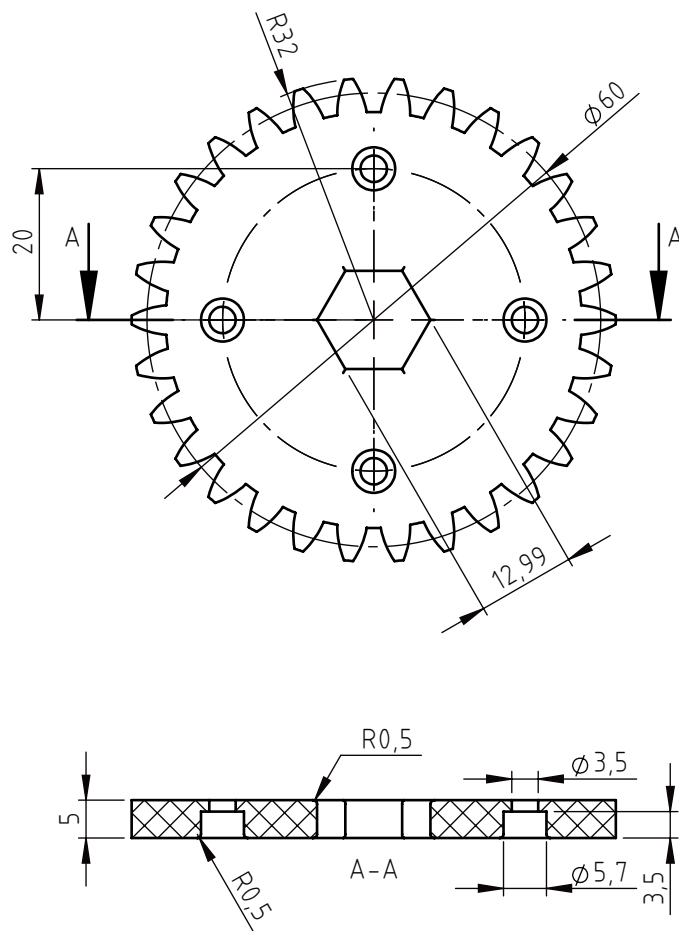


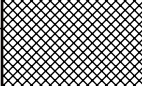
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	28.11.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	28.11.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
 Mjerilo originala 1:2	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Baza ramena		19	Listova: 1
	Crtež broj: 000-009-2023			List: 1

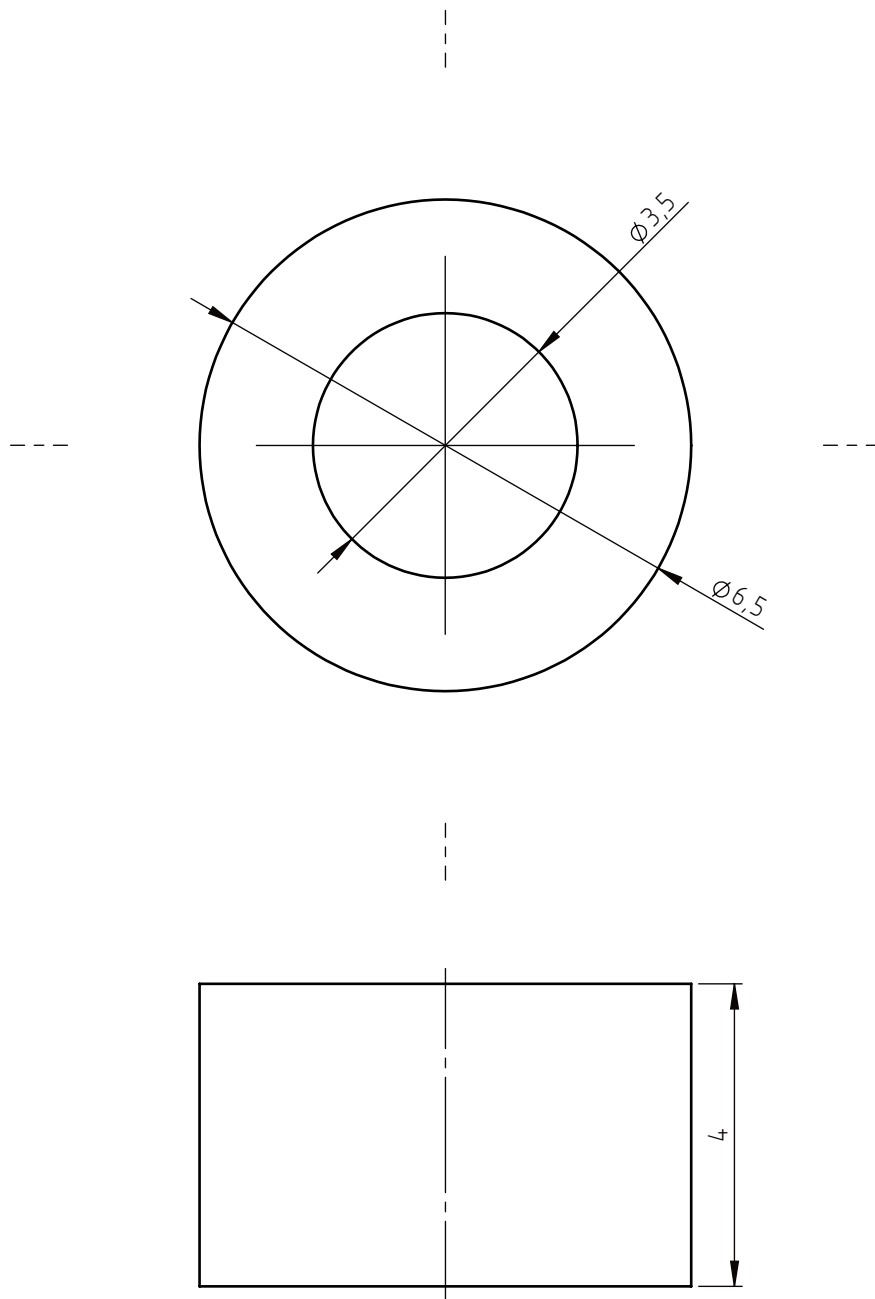


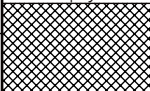
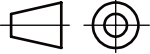
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	28.11.2022.	Lovro Meštrić			
Razradio	28.11.2022.	Lovro Meštrić			
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer		Kopija
			Mehatronika i robotika		
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
	Naziv:		Pozicija:		Format: A3
Mjerilo originala	Baza robota		18		Listova: 1
1:2	Crtež broj: 000-010-2023				List: 1

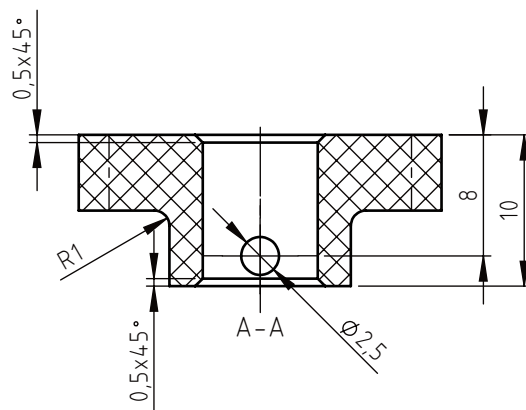
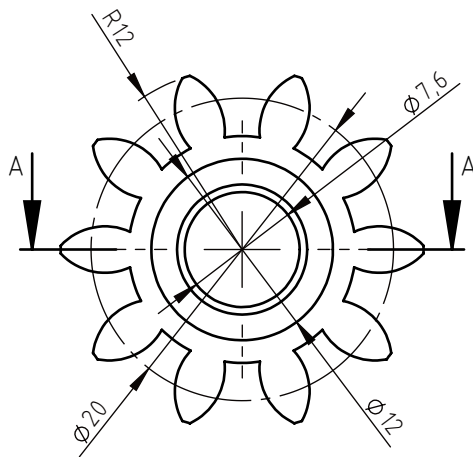


