

Veslački ergometar podesive karakteristike otpora

Tujmer, Mislav

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

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:235:701172>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mislav Tujmer

Zagreb, 2018 godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Dragan Žeželj, dipl. ing.

Student:

Mislav Tujmer

Zagreb, 2018 godina.

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

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Draganu Žeželju na svojoj pomoći i strpljenju. Hvala kolegama veslačima na mnogobrojnim diskusijama te mojoj obitelji koja mi je uvijek pružala podršku.

Mislav Tujmer



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| | |
|-------------------------------------|--------|
| Sveučilište u Zagrebu | |
| Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mislav Tujmer**

Mat. br.: **0035183157**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Veslački ergometar podesive karakteristike otpora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Rowing ergometer with adjustable resistance characteristics**

Opis zadatka:

Veslački ergometar je sportska sprava koja služi za usvajanje osnovnih vještina veslačkog sporta i kondicijske treninge sportaša. Postojeći ergometri koriste princip hidrauličke kočnice kako bi simulirali uvjete veslanja u čamcu. Putem lančaničkog prijenosa snaga ljudskog tijela služi za pokretanje hidrauličke kočnice odnosno, u slučaju zračne kočnice, struje zraka koja ulazi u kočnicu te izlazi u okoliš. Otpori koji nastaju uporabom zračne kočnice mogu značajno odudarati od otpora koji se javljaju tijekom veslanja na vodi.

Potrebno je osmisliti sustav kojim bi se, u najboljem slučaju, napajao sklop električnog generatora kako bi se energija utrošena za vježbanje pretvorila u električnu energiju. Potrebno je ispitati mogućnost precizne regulacije opterećenja kako bi otpori bili približno jednaki onima koji nastaju tijekom veslanja na vodi. Tijekom razmatranja konstrukcijskog rješenja u obzir je potrebno uzeti slijedeće:

- pogon sustava je sportaš (različitih sposobnosti),
- težiti da sklop bude montiran na postojeću nosivu konstrukciju,
- sklopom mora biti moguće lako manevrirati (olakšati transport ergometra),
- multiplikator na izlaznom vratilu mora biti lagan, ako je moguće bez podmazivanja.

Vrijednosti potrebne za proračun i odabir pojedinih komponenti usvojiti iz postojećih rješenja sličnih sustava, iskustvenih vrijednosti te u dogovoru s mentorom.

Računalni model odabranog rješenja uređaja izraditi u 3D CAD sustavu, cjelovito konstrukcijsko rješenje prikazati sklopnim crtežom, a dijelove odabrane u dogovoru s mentorom razraditi do razine radioničkih.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Dragan Zeželj

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. Koncept..... | 7 |
| 3. Odabir generatora | 11 |
| 4. Proračun zupčaničkog para..... | 15 |
| 5. Proračun vratila V_2 | 24 |
| 5.1 Određivanje reakcija u osloncima | 24 |
| 5.2 Određivanje minimalnih potrebnih promjera vratila..... | 26 |
| 5.3. Odabir i kontrola ležajeva oslonaca A i B..... | 27 |
| 5.3.1 Ležaj oslonca A..... | 28 |
| 5.3.2. Ležaj oslonca B..... | 28 |
| 5.4. Kontrola pojedinačnih presjeka vratila | 29 |
| 6. Proračun pera..... | 36 |
| 7. Zaključak | 37 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Snaga proizvedena tijekom treninga niskog intenziteta..... | 2 |
| Slika 2 – Faze zaveslaja | 2 |
| Slika 3. Ergometar sa zračnim otporom proizvođača Concept 2. | 3 |
| Slika 4. Ergometar s magnetskim otporom proizvođača Kettel. | 4 |
| Slika 5. Ergometar s dva uljno-hidraulička cilindra proizvođača HCL fitness..... | 5 |
| Slika 6. Ergometar s otporom vode proizvođača Watermark | 6 |
| Slika 7. Shema koncepta 1 | 7 |
| Slika 8. Shema koncepta 2 | 8 |
| Slika 9. Shema koncepta 3 | 8 |
| Slika 10. Krivulja potezne sile u zaveslaju [2]..... | 9 |
| Slika 11 – Krivulja momenta torzije ulaznog vratila | 10 |
| Slika 12. Vratilo sa silama opterećenja u izometriji..... | 24 |
| Slika 13. Sile u vertikalnoj ravnini..... | 25 |
| Slika 14. Sile u horizontalnoj ravnini..... | 25 |
| Slika 15. Kontrolirani presjeci vratila | 29 |

POPIS TABLICA

| | |
|----------------------------------|----|
| Tablica 1. Ulazne veličine | 10 |
| Tablica 2. Podaci motora..... | 13 |

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

MT-2018-1 Zupčanik 1

MT-2018-2 Vratilo

MT-2018-3 Donji dio kućišta

MT-2018-4 Gornji dio kućišta

MT-2018-5 Sklop

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-----------------|------------------------------------|
| A_k | mm^2 | Površina kućišta |
| a | mm | Osni razmak |
| a_w | mm | Stvarni osni razmak |
| b | mm | Širina zupčanika |
| b_1 | | Faktor veličine strojnog dijela |
| b_2 | | Faktor kvalitete površinske obrade |
| C | kN | Dinamičko opterećenje |
| c | mm | Tjemena zračnost |
| d | mm | Promjer |
| $d_{1,2}$ | mm | Diobeni promjer zupčanika |
| d_a | mm | Tjemeni promjer zupčanika |
| d_b | mm | Temeljni promjer zupčanika |
| d_f | mm | Podnožni promjer zupčanika |
| d_w | mm | Kinematski promjer zupčanika |
| E | N/mm^2 | Modul elastičnosti |
| ED | | Relativno trajanje uključenja |
| F | N | Sila |
| F_A | N | Sila u osloncu A |
| F_{AH} | N | Horizontalna sila u osloncu A |
| F_{Av} | N | Vertikalna sila u osloncu A |
| F_B | N | Sila u osloncu B |
| F_{BH} | N | Horizontalna sila u osloncu B |
| F_r | N | Radijalna sila |
| F_t | N | Tangencijalna sila |

| | | |
|--------------|--|--|
| G_G | N | Težina generatora |
| G_V | N | Težina ventilatora |
| G_Z | N | Težina zupčanika |
| h | N | Visina pera |
| I | A | Jakost struje |
| i | | Prijenosni omjer |
| J | kgm ² | Zagonski moment |
| K_A | | Faktor primjene |
| K_H | | Faktor raspodjele opterećenja kod proračuna našrežanja boka zuba |
| K_F | | Faktor raspodjele opterećenja kod proračuna naprezanja korijena zuba |
| k_w | 10 ⁻⁴ mm ³ /Nm | Koeficijent trošenja |
| k_9 | K(m/s) ^{0,75} mm ^{1,75} /W | Faktor provođenja topline umjetnog materijala |
| L_{10hmin} | h | Zahtijevani vijek trajanja ležaja |
| l_{F1} | mm | Aktivna dužina boka |
| M | Nm | Moment |
| M_{red} | Nm | Reducirani moment savijanja |
| M_S | Nm | Moment savijanja |
| M_y | Nm | Moment savijanja u horizontalnoj ravnini |
| M_z | Nm | Moment savijanja u vertikalnoj ravnini |
| m | mm | Modul zupčanika |
| N_L | | Broj ciklusa opterećenja |
| n | min ⁻¹ | Brzina vrtnje |
| P | W | Snaga |
| R_λ | K/(Wm ²) | Faktor isijavanja topline |
| R_m | N/mm ² | Statička čvrstoća |
| r_{a1}^* | mm | Kinematski djelotvorni polumjer |

| | | |
|--------------|---------------------|---|
| S_F | | Faktor sigurnosti korijena zuba |
| S_H | | Faktor sigurnosti protiv ljuštenja bokova zuba |
| S_{post} | | Postojeća sigurnost presjeka |
| S_{potr} | | Potrebna sigurnost presjeka |
| T | Nm | Moment torzije |
| T_{1max} | Nm | Maksimalni moment torzije zupčanika |
| t | mm | Dubina utora za pero na vratilu |
| t_2 | mm | Dubina utora za pero na glavini |
| u | | Odnos broja zubi |
| v | m/s | Brzina |
| v_r | m/s | Brzina ručke ergometra |
| W | mm | Linearno trošenje |
| W_{dop} | mm | Dopušteno linearno trošenje |
| W_m | mm | Prosječno linearno trošenje |
| x | mm | Faktor pomaka profila |
| x_{2min} | mm | Pomak profila gonjenog zupčanika |
| Y_{Fa} | | Faktor oblika kod naprezanja korijena zuba |
| Y_{Sa} | | Faktor korekcije naprezanja kod proračuna korijena zuba |
| Y_ϵ | | Faktor učešća opterećenja kod proračuna korijena zuba |
| Z_E | $\sqrt{\text{MPa}}$ | Faktor materijala |
| Z_H | | Faktor oblika zuba kod proračuna naprezanja bokova |
| Z_ϵ | | Faktor prekrivanja |
| Z_β | | Faktor nagiba boka |
| z | | Broj zubiju |
| z_g | | Teoretski granični broj zubiju |
| z_g' | | Praktični granični broj zubi |
| α | ° | Kut zahvatne crte |

| | | |
|-------------------------------|-------------------|--|
| α_w | ° | Pogonski kut zahvatne crte |
| β_{kf} | | Efektivni faktor zareznog djelovanja kod savijanja štapova |
| β_{kt} | | Efektivni faktor zareznog djelovanja kod uvijanja štapova |
| ε_a | | Stupanj prekrivanja |
| η | | Stupanj korisnosti zupčaničkog para |
| $\vartheta_{korijen}$ | °C | Temperatura korijena zuba |
| $\vartheta_{zul, kurzzeitig}$ | °C | Dopuštena temperatura pri kratkotrajnom preopterećenju |
| $\vartheta_{kurz, dauern}$ | °C | Dopuštena temperatura pri trajnom radu |
| $\vartheta_{površine}$ | °C | Temperatura površine |
| ϑ_0 | °C | Temperatura okoline |
| λ | mm | Deformacija |
| μ | | Faktor trenja |
| ρ | mm | Radijus prijelaza pri promjeni promjera stupnja vratila |
| σ_F | N/mm ² | Naprezanje korijena zuba |
| σ_{FG} | N/mm ² | Dozvoljeno naprezanje korijena zuba |
| σ_{Flim} | N/mm ² | Dinamička čvrstoća kod naprezanja korijena zuba |
| σ_{fDN} | N/mm ² | Trajna dinamička čvrstoća |
| σ_{fDNdop} | N/mm ² | Dopuštena vrijednost trajne dinamičke čvrstoće |
| σ_H | N/mm ² | Hertz-ov pritisak u kinematskom polu |
| σ_{HP} | N/mm ² | Dozvoljeno kontaktno naprezanje bokova zubi |
| σ_{Hlim} | N/mm ² | Dinamička čvrstoća kontaktnog pritiska |
| σ_{red} | N/mm ² | Reducirano naprezanje |
| τ | N/mm ² | Tangencijalno naprezanje |
| τ_{DI} | N/mm ² | Trajna dinamička čvrstoća |
| τ_{tDI} | N/mm ² | Trajna dinamička čvrstoća |

| | | |
|----------|-----------------|---------------|
| Φ | Tm ² | Magnetski tok |
| ω | rad/s | Kutna brzina |

SAŽETAK

Veslanje je zahtjevan sport u kojem se izvode ponavljajući pokreti (zaveslaji) a pritom koriste mnoge mišićne skupine. Sprava koju veslači redovito koriste za psihofizičku pripremu je veslački ergometar koji, ovisno o konstrukciji simulira uvjete veslanja na vodi. S obzirom na učestalost korištenja ergometara u klubovima i teretanama te načela održivog razvoja modernog svijeta postavlja se pitanje mogućnosti skladištenja dijela utrošen energije imajući na umu potrebe karakteristične za veslački sport.