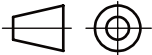


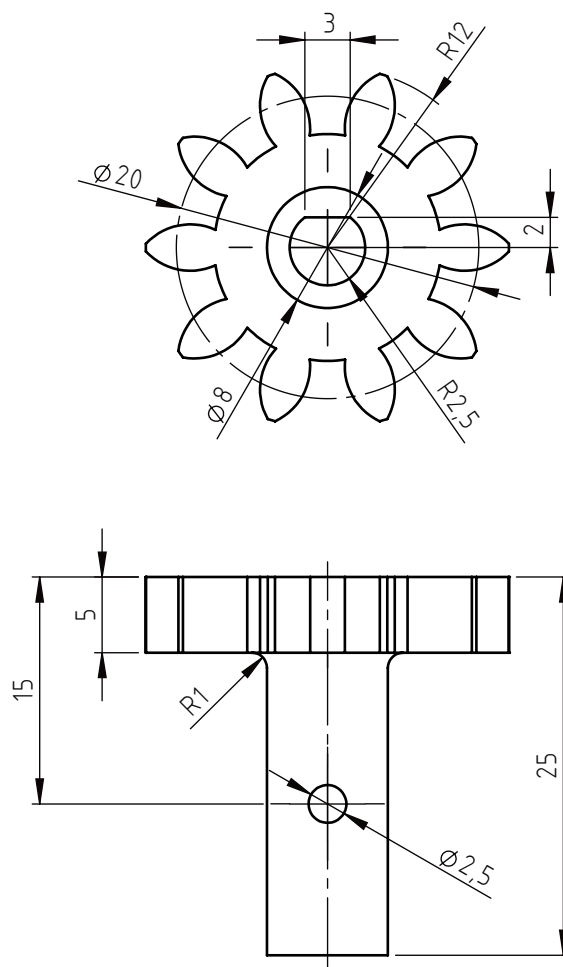
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Ćurković		
Mentor		Petar Ćurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
 Mjerilo originala 1:1	Naziv:		Pozicija:	
	Zupčanik $\varnothing 60$		35	
	Crtež broj: 000-011-2023		List: 1	

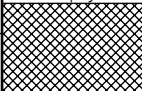
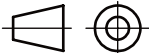


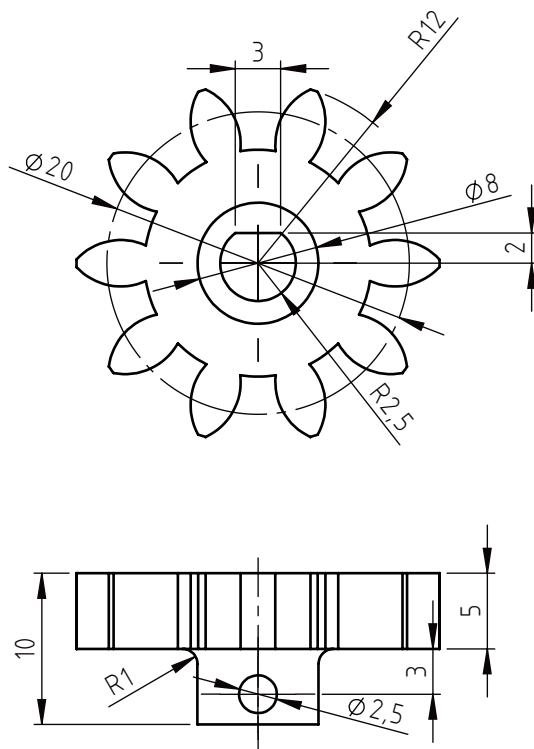
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić			
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić			
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika		Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4	
Mjerilo originala	Distanca		31	Listova: 1	
10:1	Crtež broj: 000-012-2023			List: 1	

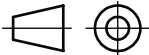


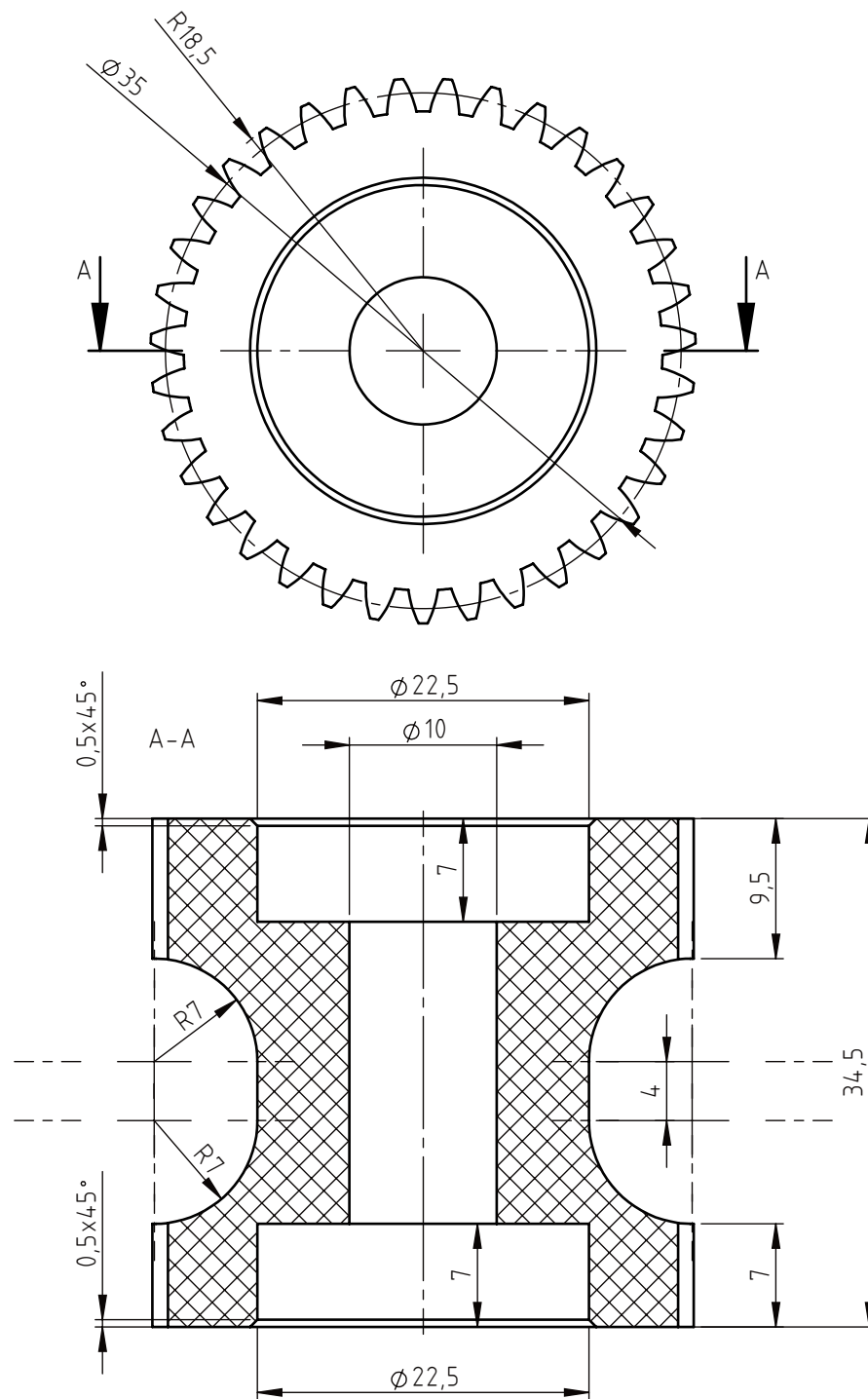
	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić			
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić			
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika		Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4	
Mjerilo originala	Zupčanik $\varnothing 20$ na reduktor		29	Listova: 1	
2:1	Crtež broj: 000-013-2023				List: 1

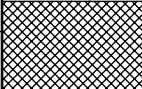
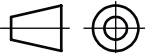


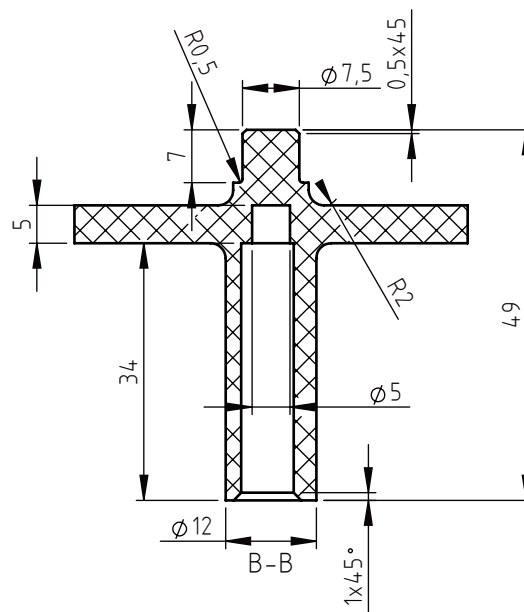
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G			Masa:	
			ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Zupčanik $\varnothing 20$		17	Listova: 1
2:1	Crtež broj: 000-014-2023			List: 1

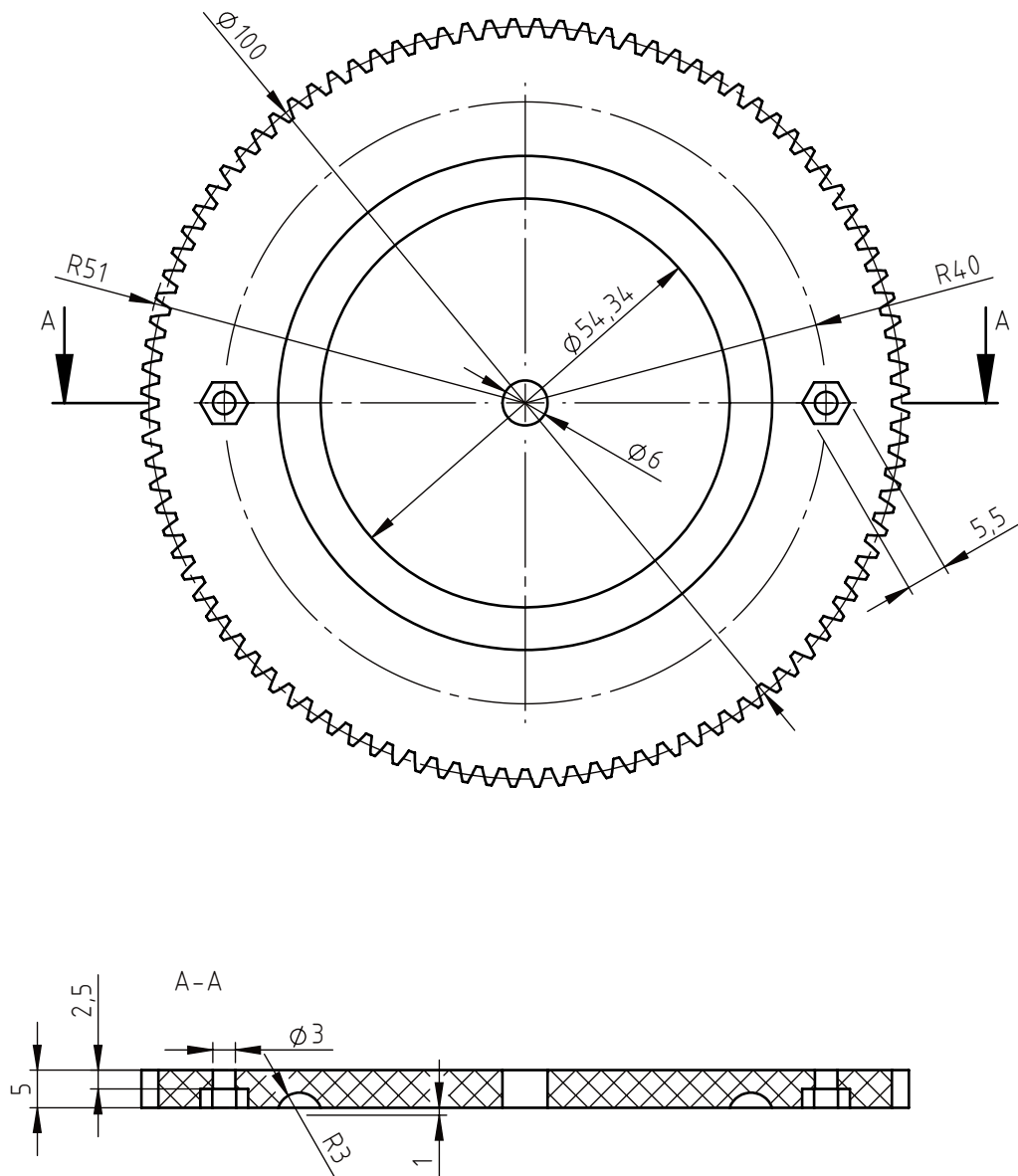


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Zupčanik $\varnothing 20$ kraći		16	Listova: 1
2:1	Crtež broj: 000-015-2023			List: 1



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
 Mjerilo originala 2:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Zupčanik $\varnothing 35$		13	Listova: 1
	Crtež broj: 000-016-2023			List: 1





	Datum	Ime i prezime	Potpis	FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić			
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić			
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika		Kopija
Materijal: PET-G			Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:			Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala 1:1	Zupčanik $\varnothing 100$			8	Listova: 1
	Crtež broj: 000-018-2023				List: 1

1	2	3	4	5	6	7	8
A							
B							
C							
D							
E							
F							

9	ISO 1207 - M4 x 6 - 6N	4			Vijak d.o.o.	
8	ISO 1207 - M2 x 5 - 5N	2			Vijak d.o.o.	
7	ISO 1207 - M1.6 x 4 - 4C	2			Vijak d.o.o.	
6	MG995_Gear2	1			Tower Pro	
5	MG995 Servo	1			Tower Pro	
4	Veza za gripper 2	2	001-004-2023	PET-G		
3	Veza za gripper	2	001-003-2023	PET-G		
2	Gripper ruka	2	001-002-2023	PET-G		
1	Kučište grippera	1	001-001-2023	PET-G		
Poz.	Naziv dijela	Kom.	Crtež broj/Norma	Materijal	Sirove dimenzije/Proizvođač	Masa

Broj naziva - code 0035227775	Projektirao	27.12.2022.	Lovro Meštrić	Potpis	 Studij strojarstva
	Razradio	27.12.2022.	Lovro Meštrić		
	Crtao	18.02.2023.	Lovro Meštrić		
	Pregledao		Petar Čurković		
	Mentor		Petar Čurković		
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena:			Smjer: Mehatronika i robotika	
	Materijal:		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
		Naziv: Gripper		Pozicija: 27	Kopija
	Mjerilo originala				Format: A3
	1:1	Crtež broj: 001-000-2023			Listova: 1
					List: 1

0

10

20

30

40

50

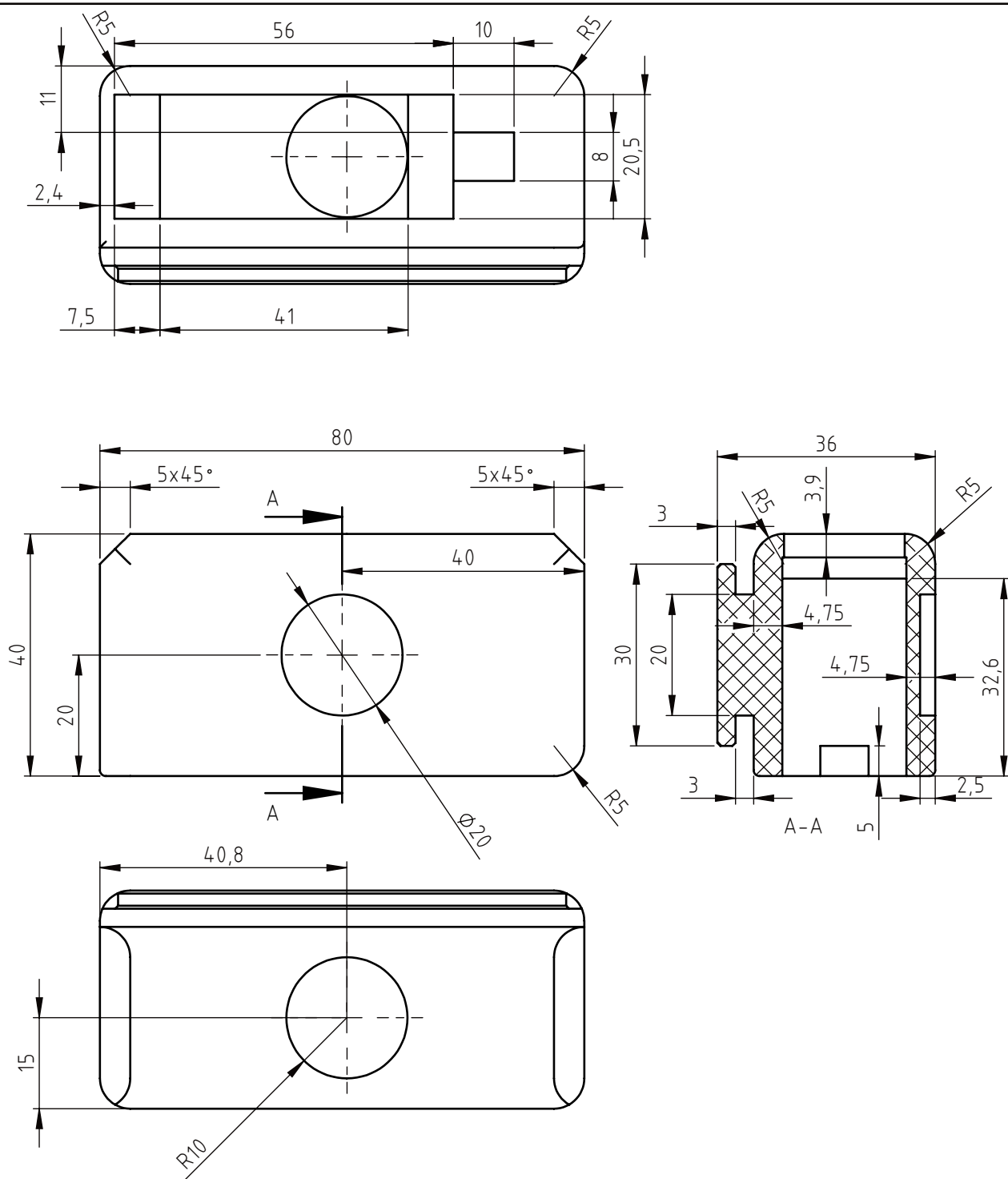
60

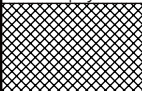
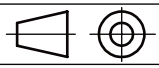
70