U razradi teme korišteni su rezultati mjerenja te iskustvo studentskog veslanja. Iz nekoliko ideja osmišljena su tri koncepta od kojih se jedan pokazao kao optimalan. Konstrukcija mehaničkog prijenosnika snage provedena je po VDI 2736 normi budući da su se polimerni zupčanici pokazali kao najbolje rješenje. Nakon određivanja radnih temperatura provedeno je dimenzioniranje a potom kontrola naprezanja. Kao prikladan pokazao se istosmjerni generator snage za što je poslužio istosmjerni motor bez četkica proizvođača Dunkermotoren.

Nakon provedenog proračuna vratila te odabira ležajeva napravljen je model sklopa koji bi e mogao spojiti na postojeću konstrukciju.

Ključne riječi: polimerni zupčanik, prijenosnik snage, unutarnje ozubljenje, vratilo.

SUMMARY

Rowing is a demanding sport which requires multiple muscle groups for repeating strokes. Device used for psychophysical training used by rowers is called an ergometer which, depending on construction, simulates rowing conditions of water rowing. Taking in account how frequently ergometers are being used by rowing clubs and gyms and having in mind modern sustainable growth principles there is a possibility of storing a part of spent energy, taking in consideration characteristic needs of rowing sport.

In elaboration of the thesis measurement results and student rowing experience were used. From couple of basic ideas three concepts came up of which one was considered as optimal.. Construction of a mechanical transmission system was done using VDI 2736 standard since polymer gears were the best in meeting the criteria. After determining working phase temperature dimensioning was done followed by fatigue stress and surface pressure control. As a suitable generator BLDC motor by company Dunkermotoren was chosen.

After shaft and bearing calculation, CAD model was made of a device which is suitable for ergometers in use.

Key words: polymer gear, transmission, internal gearing, shaft.

1. UVOD

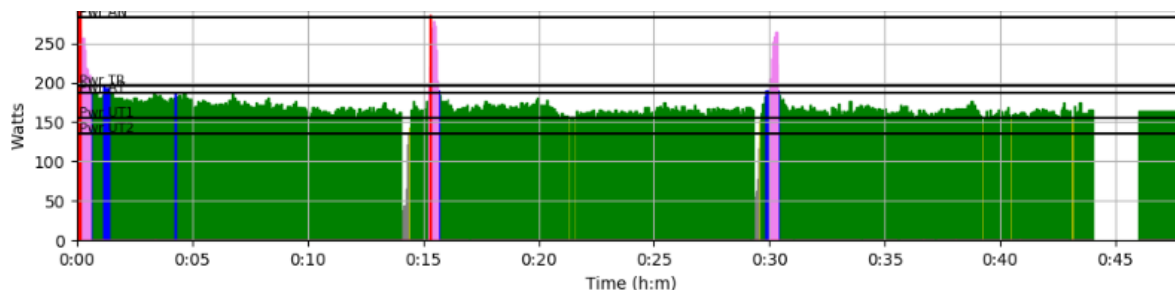
1.1. Veslanje i energija

Globalni trendovi razvoja čovječanstva prema niskougljičnoj budućnosti zahtijevaju manju potrošnju energije dobivene iz fosilnih goriva, a povećanje udjela energije iz obnovljivih izvora. Smanjivanje ugljičnog traga moderan svijet smatra pravilnim načinom borbe protiv pojave globalnog zatopljenja. Uspjeh po tom pitanju nastoji se ostvariti i razvojem tehnologije na mikro razini, odnosno u slučajevima kada je proizvodnja “čiste” energije izrazito mala, ali postoji. Primjeri takve prakse su pločnici kojima se prilikom hodanja stvara električna energija (London), razvoj tekstila kojim se solarna energija pretvara u električnu i slično. U isto vrijeme zdrav način života postaje popularan u razvijenom svijetu, odnosno bavljenje sportskim aktivnostima se smatra izrazito društveno prihvatljivim.

Spajanjem ova dva trenda otvara se prostor za razvoj novih tehnologija, odnosno načina proizvodnje električne energije ljudskim tijelom. Veslanje spada u skupinu sportova sa ponavljajućim pokretom, veslač mora održavati ravnotežu u čamcu koji se niz stazu. Regata je naziv za natjecanje koje je najčešće na 2 000 m duljine, ona počinje poravnavanjem, brzim startom potom uveslavanjem u ritam te uz poneke kratkotrajne promjene ritma, veslanjem do cilja prije kojeg ubrzanim tempom veslanja posada izvodi finiše. Potrebna snaga, izdržljivost, fleksibilnost i vještina čine veslače među najспособnijim sportašima, a veslanje jednim od najzahtjevnijih sportova u fizičkom, ali i izrazito psihičkom smislu. Veslanje danas obuhvaća široku populaciju ne samo profesionalnih sportaša već i velikog broja onih koji će to postati kao i rekreativaca, jer na veslačkim natjecanjima nastupaju osobe svih dobnih skupina. Kao akademski sport uživa ugled među sveučilištima gdje se već ukorijenilo kao tradicija. Za dobru plovnost čamca veslač mora zaveslaj izvesti na pravilan način, koristeći mnoge mišićne skupine praktički od glave do pete. Snaga koju aktiviranim mišićima predaje vodi savladava otpor gibanju čamca i posade kroz vodu.

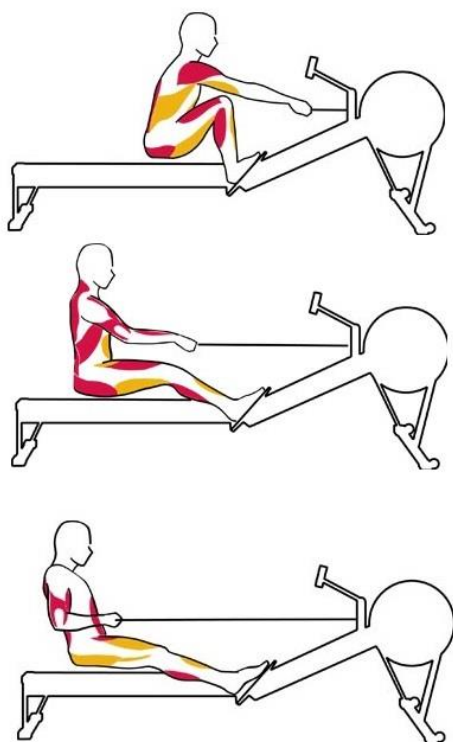
U pripremi sportaša za nastup temeljna sprava je veslački simulator (ergometar) kojim se usvajaju osnove veslačke tehnike, podiže aerobna fizička sposobnost te ispituje učinak treninga. Uz veslačke klubove, ergometrima su opremljene i brojne teretane. Zbog velikog broja ergometara u veslačkim klubovima te učestalosti njihovog korištenja tijekom jednog dana postoji mogućnost dobivanja dijela električne energije koja se koristi u dnevnim

potrebama takvih objekata. Slika 1. prikazuje snagu proizvedenu tijekom treninga niskog intenziteta kojeg je izveo veslač u prosječnoj kondiciji.



Slika 1. Snaga proizvedena tijekom treninga niskog intenziteta.

1.2. Veslački zaveslaj



Slika 2 – Faze zaveslaja

smanjuje brzinu vrtnje zbog vlastite inercije ali i otpora zraka koji ulazi u kućište (najčešće korišteni ergometri u klubovima su oni sa zračnim otporom). Njegovo usporeenje ovisi o količini zraka koja ulazi u kućište što svaki veslač odabire uz pomoć software-a kojeg ergometri

Veslanje je sport u kojem tehnika ima gotovo presudnu važnost, sportaši koji usvoje vještinu pravilnog izvođenja zaveslaja postižu brže kretanje čamca te smanjuju umaranje. Zaveslaj je ukupan pokret tijela od njegovog početka (zahvata) do njegovog kraja (konca) i nazad. On se dijeli na dvije faze: fazu poteza (kretanje iz zahvata prema kraju) te fazu oporavka (vraćanja u položaj zahvata). Za pravilan zaveslaj potrebno je izvesti redosljed gibanja pojedinih dijelova tijela pri čemu se aktiviraju mnogobrojne mišićne skupine (Slika 2.). Načini izvođenja zaveslaja mijenjali su se kroz povijest a i danas su karakteristični za klubove odnosno trenere. Oni jesu vrlo slični, što rezultira krivuljama raspodjele potezne sile kroz zaveslaj.

Tijekom povratka u zahvat zamašnjak ergometra

najčešće imaju. Prema [1] zagonski moment iznosi od 0,07 do 0,35 kgm², što su vrijednosti kojima će se težiti u ovome radu.

1.3. Vrste veslačkih ergometara

1.3.1. Zračni ergometar

Ergometri koji koriste otpor zraka imaju zamašnjak u ulozi ventilatora. Zrak se uvlači s bočne strane te obodno izlazi iz kućišta. Što veslač jače povuče ručku zamašnjak se brže vrti te je struja zraka brža. Efekt koji se pritom stvara jest što brže veslač vesla teže mu je veslati pa se za ovu vrstu ergometra smatra da ima varijabilni otpor.

Prednost ove vrste ergometra je što je moguće usporiti ili ubrzati tempo tijekom treninga bez prekida ili dodatnog podešavanja. Količina zraka koja ulazi u prostor zamašnjaka regulira se polugom kojom se zatvara ili otvara bočni otvor. Sa više zraka koji ulazi u kućište potreban je veći rad da se zamašnjak održi u vrtnji odnosno ubrza, dok je s manje zraka učinak suprotan. Valja istaknuti da je velika prednost zračnih ergometara u osjećaju koji daju tijekom veslanja, kojeg većina profesionalnih veslača smatra presudnim što je dovelo do toga da su ovakvi ergometri u najširoj primjeni kod veslačkih klubova. Održavanje se svodi na podmazivanje lanca te povremeno čišćenje, a prenošenje je jednostavno. Mana ove vrste je relativno velika razina buka uslijed zračne struje ali i korištenja lančaničkog prijenosa, te gibanje kod inezivnog treninga (pri visokom broju zaveslaja u minuti i snažnom povlačenju dolazi do pomicanja koje može izazvati oštećenja).



Slika 3. Ergometar sa zračnim otporom proizvođača Concept 2.

1.3.2. Magnetski otpor

Magnetski otpor je na ergometrima izveden kao otpor lutajućih struja. Otpor se regulira ručno, primicanjem ili odmicanjem magneta od zamašnjaka. Zamašnjak je izveden kao rotirajući disk koji se uslijed djelovanja magneta usporava. Prednost ovakve vrste ergometra je odsutnost buke (izvedbe s remenskim prijenosom su praktički bešumne) te mogućnost programiranja tipa treninga kojeg korisnik želi napraviti. Mana u odnosu na zračne ergometre je nemogućnost promjene otpora bez prekida veslanja, odnosno odabrani otpor ostaje konstantan bez obzira koliko brzo veslač vesla, a moguće ga je promijeniti prekidom veslanja i podešavanjem (neke varijante imaju mogućnost podešavanja tipkom na ručici no skokovita promjena otpora je izrazito neugodna). Vrlo često nisu napravljeni ergonomski povoljno (nogari su preširoko i ručka ima previsoko hvatište) pa ih natjecateljski sportaši izbjegavaju.



Slika 4. Ergometar s magnetskim otporom proizvođača Kettel.

1.3.3. Hidraulički otpor (ulje)

Ovakve ergometre možemo naći u izvedbi s jednim ili dva hidraulička cilindra, te s jednom ili dvije drške.

Otpor ulja u cilindru nije moguće regulirati tijekom veslanja, a u mnogim slučajevima sjedalo nije pomično. Izvedbe sa dva hidraulička cilindra pogodne su za fizikalnu terapiju budući da je moguće različito opteretiti mišićne skupine. Prednosti ovakvih ergometara su njihova cijena, tihi rad, male dimenzije, no zagrijavanje ulja tijekom dugotrajnijeg vježbanja može dovesti do kvara i skupljeg održavanja. Ne upotrebljavaju se u veslačkim klubovima jer ni približno ne oponašaju otpor veslanja na vodi.



Slika 5. Ergometar s dva uljno-hidraulička cilindra proizvođača HCL fitness.

1.3.4. Hidraulički otpor (voda)

Ergometri koji koriste otpor vode izvedeni slično onima koji koriste zračni otpor, samo što je zamašnjak uronjen u spremnik s vodom te služi kao propeler. Kao i kod zračnog otpora što veslač jače vesla osjeća veći otpor a osjećaj veslanja je blizak onome kod veslanja u čamcu. Otpor je moguće regulirati količinom vode koja se nalazi u spremniku, konstrukcija je često drvena te ima i estetsku funkciju u prostoru, zbog vode i konstrukcije su ovi ergometri teži i robusniji od svih ostalih verzija. Otežano je njihovo premještanje, stvaraju manje buke od zračnih, no cijena im je poprilično veća od stalih vrsta.



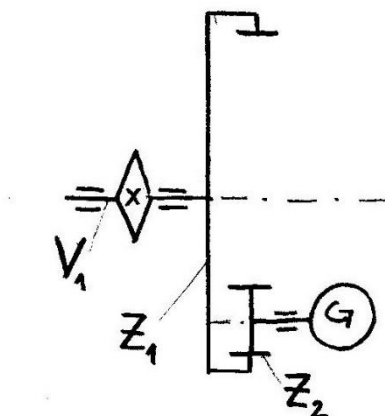
Slika 6. Ergometar s otporom vode proizvođača Watermark

2. Koncept

Kako bi osigurali što veću pretvorbu raspoložive energije u električnu nastoji se ostvariti rad u što povoljnijem području rada generatora, odnosno postići višu brzinu vrtnje rotora generatora. To je moguće postići konstrukcijom prikladnog prijenosnika snage.

U razmatranju načina prijenosa snage prema generatoru odabran je zupčanički prijenos koji naspram remenskog, lančaničkog ili tarnog prijenosa ima niz prednosti, prvenstveno veću iskoristivost, zatim nižu razinu buke i dimenzija te zadovoljavajuće pouzdanosti i jednostavnosti upotrebe (nema opasnosti od proklizavanja i potrebe predzatezanja remena). Pogonski zupčanik Z_1 bit će izveden s unutarnjim ozubljenjem zbog smanjenja dimenzija cjelokupne konstrukcije. Koncept cijelog sklopa ima tri varijante

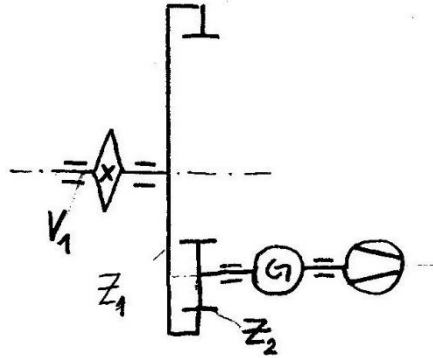
2.1. Koncept 1



Slika 7. Shema koncepta 1

Prvi koncept ima najmanje mehaničkih komponenata, konstrukcija je najmanjih dimenzija i najlakša no nedostatak je složenost regulacije generatora. Karakterističnu krivulju momenta generatora moguće je programirati i regulirati složenim upravljačkim sklopom koji bi posljedično zahtijevao značajan udio dovedene snage za rad te značajno poskupio cjelokupnu konstrukciju.

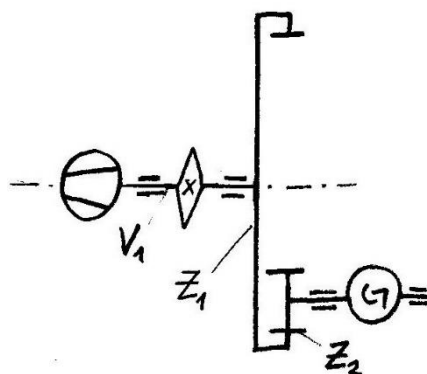
2.2. Koncept 2



Slika 8. Shema koncepta 2

Drugi koncept za razliku od prvog na vratilu generatora ima ventilator koji ima ulogu zamašnjaka kojim se postiže fina regulacija momente krivulje odnosno potrebno usporenje tijekom faze povratka u zahvat. Upravljanje generatorom moguće je izvesti na jednostavniji način s manje komponentata i manjim utroškom dovedene energije.

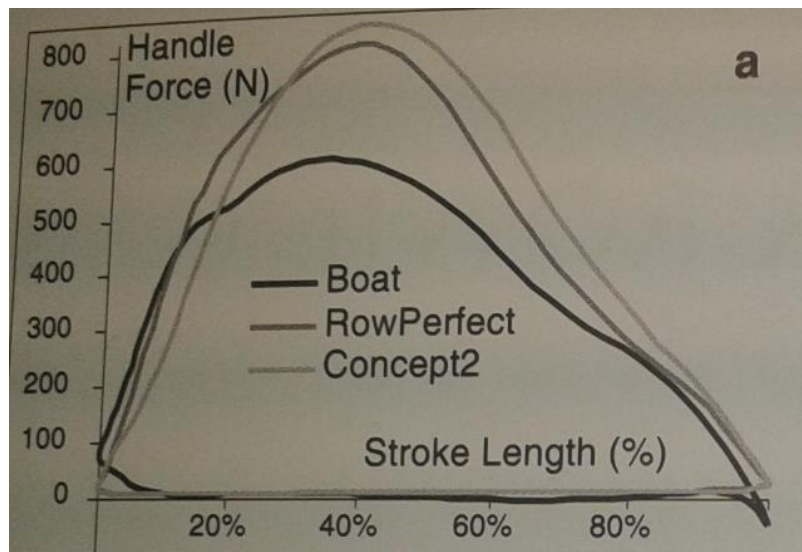
2.3. Koncept 3



Slika 9. Shema koncepta 3

Treći koncept ima gotovo ista svojstva drugoga no razlikuje se u poziciji ventilatora u mehaničkom sustavu. Ovakva izvedba zahtijevala bi značajne promjene na nosivoj konstrukciji ergometra te se zbog toga odbacuje.

2.4. Ulazne veličine



Slika 10. Krivulja potezne sile u zaveslaju [2].

Na ordinatnoj osi Slike 10. nalaze se vrijednosti sile na ručki ergometra, a na osi apscisa naveden je postotak zaveslaja (položaj veslača).

Izmjerene vrijednosti brzine ručke i potezne sile prema [2] poslužit će za izračun ulaznih veličina proračuna prijenosnika snage.

Vratilo V_1 na sebi ima lančanik promjera 30 mm, brzina ručke ergometra jednaka je brzini lanca, odnosno obodnoj brzini na lančaniku. Obodna brzina i brzina vrtnje povezane su izrazom: $v = R \cdot \omega$, odnosno ako je $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$, broj okretaja vratila V_1 je:

$$n_1 = \frac{v_r}{d \cdot \pi} \quad (1)$$

Moment torzije dobivamo iz izmjerenih vrijednosti potezne sile, sile na ručki F_r preko izraza:

$$T_1 = \frac{d}{2} \cdot F_r \quad (2)$$

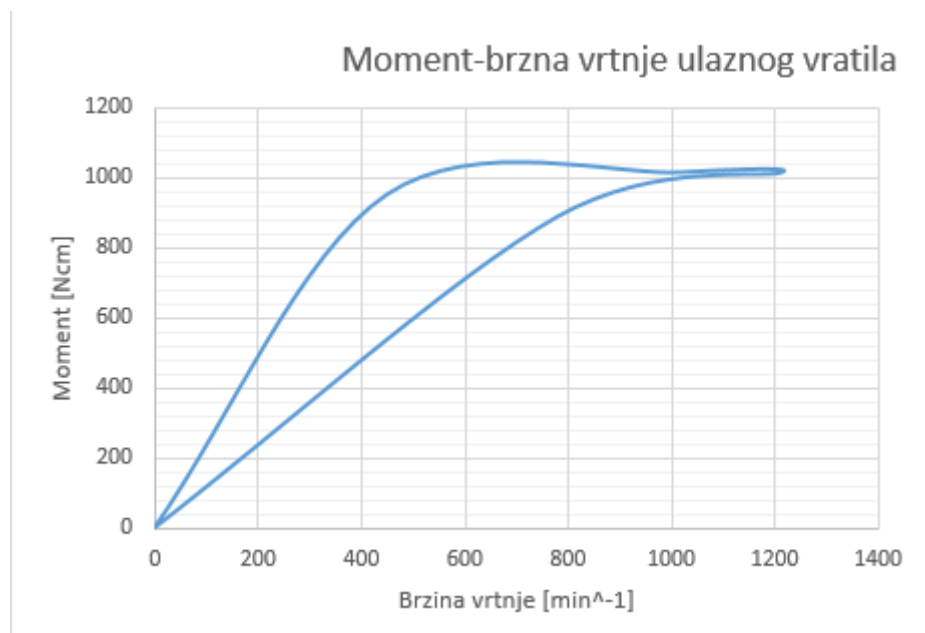
$$P = T \cdot \omega \quad (3)$$

Tablica 1 – Ulazne veličine

| v_r /m/s | n_1 /s ⁻¹ | n_1 /min ⁻¹ | F_r /N | T_1 /Nm | P_1 /W |
|------------|------------------------|--------------------------|----------|-----------|----------|
| 1.4 | 14.85 | 891,27 | 520 | 7.8 | 728 |
| 1.6 | 16.97 | 1018,6 | 810 | 12.15 | 1296 |
| 1.6 | 16.97 | 1018,6 | 680 | 10.2 | 1088 |
| 1.5 | 15.92 | 954,93 | 300 | 4.5 | 450 |

Tablica 1. Ulazne veličine

Kao mjerodavno opterećenje prijenosnika snage uzimamo vršne vrijednosti ulaznog momenta, odnosno snage. Moment torzije možemo prikazati (slika 11) u odnosu na brzinu vrtnje tj. raspodjelu njegove vrijednosti kroz dužinu zaveslaja.