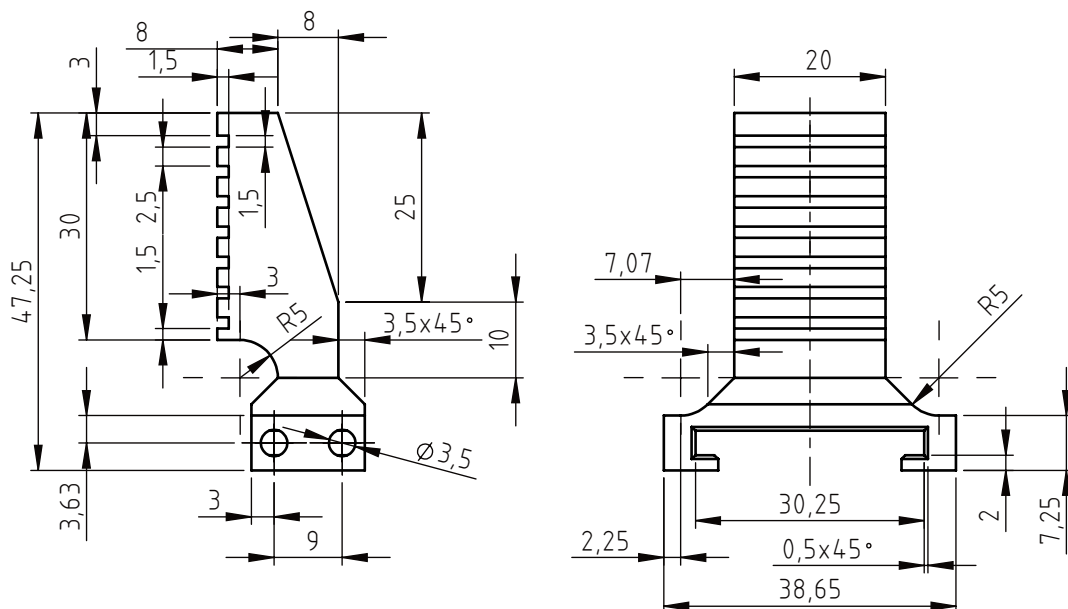
80

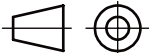
90

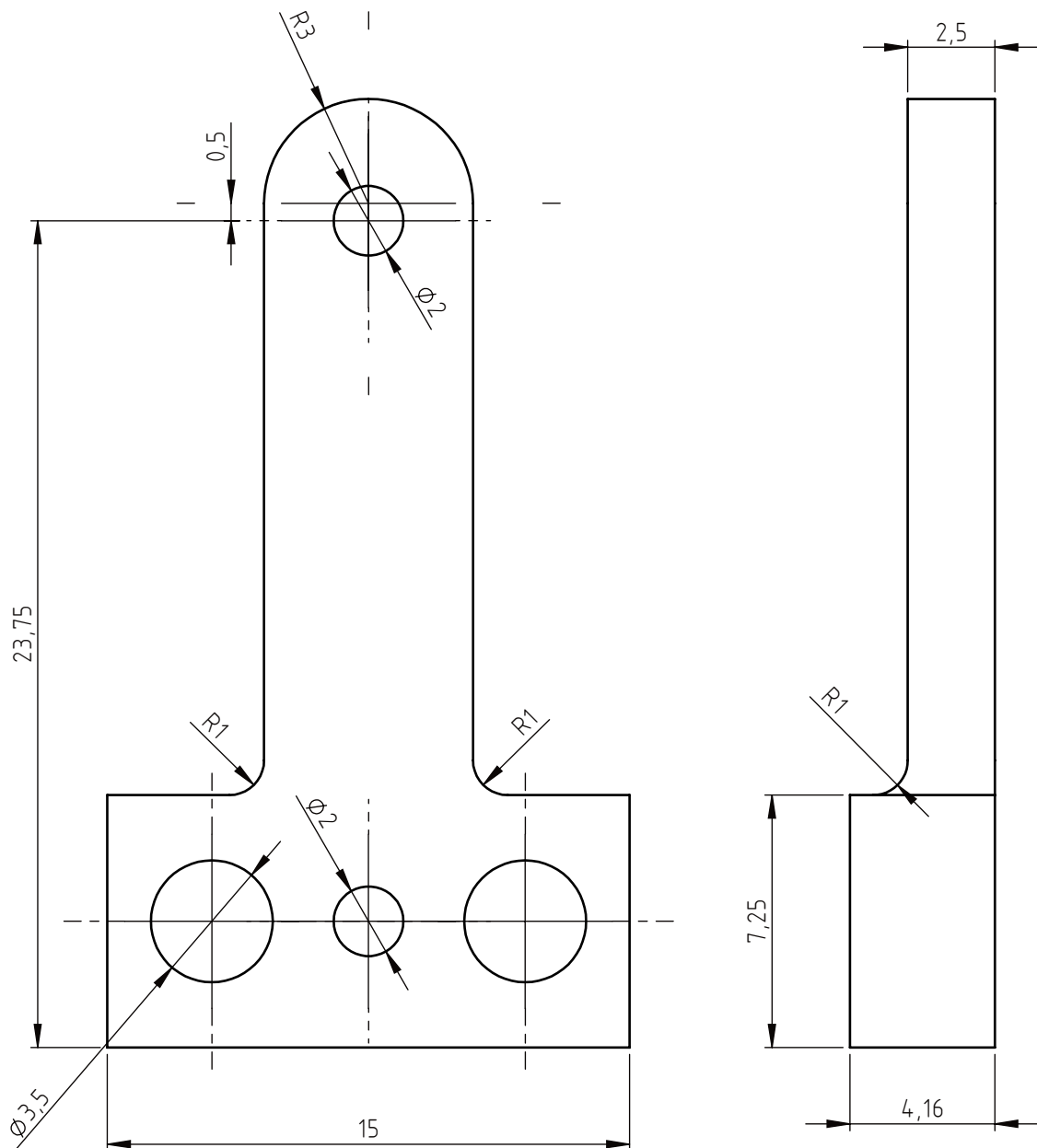
100

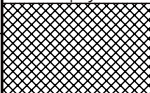


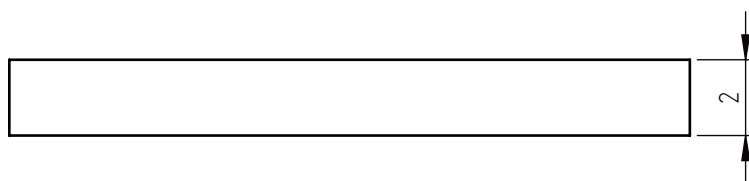
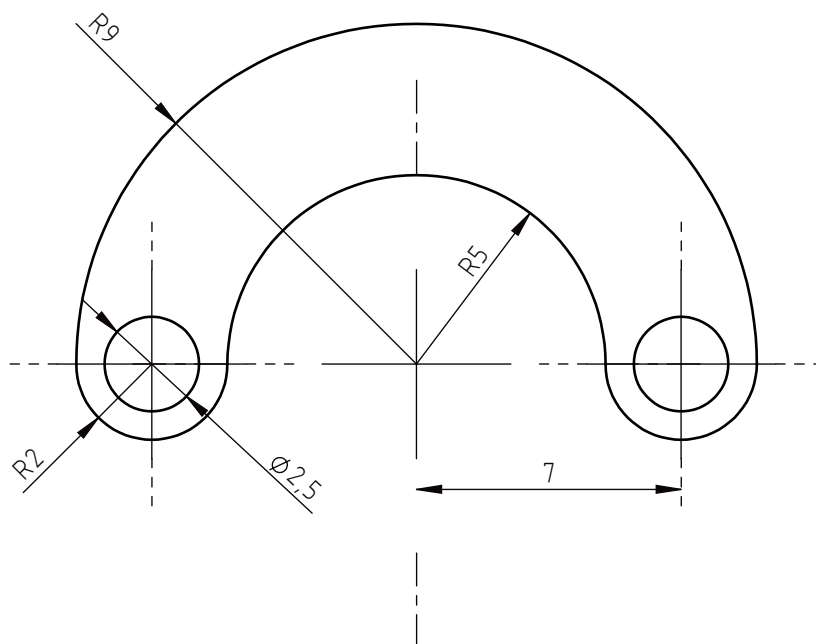
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	20.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	20.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
 Mjerilo originala 1:1	Naziv:		Pozicija:	
	Kučište gripper		1	
	Crtež broj: 001-001-2023		List: 1	
			Format: A4	
			Listova: 1	