Slika 11 – Krivulja momenta torzije ulaznog vratila

3. Odabir generatora

Odabir generatora uvjetovan je specifičnostima korištenja ergometra i konstrukcijskim zahtjevima. Kriteriji odabira su:

- Sposobnost rada prilikom nejednolike brzine vrtnje
- Mogućnost regulacije protumomenta
- Mala zamašna masa ($J = 0,07 \dots 0,35 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)
- Visoka iskoristivost uslijed relativno male dobavne snage
- Pouzdanost (niski troškovi održavanja) i kompaktnost
- Što manje dimenzije i masa

Generator je električni stroj koji pretvara mehaničku energiju dobivenu preko vratila u električnu koju predaje preko svojih stezaljki mreži ili spremniku energije. Rad električnih strojeva temelji se na tri fizikalna zakona: elektromagnetskoj indukciji, sili na vodič u magnetskom polju te zakonu protjecanja.

Osnovne izvedbe električnih strojeva se prema [3] dijele:

- Istosmjerne (nezavisno i zavisno uzbuđene)
- Izmjenične (jednofazni i višefazni)

U razmatranju strojeva izmjenične i istosmjerne struje odabrani su istosmjerni generatori budući da bi proizvedena energija bila pohranjena u spremnik energije (bateriju ili „kućnu bateriju“) čime bi se olakšala regulacija generatora, smanjio broj elektroničkih komponenti, a i izbjegao složen postupak priključivanja na mrežu distribucije. Spremnik energije predstavljat će električno opterećenje generatora uslijed kojeg se stvara mehanički protumoment na njegovom vratilu. Ovaj princip, uz djelovanje ventilatora, bit će osnova za upravljanje protumomentom generatora odnosno dobivanja približne krivulje momenta torzije kod postojećeg ergometra sa otporom zraka.

Istosmjerni strojevi se u načelu sastoje od: rotora, statora te kolektora sa četkicama. Razvojem elektromotornih pogona za potrebe precizne industrije, električnih vozila, obnovljivih izvora energije (vjetroelektrane) i robotike odnosno elektromotornih pogona manjih snaga, povećala se primjena (a time i istraživanje) istosmjernih motora bez četkica. Takvi motori upotrebom permanentnih magneta ostvaruju temeljnu prednost nad ostalim

vrstama istosmjernih strojeva budući da nemaju gubitke koje četkice stvaraju klizanjem (trenjem) po vratilu motora.

Kako za istosmjerne strojeve, pa tako i istosmjerne motore bez četkica, vrijedi načelo reverzibilnog rada, tj. mogućnost da rotacijom rotora s permanentnim magnetima u armaturnom namotu na statoru bude induciran napon, istosmjerni motor bez četkica može raditi kao generator uz zanemarive preinake. Ovakav motor ima niz prikladnih svojstava zbog kojih je odabran kao optimalan za potrebe sklopa veslačkog ergometra.

Istosmjerni generator bez četkica ima prednosti poput:

- Visoke korisnosti u širokom području brzina vrtnje
- Niskih troškova održavanja
- Kompaktnosti i pouzdanosti
- Mnogo načina regulacije
- Dugi vijek trajanja

U svrhu pokrivanja širokog raspona dovedene snage (korisnici ergometra su sportaši različitih sposobnosti i dobi) te uzimajući u obzir navedene kriterije odabira odabran je istosmjerni motor bez četkica BG 95X80 dPro proizvođača Dunkermotoren tvorničkih podataka prikazanih u Tablici 2.

Tablica 2 – Podaci motora

| | |
|------------------------|------------------------|
| Nazivni napon | 25 V |
| Nazivna jakost struje | 49 A |
| Nazivni moment | 265 Ncm |
| Nazivna brzina vrtnje | 3711 min ⁻¹ |
| Moment inercije rotora | 1890 gcm ² |
| Masa | 5,1 kg |

Tablica 2. Podaci motora

Upravljanje generatora temelji se na opterećenju koje predstavlja punjenje spremnika energije, odnosno na upravljačkim vrijednostima sustava: brzinom vrtnje te naponom i strujom. Kako je brzina vrtnje varijabla koju moramo ostaviti neupravljanom nužno je upravljati protumomentom generatora. Prema [4] moment istosmjernog stroja je definiran:

$$M = k \cdot \phi \cdot I \quad (4)$$

gdje je k zajednička konstanta napona i momenta, proizlazi iz konstrukcije.

Mogućnost upravljanja momentom se dakle svodi na upravljanje strujom kojom se spremnik energije puni. Upravljanje se izvodi putem otvorene (bez povratnih informacija, tj. senzora) ili zatvorene petlje (na temelju podataka dobivenih sensorima, danas često Hall sensorima).

Razvoj primjene permanentnih magneta u vjetroelektranama i hibridnim električnim vozilima doveo je do širokog raspona mogućnosti upravljanja istosmjernog generatora bez četkica.

Prema [5], [6], [7], [8] neke od mogućnosti koje su dostupne su:

- PI regulator
- Histerezna regulacija (CHC)
- Metoda algoritma za predviđanje
- PWM regulator

Složen postupak konstrukcije upravljačkog sklopa neće se detaljno analizirati u ovom radu.

4. Proračun zupčaničkog para

4.1. Materijal zupčanika

Kako je namjera što više smanjiti masu i cijenu prijenosnika, olakšati rukovanje, postići što tiši rad bez podmazivanja kao optimalni odabir pokazali su se polimerni materijali za zupčanike. Upotreba polimernih zupčanika dosad je prvenstveno bila u prijenosu gibanja, no sve češće se primjenjuje i kod prijenosa snage. Unutar tri glavne skupine (plastomeri, elastomeri i duromeri) polimeri imaju mnogo različitih vrsta sa specifičnim svojstvima koja je moguće dobiti dodavanjem aditiva i vlakana u osnovni materijal, ali i različitim tehnološkim postupcima proizvodnje. Važno je napomenuti da se polimerni zupčanici od čeličnih bitno razlikuju zbog ovisnosti mehaničkih svojstava o temperaturi i vlazi, što se uzima u obzir prilikom proračuna. Najčešći materijal u primjeni kod zupčanika je poliamid (PA) zbog svoje zadovoljavajuće mehaničke nosivosti pri povišenim temperaturama, a prema [9] zupčanički parovi od PA 66 imaju najveću sposobnost prigušenja buke te relativno malu promjenu nosivosti uslijed utjecaja vlage. PA 66 je odabran za materijal zupčaničkog prijenosnika.

4.2. Određivanje ulaznih veličina

Ulazne veličine proračuna:

- $P_{1\max} = 1296 \text{ W}$
- $T_{1\max} = 12\,150 \text{ Nmm}$
- $F_{1\max} = 810 \text{ N}$
- $n_{1\max} = 16,97 \text{ s}^{-1}$ ($n_{1\max} = 1018,6 \text{ min}^{-1}$)
- Prijenosni omjer: $i = u = 0,4$ (odabrano)
- Broj zubi zupčanika Z_2 : $z_2 = 15$ (odabrano)
- Broj zubi zupčanika Z_1 : $z_1 = z_2 / u = 37,5$ (odabrano $z_1 = 37$)

Novi prijenosni omjer:

$$i = \frac{z_1}{z_2} = \frac{37}{15} = 0,405$$

Odstupanje:

$$\Delta i = \left(\frac{0,405}{0,4} - 1 \right) \cdot 100 \% = 1,35 \% < 3 \%$$

4.3. Orijentacijski proračun modula

Prema normi VDI 2376 prije pristupa proračunu potrebno je okvirno odrediti modul te promjer pogonskog zupčanika. Promjer zupčanika određuje se prema:

$$d_1 \geq \sqrt{\frac{12,5 \cdot Z_E^2 \cdot K_A \cdot T_{1max}}{\left(\frac{\sigma_{HlimN}}{S_H}\right)^2 \cdot \left(\frac{b}{d_1}\right)} \cdot \frac{u+1}{u}} \geq 252,9 \text{ mm} = 253 \text{ mm} \quad (5)$$

Promjer u (5) dobiva se prema VDI 2736 izrazima i odabranim vrijednostima:

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}\right)}} = 18,5 \quad (6)$$

$$E_1 = E_2 = 1800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad \nu_1 = \nu_2 = 0,4$$

$$K_A = 1 \quad \frac{b}{d_1} = 1$$

$$\sigma_{HlimN} = 80 \text{ N/mm}^2 \quad S_H = 1,5$$

Orijentacijski proračun modula određuje se prema nosivosti korijena i to izrazom:

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{6 \cdot K_A \cdot T_{1max}}{z_1 \cdot \left(\frac{b}{m}\right) \cdot \sigma_{Fu}}} \geq 1,65 \text{ mm} , m = 4 \text{ mm} \quad (7)$$

$$K_A = 1, T_{1max} = 12150 \text{ Nmm}$$

$$z_1 = 37, \quad \frac{b}{m} = 15 \text{ (odabrano prema)}$$

$$\sigma_{Fu} = \frac{\sigma_{FlimN}}{S_F} = \frac{60}{2} = 30 \text{ N/mm}^2 \text{ (prema [10] za PA 66)}$$

4.4. Određivanje temperature korijena zuba

$$\vartheta_{\text{korijen}} = \vartheta_0 + P_{1\max} \cdot \mu \cdot H_v \cdot \left(\frac{k_{\vartheta, \text{korijena}}}{b \cdot z_1 \cdot (v \cdot m)^{0,75}} + \frac{R_\lambda}{A_K} \right) \cdot ED^{0,64} \quad (8)$$

U izrazu (8) uvrštavamo:

$$\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}, \quad P_{1\max} = 1296 \text{ W},$$

prema [10]: $\mu = 0,4$ (za par PA 66/ PA 66),

$$H_v = 2,6 \cdot \frac{(u + 1)}{(z_2 + 5)} = 2,6 \cdot \frac{(0,405 + 1)}{(15 + 5)} = 0,182 \quad (9)$$

$$k_{\vartheta, \text{korijena}} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ K} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^{0,75} \text{ mm}^{1,75} / \text{W},$$

$$b = 15 \cdot m = 60 \text{ mm}$$

$$v = \frac{d_1 \cdot \pi \cdot n}{(60 \cdot 10^3)} = \frac{253 \cdot \pi \cdot 1018}{60 \cdot 10^3} = 13,5 \text{ m/s} \quad (10)$$

$$A_K \approx \frac{d_k^2 \cdot \pi}{4} + l \cdot d_k \cdot \pi \approx \frac{500^2 \cdot \pi}{4} + 100 \cdot 500 \cdot \pi \approx 353429,2 \text{ mm}^2 \quad (11)$$

$$A_K = 0,353 \text{ m}^2,$$

$$R_\lambda = 0,03 \text{ Km}^2 / \text{W},$$

$$ED = 1$$

Nakon uvrštavanja dobiva se temperatura zagrijavanja korijena zuba: $\vartheta_{\text{korijen}} = 37,5^\circ\text{C}$

Prema [11] za materijal PA66 dopuštene temperature pri kratkotrajnom opterećenju te stalnom radu : $\vartheta_{\text{zul, kurzrillig}} = (140 \dots 170)^\circ\text{C}$, $\vartheta_{\text{zul, dauernd}} = (80 \dots 100)^\circ\text{C}$.

$$\vartheta_{\text{korijen}} = 37,5^\circ\text{C} < \vartheta_{\text{zul, dauernd}} = (80 \dots 100)^\circ\text{C} \text{ uvjet je zadovoljen.}$$

4.5. Određivanje temperature površine zuba

$$\vartheta_{\text{površine}} = \vartheta_0 + P_{1\max} \cdot \mu \cdot H_v \cdot \left(\frac{k_{\vartheta, \text{površine}}}{b \cdot z_1 \cdot (v \cdot m)^{0,75}} + \frac{R_\lambda}{A_K} \right) \cdot ED^{0,64} \quad (12)$$

U (12) uvrštavano:

$$\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}, \quad P_{1max} = 1296 \text{ W},$$

prema [10]: $\mu = 0,4$ (za par PA 66/ PA 66),

$$H_v = 2,6 \cdot \frac{(u + 1)}{(z_2 + 5)} = 2,6 \cdot \frac{(0,405 + 1)}{(15 + 5)} = 0,182 \quad (13)$$

$$k_{\vartheta, \text{korijena}} = 9 \cdot 10^3 \text{ K} \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^{0,75} \text{ mm}^{1,75}/\text{W},$$

$$b = 15 \cdot m = 60 \text{ mm}$$

$$v = \frac{d_1 \cdot \pi \cdot n}{(60 \cdot 10^3)} = \frac{253 \cdot \pi \cdot 1018}{60 \cdot 10^3} = 13,5 \text{ m/s} \quad (14)$$

$$A_K \approx \frac{d_k^2 \cdot \pi}{4} + l \cdot d_k \cdot \pi \approx \frac{500^2 \cdot \pi}{4} + 100 \cdot 500 \cdot \pi \approx 353429,2 \text{ mm}^2 \quad (15)$$

$$A_K = 0,353 \text{ m}^2,$$

$$R_\lambda = 0,03 \text{ Km}^2/\text{W},$$

$$ED = 1$$

Nakon uvrštavanja dobiva se temperaura zagrijavanja površine zuba: $\vartheta_{\text{površine}} = 52,23^\circ\text{C}$

Budući da je $\vartheta_{\text{površine}} = 52,23^\circ\text{C} < \vartheta_{\text{zul, dauernd}} = (80 \dots 100)^\circ\text{C}$ uvjet je zadovoljen.

4.6. Dimenzioniranje para Z₁-Z₂

Diobeni promjeri zupčanika:

$$d_1 = m \cdot z_1 = 148 \text{ mm} \quad (16)$$

$$d_2 = m \cdot z_2 = 60 \text{ mm} \quad (17)$$

Oсни razmak:

$$a = \frac{d_1 - d_2}{2} = 44 \text{ mm} \quad (18)$$

Zbog malog broja zubiju zupčanika Z₂ postoji opasnost od podrezanosti, iako nema zahtjeva za svođenje na neki određeni osni razmak u svrhu povećanja nosivosti odlučeno je napraviti pomak profila gonjenog zupčanika.

Provjera potrebe za pomakom profila manjeg (gonjenog) zupčanika:

$$x_{2min} = \frac{z_{g'} - z_2}{z_g} = \frac{14 - 15}{17} = -0,0588 \quad (19)$$

Odabrani faktori pomaka: $x_1 = 0$ $x_2 = 0,2$

Pogonski kut zahvatne crte određuje se prema [12], str.73., Tablica 73.1 :

$$ev \alpha_w = \frac{2 \cdot \tan \alpha \cdot (x_1 - x_2)}{z_1 - z_2} + ev \alpha = 0,008287 \quad (20)$$

$$\alpha = 20^\circ$$

$$ev \alpha_w = \tan \alpha_w - \frac{\alpha \cdot \pi}{180} \rightarrow \alpha_w = 16,534^\circ \quad (21)$$

Novi osni razmak:

$$a_w = a \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = 43,13 \text{ mm} \quad (22)$$

$$|a - a_w| \leq m \quad (23)$$

$$0,87 \text{ mm} \leq 4 \text{ mm} \quad \text{Uvjet zadovoljen.} \quad (24)$$

Preostale dimenzije izračunavaju se izrazima prema [12], str.73., Tablica 73.1:

$$d_{a1} = d_1 - 2 \cdot m = 140 \text{ mm}$$

$$d_{f1} = d_1 + 2 \cdot m + 2 \cdot 0,25 \cdot m = 158 \text{ mm}$$

$$d_{w1} = d_1 \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = 145,07 \text{ mm} \quad (25)$$

$$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha = 139,1 \text{ mm}$$

$$d_{a2} = d_2 + 2 \cdot m \cdot (1 + x_2) = 69,6 \text{ mm}$$

$$d_{f2} = d_2 - 2 \cdot m + 2 \cdot x_2 \cdot m - 2 \cdot 0,25 \cdot m = 51,6 \text{ mm}$$

$$d_{w2} = d_2 \cdot \frac{\cos \alpha}{\cos \alpha_w} = 58,81 \text{ mm} \quad (26)$$

$$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha = 56,4 \text{ mm}$$

Kontrola postojeće zračnosti prema [12], str.73., Tablica 73.1 :

$$c = \frac{d_{a1} - d_{f2}}{2} - a_w = 1,07 \text{ mm} < c_{min} = 0,12 \cdot m = 0,48 \text{ mm}$$

Uvjet zadovoljen, nije potrebno skraćivanje tjemena.

4.7. Kontrola naprezanja

4.7.1. Naprezanja korijena

$$\sigma_F = K_F \cdot Y_{Fa} \cdot Y_{Sa} \cdot Y_\epsilon \cdot Y_\beta \cdot \frac{F_t}{b \cdot m} \leq \sigma_{FP} \quad (27)$$

Obodna sila na zubima zupčanika:

$$F_t = \frac{2 \cdot T_{1max}}{d_{w1}} = \frac{2 \cdot 12150}{145,07} = 168 \text{ N} \quad (28)$$

Prema [12] str.151. izraz za faktor oblika za unutarnje ozubljenje glasi:

$$Y_{Fa} = 2,06 - 1,18 \cdot \left(2,25 - \frac{d_{a1} - d_{f1}}{2 \cdot m} \right) = 3,25$$

Faktor opterećenja Y_{Sa} očitava se iz [10] str. 7. Slika 1. i iznosi: $Y_{Sa} = 1,74$

Dinamički faktor K_F se prema [10] može pretpostaviti: $K_F = 1$

Faktor prekrivanja Y_ϵ se prema [10] izračunava izrazom:

$$Y_\epsilon = 0,25 + \frac{0,75}{\epsilon_\alpha} \quad (29)$$

Stupanj prekrivanja za unutarnje ozubljenje izračunava se prema [12] str. 73. Tablica 73.1. izrazom:

$$\epsilon_\alpha = \frac{\sqrt{r_{a1}^2 - r_{b1}^2}}{\pi \cdot m \cdot \cos \alpha} - \frac{\sqrt{r_{a2}^2 - r_{b2}^2}}{\pi \cdot m \cdot \cos \alpha} - \frac{a \cdot \sin \alpha_w}{\pi \cdot m \cdot \cos \alpha} = 2,32 \quad (30)$$

Uvrštavanje (29) u (28) dobiva se:

$$Y_{\epsilon} = 0,573$$

Faktor uvjeta rada odnosi se na kose zupčanike pa u je u ovom slučaju: $Y_{\beta} = 1$

Dopušteno naprezanje:

$$\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{FG}}{S_{Flim}}, \quad \sigma_{FG} \approx 2 \cdot \sigma_{Flim}$$

$$\sigma_{Flim} = 65 \text{ N/mm}^2 \text{ prema [10] str. 7. Slika 3.}$$

$$\sigma_{FP} = \frac{130}{2} = 65 \text{ N/mm}^2$$

Kad uvrstimo sve veličine u (27) dobivamo naprezanje korijena pogonskog zupčanika:

$$\sigma_{F1} = 2,27 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{FP} = 65 \text{ N/mm}^2 \text{ zadovoljava.}$$

Uz različite vrijednosti faktora:

$$Y_{Fa} = 2,8 \text{ prema [10] str 7. Slika 1.}$$

$$Y_{Sa} = 1,66 \text{ prema [10] str 7. Slika 2.}$$

A nepromjenjene ostale veličine analognim postupkom dolazimo do naprezanja korijena gonjenog zupčanika:

$$\sigma_{F2} = 1,86 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{FP} = 65 \text{ N/mm}^2$$

4.7.2. Naprezanja površine

$$\sigma_H = Z_E \cdot Z_H \cdot Z_{\epsilon} \cdot Z_{\beta} \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot K_H}{b \cdot d_{w2}} \cdot \frac{1+u}{u}} \leq \sigma_{HP} \quad (31)$$

$$\text{Prema [12]: } \frac{x_1+x_2}{z_1+z_2} = \frac{0,2}{15-37} = -0,01 \rightarrow Z_H = f\left(\frac{x_1+x_2}{z_1+z_2}\right) = 2,8$$

$$Z_{\epsilon} = \sqrt{\frac{4-\epsilon_{\alpha}}{3}} = 0,75, \quad Z_{\beta} = 1, \text{ iz (6): } Z_E = 18,5$$

Dozvoljeno naprezanje prema [12]:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{Hlim} \cdot Z_R}{S_{Hlim}} = \frac{65 \cdot 1}{1,4} = 46,43 \text{ N/mm}^2$$

Uvrštavanjem:

$$\sigma_H = 18,5 \cdot 2,8 \cdot 0,75 \cdot 1 \cdot \sqrt{\frac{168 \cdot 1}{60 \cdot 58,81} \cdot \frac{1 + 0,405}{0,405}} = 15,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_H = 15,8 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_{HP} = 46,43 \text{ N/mm}^2 \text{ zadovoljava.}$$

4.8. Otpornost na trošenje

Budući da zupčanici rade na suho, potrebno je prema [10] provesti proračun trošenja zupčanika tijekom rada. Kontrola će se napraviti za oba zupčanika.