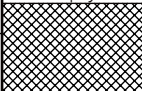


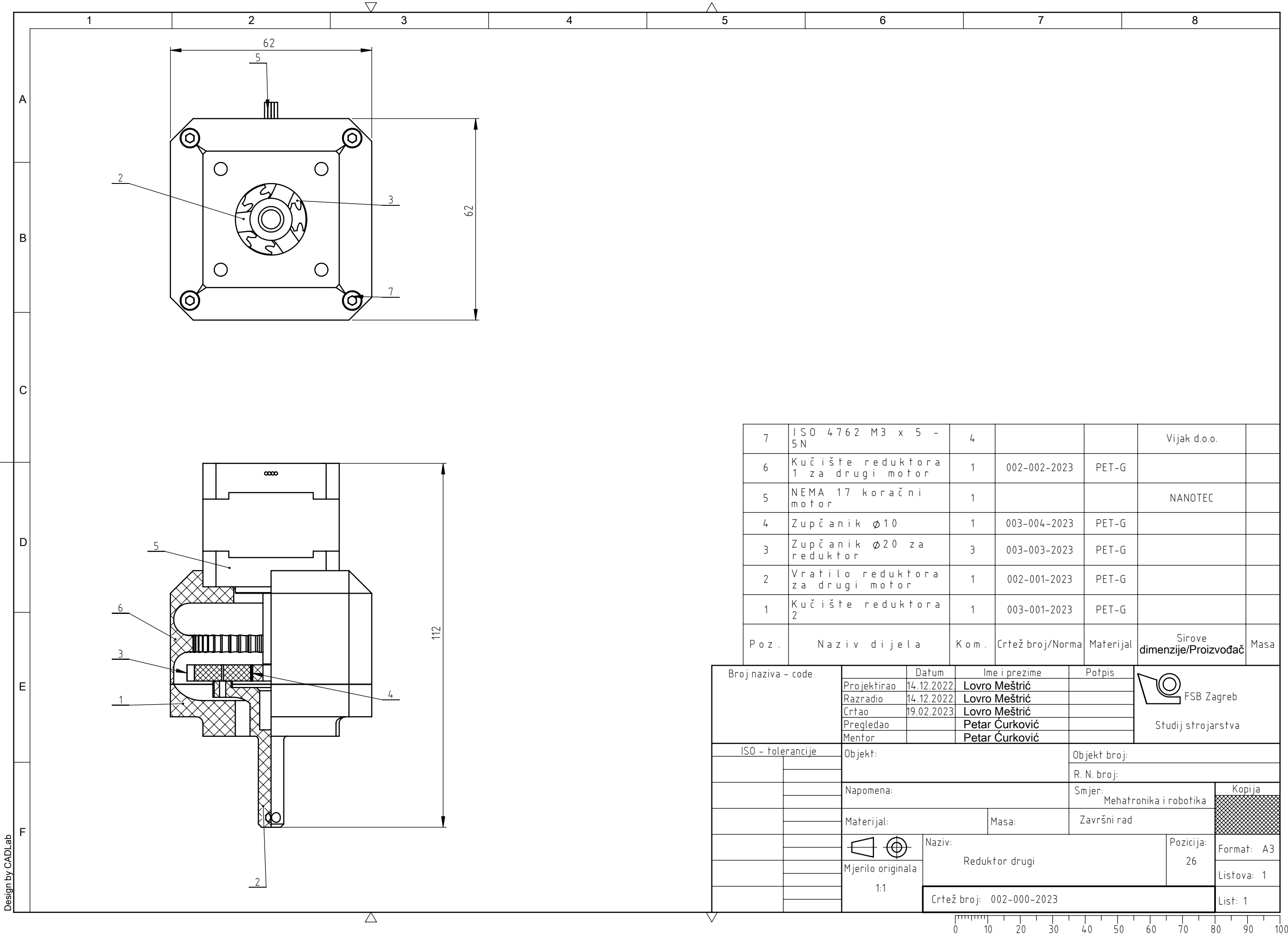
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	20.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	20.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Gripper ruka		2	Listova: 1
1:1	Crtež broj: 001-002-2023			List: 1

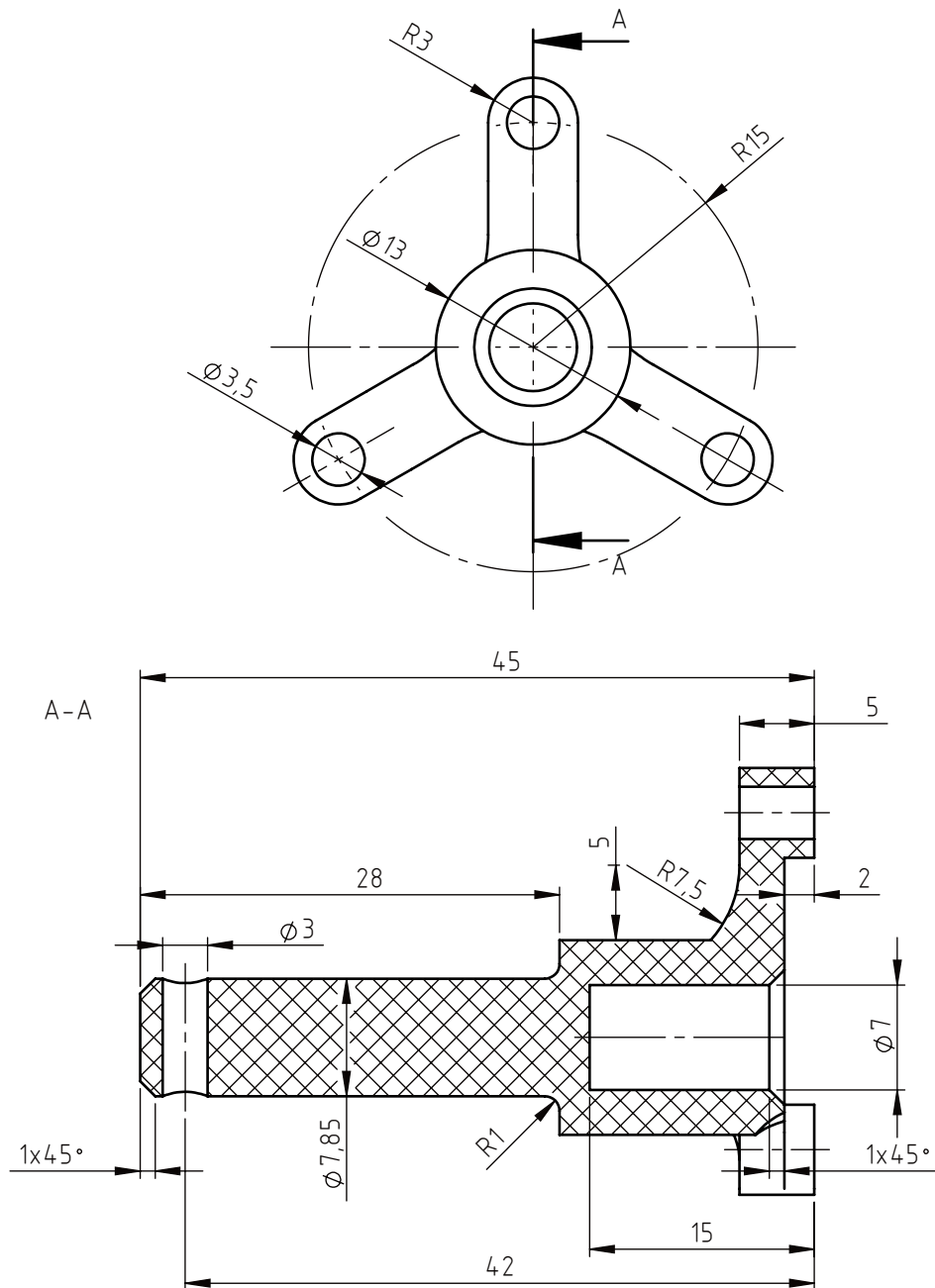


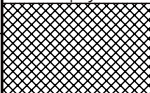
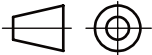
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	20.12.2022	Lovro Meštrić			
Razradio	20.12.2022	Lovro Meštrić			
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija	
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
	Naziv:		Pozicija:		Format: A4
	Mjerilo originala		3		Listova: 1
5:1	Crtež broj: 001-003-2023			List: 1	