Izraz za trošenje glasi:

$$W_m = \frac{T_{1\max} \cdot 2 \cdot \pi \cdot N_L \cdot H_v \cdot k_w}{b \cdot z \cdot l_{F1}} \quad (32)$$

Prema [10] l_{F1} je moguće dovoljno točno aproksimirati: $l_{F1} = 2 \cdot m$

Koeficijent trošenja k_w je svojstvo materijala u kontaktu, te za PA66/PA66 prema [13] iznosi:

$$k_w = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$$

Dopušteno trošenje:

$$W_{dop} = (0,1 \dots 0,2) \cdot m = 0,8 \text{ mm}$$

Trošenje zupčanika Z_1 :

$$W_{m_1} = \frac{12,15 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^5 \cdot 0,182 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 37 \cdot 8} = 0,0125 \text{ mm}$$

$$W_{m_1} \leq W_{dop} \text{ zadovoljava.}$$

Trošenje zupčanika Z_2 :

$$W_{m_2} = \frac{12,15 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^5 \cdot 0,182 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4}}{60 \cdot 15 \cdot 8} = 0,031 \text{ mm}$$

$$W_{m_2} \leq W_{dop} \text{ zadovoljava.}$$

4.9. Kontrola deformacije vrha zuba

Polimerni materijali imaju značajno manji modul elastičnosti u odnosu na čelike što je razlog zbog kojeg je potrebno izvršiti kontrolu deformacija vrha zuba. Prema [10] radijalna deformacija vrha zuba izračunava se:

$$\lambda = \frac{7,5 \cdot F_t}{b \cdot \cos \beta} \cdot \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) \quad (33)$$

$$\lambda = \frac{7,5 \cdot 168_t}{60 \cdot \cos 0} \cdot \left(\frac{1}{1800} + \frac{1}{1800} \right) = 0,023 \text{ mm} \quad (34)$$

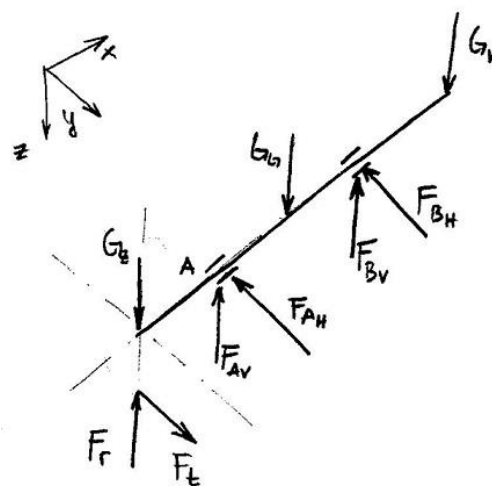
$$\lambda = 0,023 \text{ mm} \leq \lambda_{\text{dop}} = 0,07 \cdot m = 0,28 \text{ mm} \quad (35)$$

5. Proračun vratila V₂

Vratilo V₂ povezuje zupčanik Z₂ s generatorom i ventilatorom. Veza između komponenti i vratila je ostvarena perima, a vratilo je oslonjeno na dva radijalna kuglična ležaja. Vratilo je opterećeno savojno i torzijski. Momente savijanja uzrokuju mase komponenata te sile na gonjenom zupčaniku. Moment torzije vratila uz korisnost od 85% (za suhi rad polimernih zupčanika prema [10]) dobiva se izrazom:

$$T_2 = T_{2\max} = T_{1\max} \cdot i \cdot \eta \quad (36)$$

$$T_2 = 12\,150 \cdot 0,405 \cdot 0,85 = 4183 \text{ Nmm} \quad (37)$$



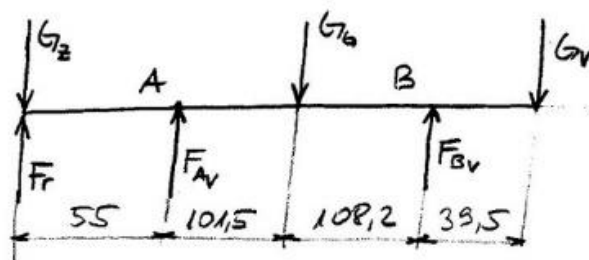
Slika 12. Vratilo sa silama opterećenja u izometriji

5.1 Određivanje reakcija u osloncima

Težine strojnih elemenata i sile na zupčaniku:

$$\begin{aligned} G_G &= 51 \text{ N}, \quad G_Z = 2,2 \text{ N}, \quad G_V = 1,42 \text{ N} \\ F_t &= 168 \text{ N}, \quad F_r = F_t \cdot \tan \alpha = 61 \text{ N} \end{aligned} \quad (38)$$

Sile u vertikalnoj ravnini:



Slika 13. Sile u vertikalnoj ravnini

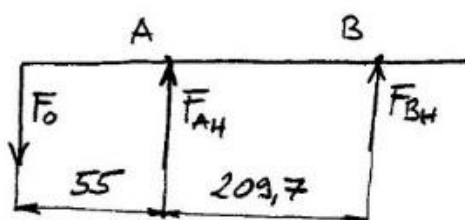
$$\sum F_v = 0 \quad G_Z + G_G + G_V - F_r - F_{AV} - F_{BV} = 0 \quad (39)$$

$$\sum M_A = 0 \quad (40)$$

$$G_Z \cdot 55 - F_r \cdot 55 - G_G \cdot 101,5 + F_{BV} \cdot 209,7 - G_V \cdot 249,2 = 0 \quad (41)$$

$$F_{BV} = 41,8 \text{ N}, \quad F_{AV} = -45,81 \text{ N} \quad (42)$$

Sile u horizontalnoj ravnini:



Slika 14. Sile u horizontalnoj ravnini

$$\sum F_H = 0 \quad F_t - F_{AH} - F_{BH} = 0 \quad (43)$$

$$\sum M_A = 0 \quad F_t \cdot 55 + F_{BH} \cdot 209,7 = 0 \quad (44)$$

$$F_{AH} = 211,43 \text{ N}, \quad F_{BH} = -43,93 \text{ N} \quad (45)$$

$$F_A = F_{AV} + F_{AH} = 257,24 \text{ N} \quad (46)$$

$$F_B = F_{BV} + F_{BH} = 85,73 \text{ N} \quad (47)$$

5.2 Određivanje minimalnih potrebnih promjera vratila

Momenti savijanja u presjecima na slici():

Presjek 1-1:

$$M_y = -F_r \cdot 30 + G_z \cdot 30 = -1764 \text{ Nmm} \quad (48)$$

$$M_z = F_t \cdot 30 = 5025 \text{ Nmm} \quad (49)$$

$$M_{S_1} = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} = 5325,6 \text{ Nmm} \quad (50)$$

Presjek 2-2:

$$M_y = -F_r \cdot 37,5 + G_z \cdot 37,5 = -2205 \text{ Nmm} \quad (51)$$

$$M_z = F_t \cdot 37,5 = 6281,3 \text{ Nmm} \quad (52)$$

$$M_{S_2} = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} = 6657 \text{ Nmm} \quad (53)$$

Presjek 3-3

$$M_y = -F_r \cdot 55 + G_z \cdot 55 = -3234 \text{ Nmm} \quad (54)$$

$$M_z = F_t \cdot 55 = 9213 \text{ Nmm} \quad (55)$$

$$M_{S_3} = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} = 9764 \text{ Nmm} \quad (56)$$

Presjek 4-4:

$$M_y = -F_r \cdot 156,5 + G_z \cdot 156,5 - F_{Av} \cdot 101,5 = -4552,5 \text{ Nmm} \quad (57)$$

$$M_z = F_t \cdot 156,5 + F_{Av} \cdot 101,5 = 4753,6 \text{ Nmm} \quad (58)$$

$$M_{S_4} = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} = 6582 \text{ Nmm} \quad (59)$$

Reducirani moment dobivamo, uzimajući u obzir i torziju, prema HMH teoriji izrazom:

$$M_{red_i} = \sqrt{M_i^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_2)^2} \quad (60)$$

U kojem se faktor čvrstoće materijala α_0 izračunava izrazom:

$$\alpha_0 = \frac{\sigma_{fDN}}{1,73 \cdot \tau_{tDI}} = 0,76 \quad (61)$$

Za materijal vratila S275 JR prema str.34. Tablica 1.:

$$\sigma_{f_{DN}} = 210 \text{ N/mm}^2, \tau_{t_{DI}} = 160 \text{ N/mm}^2 \quad (62)$$

Uvrštavanjem (61), (37) te analogno momenata savijanja za pojedinačni presjek dobivaju se reducirani momenti savijanja u presjecima:

$$\begin{aligned} M_{redI} &= 5995,2 \text{ Nmm} \\ M_{redII} &= 7203,8 \text{ Nmm} \\ M_{redIII} &= 8737,1 \text{ Nmm} \\ M_{redIV} &= 7134,6 \text{ Nmm} \end{aligned} \quad (63)$$

Približni promjeri vratila na odabranim presjecima dobivaju se izrazom:

$$d_i \geq \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{red_i}}{\sigma_{f_{DN_{dop}}}}} \quad (64)$$

U kojem prema [14] str. 67. Tablica 28. dopušteno naprezanje za S275JR iznosi:

$$\sigma_{f_{DN_{dop}}} = 45 \text{ N/mm}^2 \quad (65)$$

Prema (64) izračunati približni promjeri vratila iznose:

$$\begin{aligned} d_1 &\geq 11 \text{ mm} \\ d_2 &\geq 11,7 \text{ mm} \\ d_3 &\geq 13,11 \text{ mm} \\ d_4 &\geq 11,7 \text{ mm} \end{aligned} \quad (66)$$