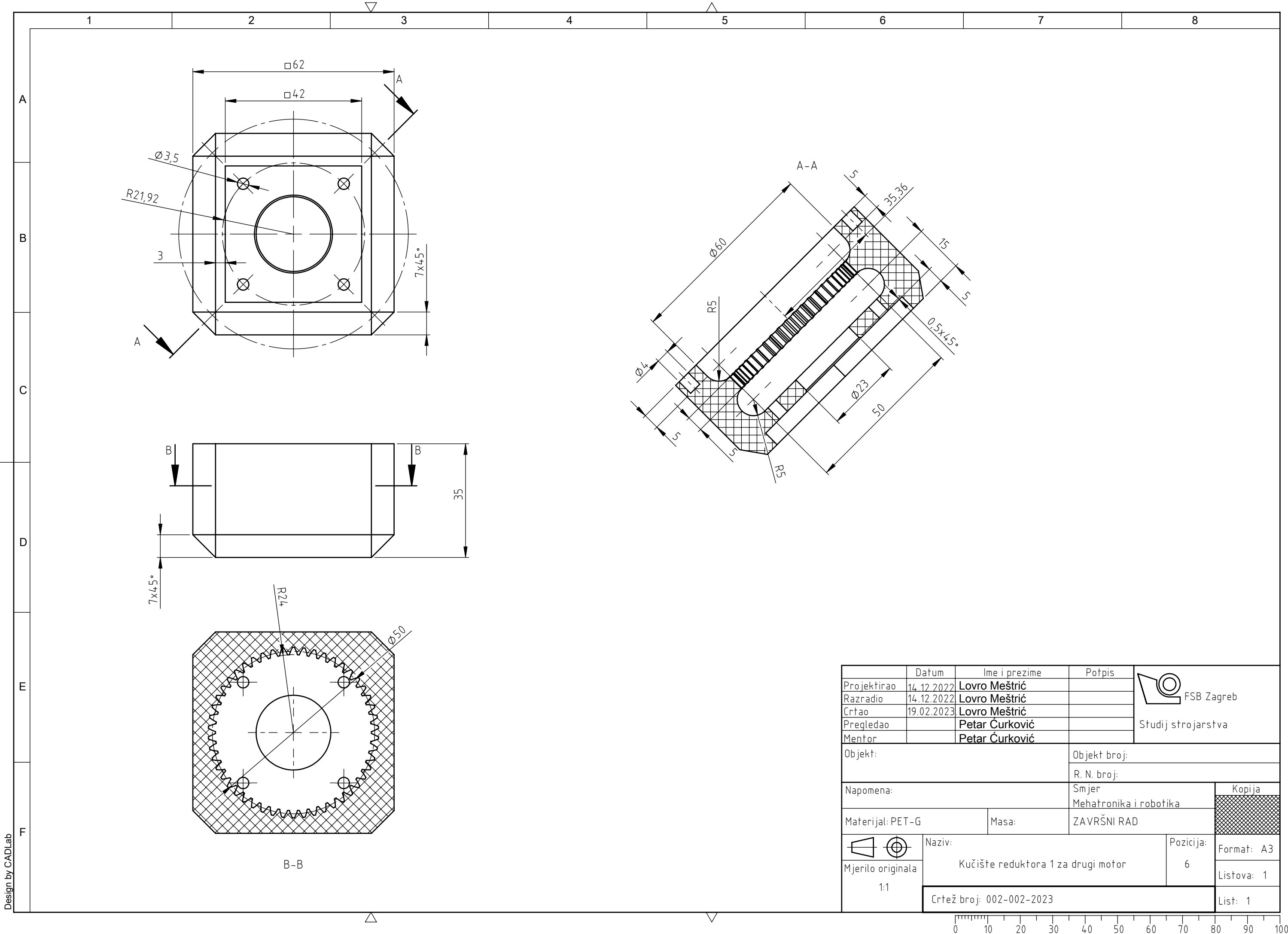


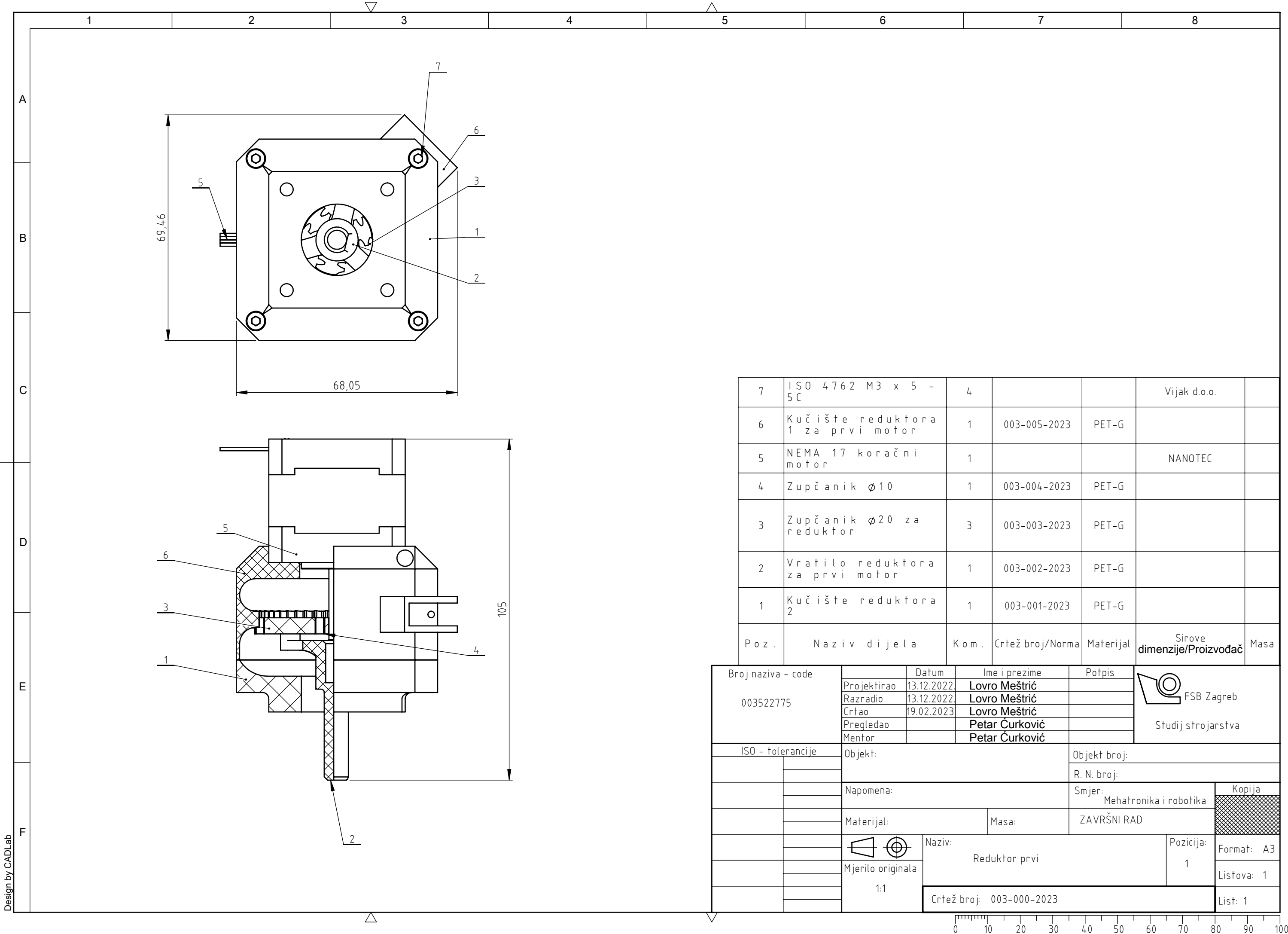
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	20.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	20.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	18.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Veza za gripper 2		4	Listova: 1
5:1	Crtež broj: 001-004-2023			List: 1

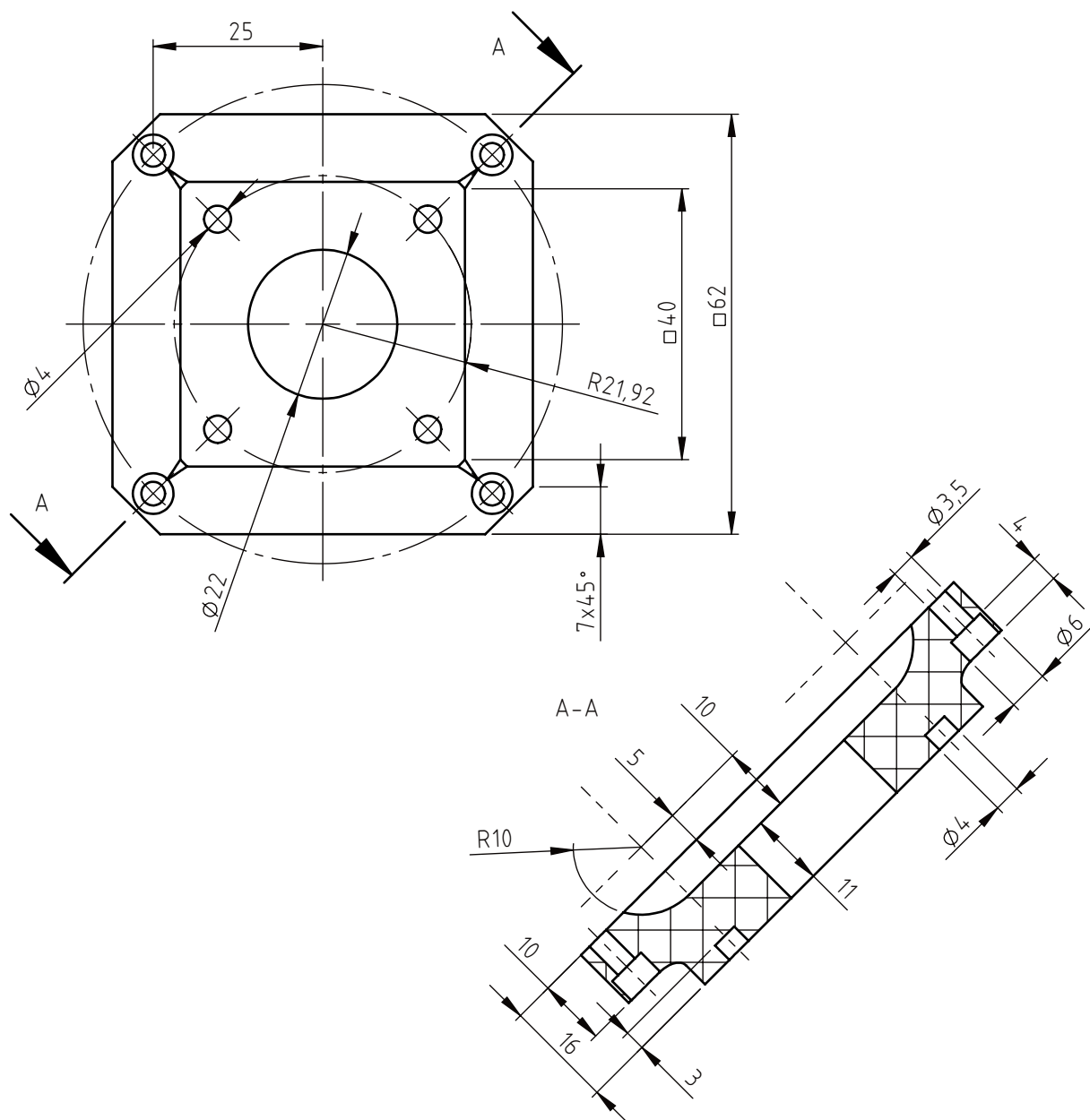


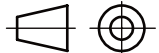


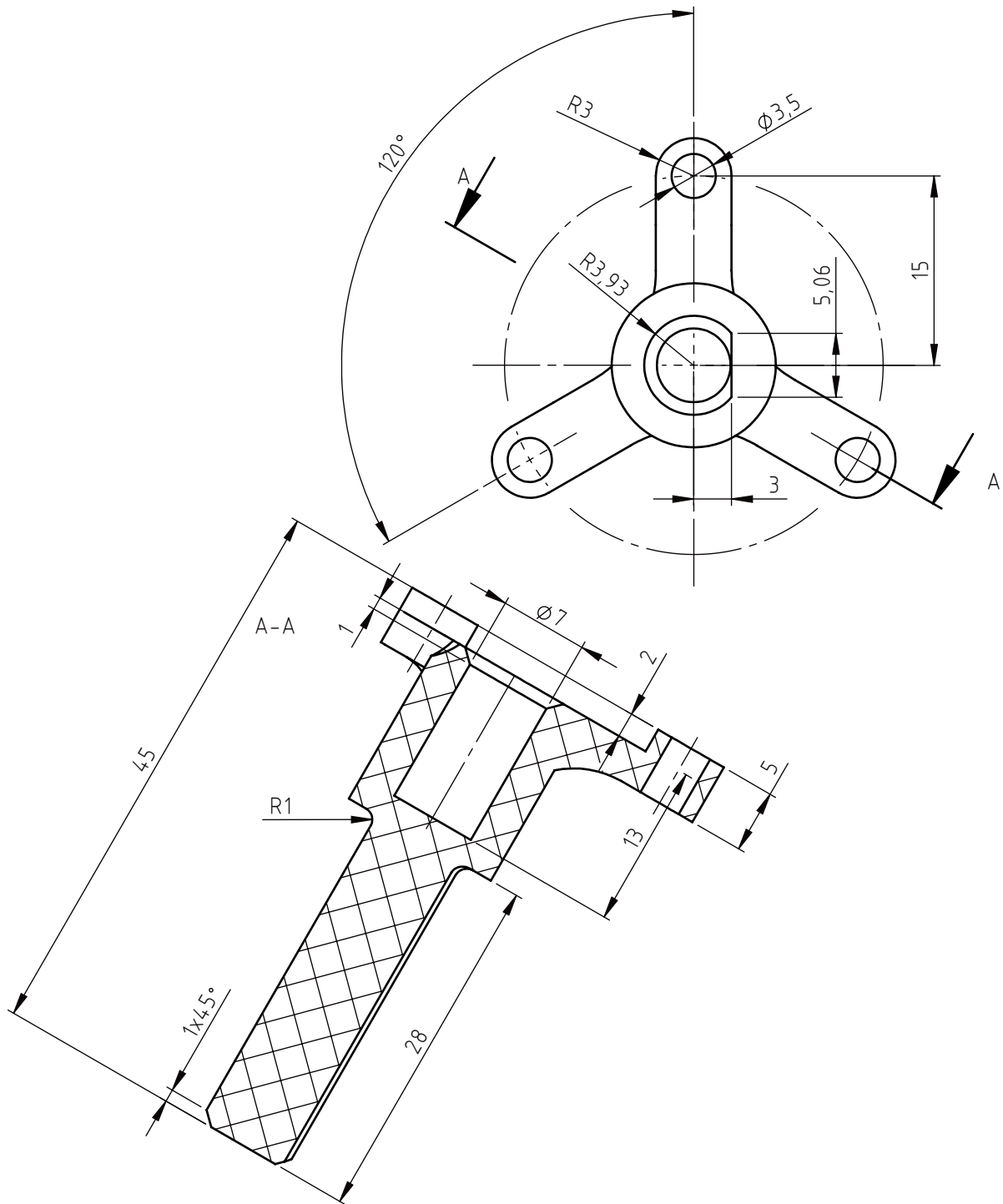
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva	
Projektirao	14.12.2022	Lovro Meštrić			
Razradio	14.12.2022	Lovro Meštrić			
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić			
Pregledao		Petar Čurković			
Mentor		Petar Čurković			
Objekt:			Objekt broj:		
			R. N. broj:		
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija	
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD		
 Mjerilo originala 2:1	Naziv:		Pozicija:		Format: A4
	Vratilo reduktora za drugi motor		2		Listova: 1
	Crtež broj: 002-001-2023				List: 1

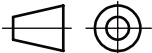


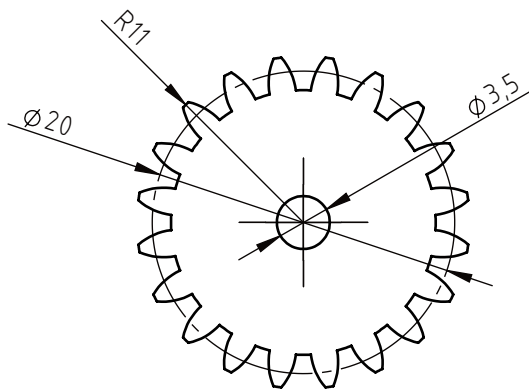


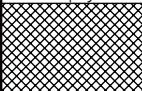
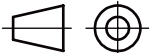


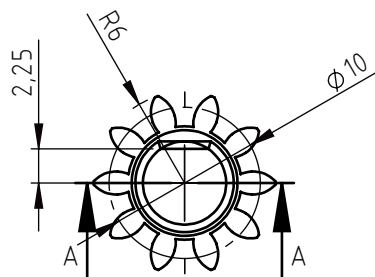
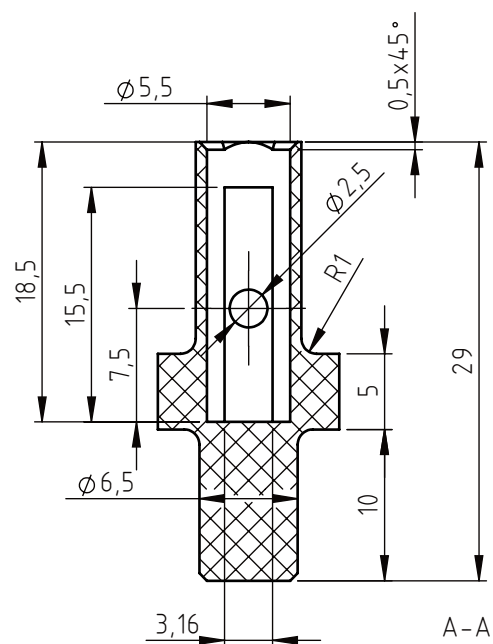
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	19.12.2022.	Lovro Meštrić		
Razradio	19.12.2022.	Lovro Meštrić		
Crtao	19.02.2023.	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Kućište reduktora 2		1	Listova: 1
1:1	Crtež broj: 003-001-2023			List: 1