Odabrani presjeci iznose:

$$\begin{aligned} d_1 &= 15 \text{ mm} \\ d_2 &= 20 \text{ mm} \\ d_3 &= 30 \text{ mm} \\ d_4 &= 19 \text{ mm} \end{aligned} \quad (67)$$

5.3. Odabir i kontrola ležajeva oslonaca A i B

5.3.1 Ležaj oslonca A

Potrebna dinamička nosivost izračunava se izrazom:

$$C_1 = P \cdot \left(\frac{60 \cdot n_m \cdot L_{10h_min}}{10^6} \right)^{\frac{1}{\epsilon}} \quad (68)$$

U kojem su:

$$P = F_A = 257,24 \text{ N} \quad (69)$$

$$n_m = n_{1max} \cdot \frac{1}{i} = 2514 \text{ min}^{-1} \quad (70)$$

$$L_{10h_min} = 4000 \text{ h} \quad (71)$$

$$\epsilon = 3 \quad (72)$$

Uvrštavanjem (69), (70), (71), (72) u (68) dobiva se dinamička nosivost:

$$C_1 = 2174 = 2,2 \text{ kN} \quad (73)$$

Odabran je ležaj W 63806-2RZ proizvođača SKF.

$$C = 3,58 \text{ kN} \quad (74)$$

$$C_1 < C \text{ zadovoljava.} \quad (75)$$

5.3.2. Ležaj oslonca B

Opterećenje ležaja iznosi:

$$P = F_B = 85,73 \text{ N} \quad (76)$$

Ako u izraz (68) uvrstimo (70),(71),(72) i (76) potrebna dinamička nosivost iznosi:

$$C_1 = 724,4 = 0,72 \text{ kN} \quad (77)$$

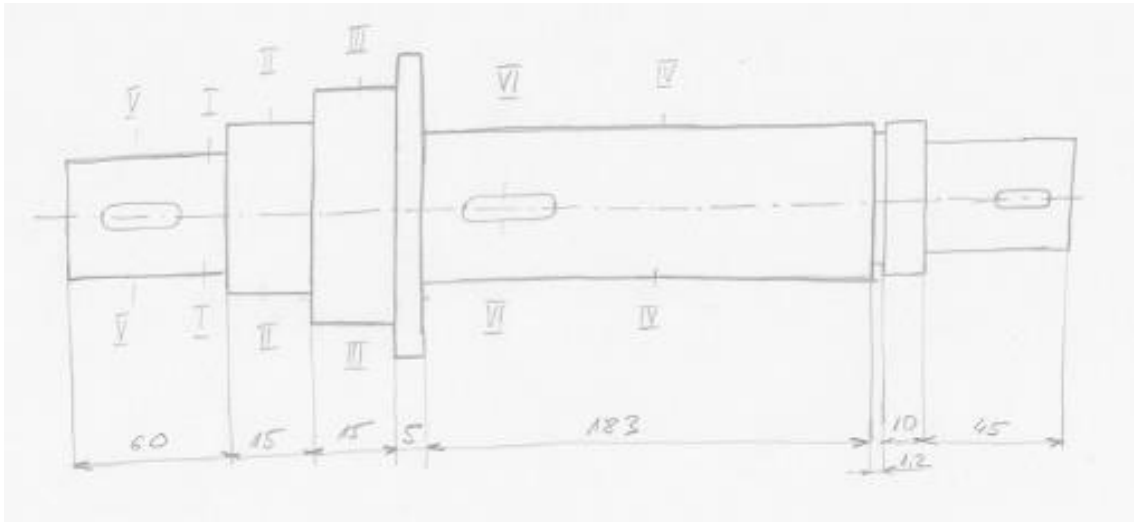
Odabran je ležaj 6202-2RSL proizvođača SKF:

$$C = 8,06 \text{ kN} \quad (78)$$

$$C_1 < C \text{ zadovoljava.} \quad (79)$$

5.4. Kontrola pojedinačnih presjeka vratila

Proračun će biti proveden prema izrazima odnosno vrijednostima dostupnima u [15].



Slika 15. Kontrolirani presjeci vratila

Presjek I-I:

Faktor β_{kf} :

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) = 1,22 \quad (80)$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = 1,33\right) = 0,55 \quad (81)$$

$$\beta_{kf2} = f\left(\frac{\rho}{d} = 0,133, R_m = 420\right) = 1,4 \quad (82)$$

Faktor β_{kt} :

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{kt1,4} - 1) = 1,3 \quad (83)$$

$$c_2 = f\left(\frac{D}{d} = 1,33\right) = 0,97 \quad (84)$$

$$\beta_{kt1,4} = f\left(\frac{\rho}{d} = 0,133, R_m = 420\right) = 1,3 \quad (85)$$

Uvrštavanje, (80) i (83) u izraz za reducirani moment savijanja:

$$M_{redI} = \sqrt{(M_I \cdot \beta_{kf})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_2 \cdot \beta_{kt})^2} \quad (86)$$

$$M_{redI} = 8102 \text{ Nmm} \quad (87)$$

Reducirano naprezanje dobiva se izrazom:

$$\sigma_{red1} = \frac{M_{red1}}{W_1} \quad (88)$$

Gdje je:

$$W_1 = \frac{\pi \cdot d_1^3}{32} = \frac{\pi \cdot 15^3}{32} = 331,4 \text{ mm}^3 \quad (89)$$

$$\sigma_{red1} = 24,5 \text{ N/mm}^2 \quad (90)$$

Postojeća sigurnost računa se prema:

$$S_{post} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{red1}} = 5,4 \quad (91)$$

$$\text{Faktor veličine: } b_1 = f(d_1) = 0,97 \quad (92)$$

$$\text{Faktor kvalitete površinske obrade: } b_2 = f(R_m, R_{max}) = 0,98 \quad (93)$$

$$\text{Trajna dinamička čvrstoća materijala S2735JR: } \sigma_{fDN} = 210 \text{ N/mm}^2 \quad (94)$$

$$\text{Faktor udara: } \varphi = 1 \quad (95)$$

Potrebna sigurnost prema [15] str. 34.: $S_{potr} = 1,4 \dots 2$ odabrano $S_{potr} = 1,8$

Uvjet:

$$S_{post} = 5,4 > S_{potr} \text{ zadovoljava.} \quad (96)$$

Presjek II-II

Faktor β_{kf} :

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) = 1,32 \quad (97)$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = 1,5\right) = 0,8 \quad (98)$$

$$\beta_{kf2} = f\left(\frac{\rho}{d} = 0,15, R_m = 420\right) = 1,4 \quad (99)$$

Faktor β_{kt} :

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{kt1,4} - 1) = 1,3 \quad (100)$$

$$c_2 = f\left(\frac{D}{d} = 1,5\right) = 1 \quad (101)$$

$$\beta_{kt1,4} = f\left(\frac{\rho}{d} = 0,1, R_m = 420\right) = 1,3 \quad (102)$$

Uvrštavanje, (97) i (100) u izraz za reducirani moment savijanja:

$$M_{redII} = \sqrt{(M_{II} \cdot \beta_{kf})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_2 \cdot \beta_{kt})^2} \quad (103)$$

$$M_{redI} = 9453,1 \text{ Nmm} \quad (104)$$

Reducirano naprežanje dobiva se izrazom:

$$\sigma_{redII} = \frac{M_{redII}}{W_{II}} \quad (105)$$

Gdje je:

$$W_{II} = \frac{\pi \cdot d_1^3}{32} = \frac{\pi \cdot 20^3}{32} = 785,4 \text{ mm}^3 \quad (106)$$

$$\sigma_{redII} = 12,04 \text{ N/mm}^2 \quad (107)$$

Postojeća sigurnost računa se prema:

$$S_{post} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{redII}} = 14,9 \quad (108)$$

$$\text{Faktor veličine: } b_1 = f(d_2) = 0,95 \quad (109)$$

$$\text{Faktor kvalitete površinske obrade: } b_2 = f(R_m, R_{max}) = 0,9 \quad (110)$$

$$\text{Trajna dinamička čvrstoća materijala S2735JR: } \sigma_{fDN} = 210 \text{ N/mm}^2 \quad (111)$$

$$\text{Faktor udara: } \varphi = 1 \quad (112)$$

Potrebna sigurnost prema [15] str. 34.: $S_{potr} = 1,4 \dots 2$ odabrano $S_{potr} = 1,8$

Uvjet:

$$S_{post} = 14,92 > S_{potr} \text{ zadovoljava.} \quad (113)$$

Presjek III-III:

Faktor β_{kf} :

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) = 1,22 \quad (114)$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = 1,2\right) = 0,43 \quad (115)$$

$$\beta_{kf2} = f\left(\frac{\rho}{d} = 0,13, R_m = 420\right) = 1,5 \quad (116)$$

Faktor β_{kt} :

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{kt1,4} - 1) = 1,24 \quad (117)$$

$$c_2 = f\left(\frac{D}{d} = 1,2\right) = 0,8 \quad (118)$$

$$\beta_{kt1,4} = f\left(\frac{\rho}{d} = 0,13, R_m = 420\right) = 1,3 \quad (119)$$

Uvrštavanjem (114) i (117) u izraz za reducirani moment savijanja:

$$M_{redIII} = \sqrt{(M_{III} \cdot \beta_{kf})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_2 \cdot \beta_{kt})^2} \quad (120)$$

$$M_{redIII} = 12\,367,2 \text{ Nmm} \quad (121)$$

Reducirano naprezanje dobiva se izrazom:

$$\sigma_{redIII} = \frac{M_{redIII}}{W_{III}} \quad (122)$$

Gdje je:

$$W_{III} = \frac{\pi \cdot d_3^3}{32} = \frac{\pi \cdot 30^3}{32} = 2651 \text{ mm}^3 \quad (123)$$

$$\sigma_{redIII} = 4,67 \text{ N/mm}^2 \quad (124)$$

Postojeća sigurnost računa se prema:

$$S_{post} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{redIII}} = 41 \quad (125)$$

$$\text{Faktor veličine: } b_1 = f(d_3) = 0,93 \quad (126)$$

$$\text{Faktor kvalitete površinske obrade: } b_2 = f(R_m, R_{max}) = 0,98 \quad (127)$$

$$\text{Trajna dinamička čvrstoća materijala S2735JR: } \sigma_{fDN} = 210 \text{ N/mm}^2 \quad (128)$$

$$\text{Faktor udara: } \varphi = 1 \quad (129)$$

Potrebna sigurnost prema [15] str. 34.: $S_{potr} = 1,4 \dots 2$ odabrano $S_{potr} = 1,8$

Uvjet:

$$S_{post} = 41 > S_{potr} \text{ zadovoljava.} \quad (130)$$

Presjek IV-IV:Faktor β_{kf} :

$$\beta_{kf} = 1 + c_1 \cdot (\beta_{kf2} - 1) = 1,32 \quad (131)$$

$$c_1 = f\left(\frac{D}{d} = 1,84\right) = 0,95 \quad (132)$$

$$\beta_{kf2} = f\left(\frac{\rho}{d} = 0,1, R_m = 420\right) = 1,5 \quad (133)$$