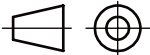


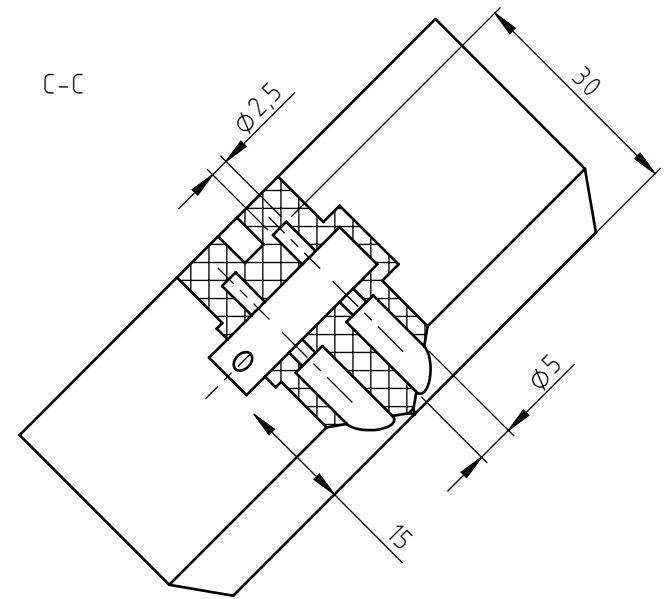
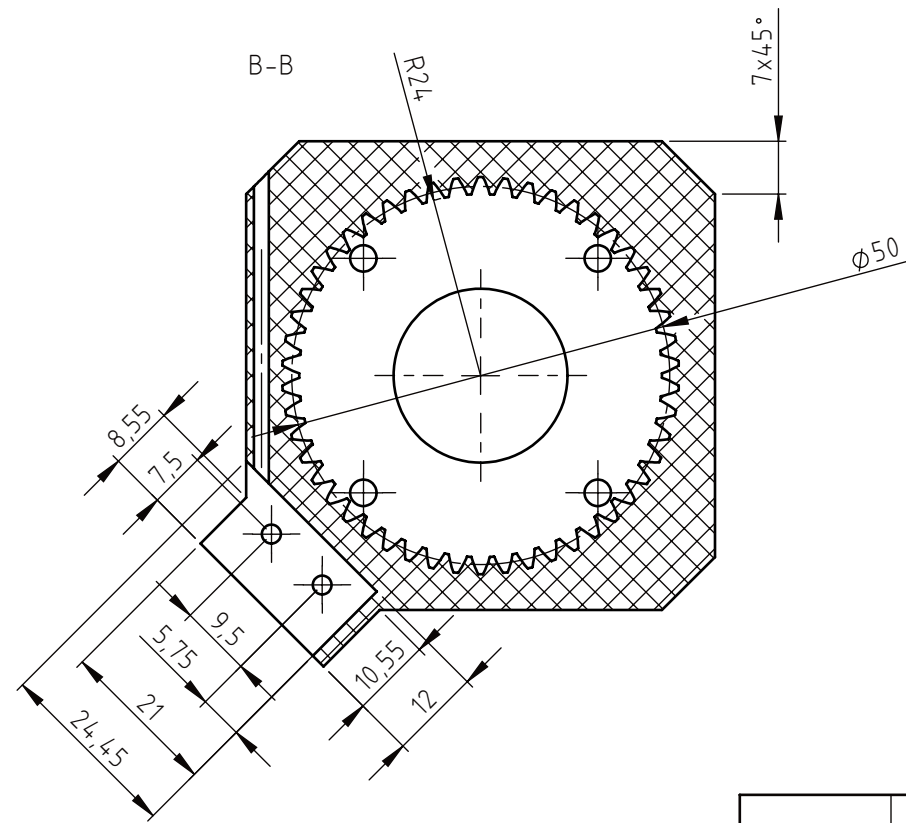
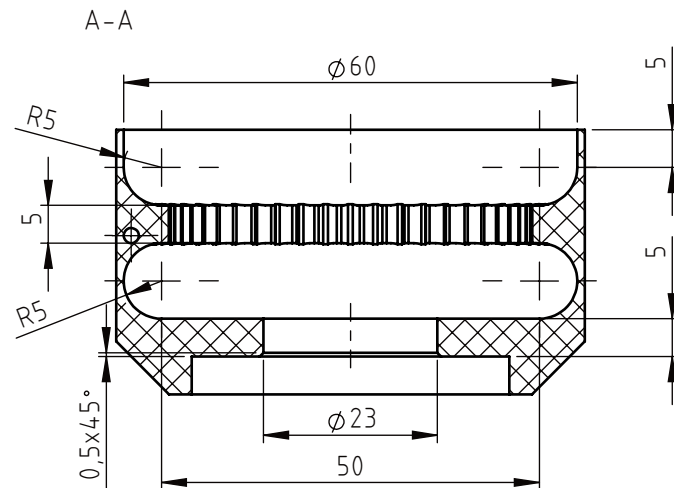
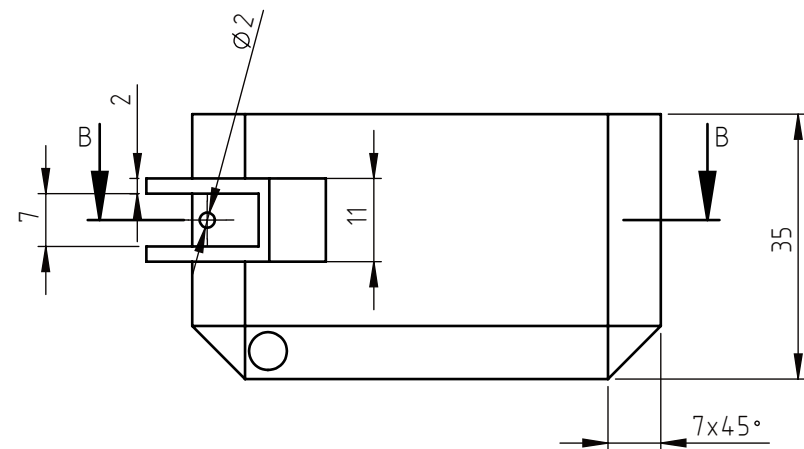
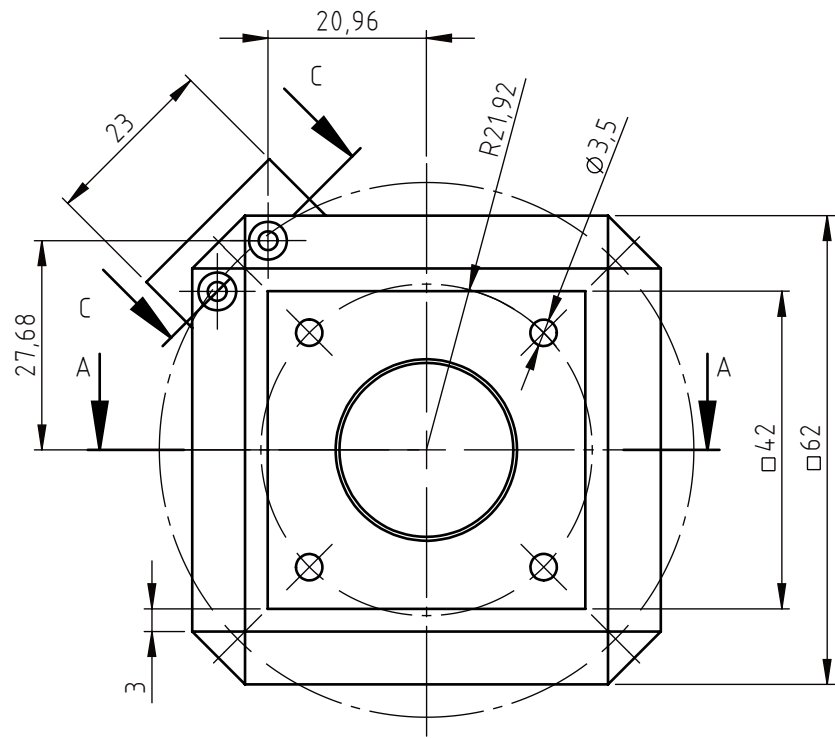
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	19.12.2022.	Lovro Meštrić		
Razradio	19.12.2022.	Lovro Meštrić		
Crtao	19.0.2023.	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Vratilo reduktora za prvi motor		2	Listova: 1
2:1	Crtež broj: 003-002-2023			List: 1

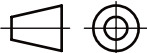


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	12.12.2022.	Lovro Meštrić		
Razradio	12.12.2022.	Lovro Meštrić		
Crtao	19.02.2023.	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Zupčanik $\varnothing 20$ za reduktor		3	Listova: 1
2:1	Crtež broj: 003-003-2023			List: 1



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Zupčanik $\varnothing 10$		4	Listova: 1
2:1	Crtež broj: 003-004-2023			List: 1



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb Studij strojarstva
Projektirao	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Razradio	13.12.2022	Lovro Meštrić		
Crtao	19.02.2023	Lovro Meštrić		
Pregledao		Petar Čurković		
Mentor		Petar Čurković		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Smjer Mehatronika i robotika	Kopija
Materijal: PET-G		Masa:	ZAVRŠNI RAD	
	Naziv:		Pozicija:	Format: A3
Mjerilo originala	Kučište reduktora 1 za prvi motor		6	Listova: 1
1:1	Crtež broj: 003-005-2023			List: 1