Faktor β_{kt} :

$$\beta_{kt} = 1 + c_2 \cdot (\beta_{kt1,4} - 1) = 1,3 \quad (134)$$

$$c_2 = f\left(\frac{D}{d} = 1,84\right) = 1 \quad (135)$$

$$\beta_{kt1,4} = f\left(\frac{\rho}{d} = 0,1, R_m = 420\right) = 1,3 \quad (136)$$

Uvrštavanjem (131) i (134) u izraz za reducirani moment savijanja:

$$M_{redIV} = \sqrt{(M_{IV} \cdot \beta_{kf})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_2 \cdot \beta_{kt})^2} \quad (137)$$

$$M_{redIV} = 12\,294,1 \text{ Nmm} \quad (138)$$

Reducirano naprezanje dobiva se izrazom:

$$\sigma_{redIV} = \frac{M_{redIV}}{W_{IV}} \quad (139)$$

Gdje je:

$$W_{IV} = \frac{\pi \cdot d_4^3}{32} = \frac{\pi \cdot 19^3}{32} = 673,4 \text{ mm}^3 \quad (140)$$

$$\sigma_{redIV} = 18,3 \text{ N/mm}^2 \quad (141)$$

Postojeća sigurnost računa se prema:

$$S_{post} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{fDN}}{\varphi \cdot \sigma_{redIV}} = 14,9 \quad (142)$$

$$\text{Faktor veličine: } b_1 = f(d_4) = 0,95 \quad (143)$$

$$\text{Faktor kvalitete površinske obrade: } b_2 = f(R_m, R_{max}) = 0,9 \quad (144)$$

$$\text{Trajna dinamička čvrstoća materijala S2735JR: } \sigma_{fDN} = 210 \text{ N/mm}^2 \quad (145)$$

$$\text{Faktor udara: } \varphi = 1 \quad (146)$$

Potrebna sigurnost prema [15] str. 34.: $S_{\text{potr}} = 1,4 \dots 2$ odabrano $S_{\text{potr}} = 1,8$

Uvjet:

$$S_{\text{post}} = 10,6 > S_{\text{potr}} \text{ zadovoljava.} \quad (147)$$

Uz kontrolirane presjeka izvršit će se kontrola presjeka V-V (utor za pero zupčanika) te VI-VI (utor za pero generatora).

Presjek V-V:

Vratilo je opterećeno samo torzijski što uzrokuje smično naprezanje:

$$\tau_V = \frac{T_2}{W_V} = \frac{4183}{220,7} = 24,1 \text{ N/mm}^2 \quad (148)$$

$$W_V = \frac{\pi \cdot (d_1 - t)^3}{32} = 173,9 \text{ N/mm}^3 \quad (149)$$

Postojeća sigurnost:

$$S_{\text{post}} = \frac{\tau_{\text{fDI}} \cdot b_1 \cdot b_2}{\tau_V} = 6,38 \quad (150)$$

Faktori: $b_1 = 0,96$, $b_2 = 1$

Dinamička izdržljivost prema [15] str. 34. Tablica 1. za S275JR: $\tau_{\text{fDI}} = 160 \text{ N/mm}^2$

Uvjet:

$$S_{\text{post}} = 6,38 > S_{\text{potr}} = 1,8 \text{ zadovoljava.} \quad (151)$$

Presjek VI-VI

Presjek je opterećen momentima savijanja i momentom torzije. Momenti savijanja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini:

$$M_y = -F_r \cdot 72 + G_z \cdot 72 - F_{A_V} \cdot 17 = -3455 \text{ Nmm} \quad (152)$$

$$M_z = F_t \cdot 72 - F_{A_V} \cdot 17 = 8465,7 \text{ Nmm} \quad (153)$$

Moment savijanja je:

$$M_{VI} = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} = 9194 \text{ Nmm} \quad (154)$$

Reducirani moment savijanja:

$$M_{\text{redVI}} = \sqrt{(M_{\text{VI}} \cdot \beta_{k_f})^2 + 0,75 \cdot (\alpha_0 \cdot T_2 \cdot \beta_{k_t})^2} \quad (155)$$

Faktori (prema [15] str. 38.):

$$\beta_{k_f} = 1,7, \quad \beta_{k_t} = 1,9 \quad (156)$$

$$M_{\text{redVI}} = 16\,401 \text{ Nmm} \quad (157)$$

Reducirano naprezanje:

$$\sigma_{\text{redVI}} = \frac{M_{\text{redVI}}}{W_{\text{VI}}} = 44,86 \text{ N/mm}^2 \quad (158)$$

$$W_{\text{VI}} = \frac{\pi \cdot (d_4 - t)^3}{32} = 365,6 \text{ N/mm}^3 \quad (159)$$

Postojeća sigurnost:

$$S_{\text{post}} = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot \sigma_{f_{\text{DN}}}}{\sigma_{\text{redIV}}} \quad (160)$$

Faktori: $b_1 = 0,96$, $b_2 = 1$

Dinamička izdržljivost: $\sigma_{f_{\text{DN}}} = 210 \text{ N/mm}^2$

Uvjet:

$$S_{\text{post}} = 4,5 > S_{\text{potr}} = 1,8 \text{ zadovoljava.} \quad (161)$$

6. Proračun pera

Za sve spojeve elemenata sa vratilom koristiti će se standardno DIN 6885 pero. Pero koje spaja zupčanik s vratilom je najopterećenije.

Prema DIN 6885 za $d_1=15$ mm standardni spoj perom ima dimenzije:

$$\begin{aligned}t &= 2,9 \text{ mm} \\t_2 &= 2,2 \text{ mm} \\b &= h = 5 \text{ mm}\end{aligned}\tag{162}$$

Dopušteni pritisak za materijal PA66: $p_{\text{dop}} = 32 \text{ N/mm}^2$

Tangencijalna sila:

$$F_t = \frac{2 \cdot T_2}{d_1} = 558 \text{ N}\tag{163}$$

Potrebna duljina pera:

$$l \geq \frac{F_t}{p_{\text{dop}} \cdot (h - t)} = 8,3 \text{ mm}\tag{164}$$

Odabrana je standardna duljina: $l = 14 \text{ mm}$

7. Zaključak

Temeljem rezultata mjerenja dobivene su vrijednosti ulaznih veličina u veslačkom zaveslaju koje su poslužile za konstrukciju mehaničkog prijenosnika snage u svrhu učinkovitije pretvorbe mehaničke energije u električnu. Pokazalo se kako je moguće takav prijenosnik izvesti kao polimerni zupčanički par s unutarnjim ozubljenjem. Iako se u svakom trenutku proračuna težilo ka što većim iskoristivostima, u pogledu lakog održavanja te uklanjanja potrebe za podmazivanjem, odlučeno je da će se proračun izvesti za rad na suho nauštrb nešto manjoj iskoristivosti zupčaničkog para. Za proračun su se uzele vrijednosti koje se rijetko javljaju u stvarnosti no kako bi bili na strani sigurnosti one jesu jedine mjerodavne. Ostatak konstrukcije napravljen je sukladno stečenim znanjima i dostupnim informacijama, konstrukcija nije u potpunosti zadovoljila uvjet kompaktnosti zbog relativno velike osne dimenzije no u cjelini je dobar dokaz da je ovakav sklop moguće napraviti za tu svrhu. U eventualnom razmatranju odabira materijala i tehnologija proizvodnje te usavršavanja ovakvog sklopa zasigurno bi trebalo uzeti u obzir relativno malo tržište koje bi za takav proizvod bio prikladan kao i cijene komponenata korištenih u konstrukciji.

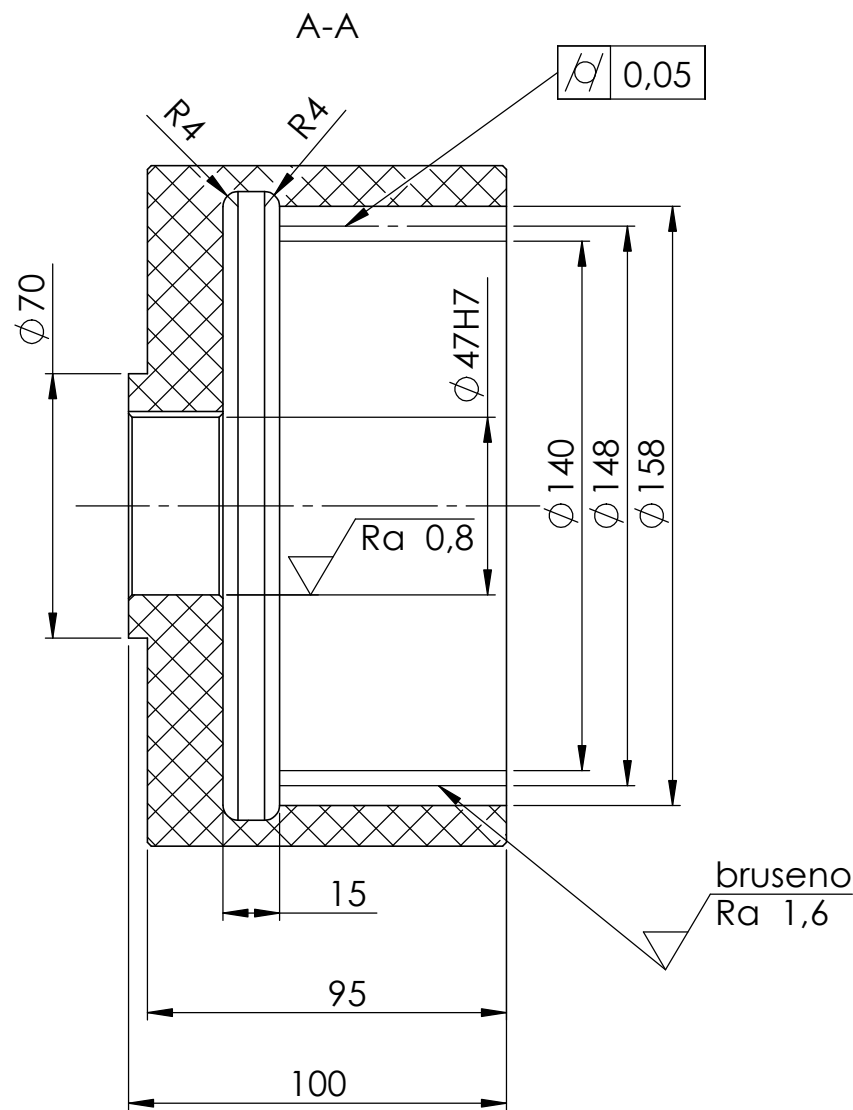
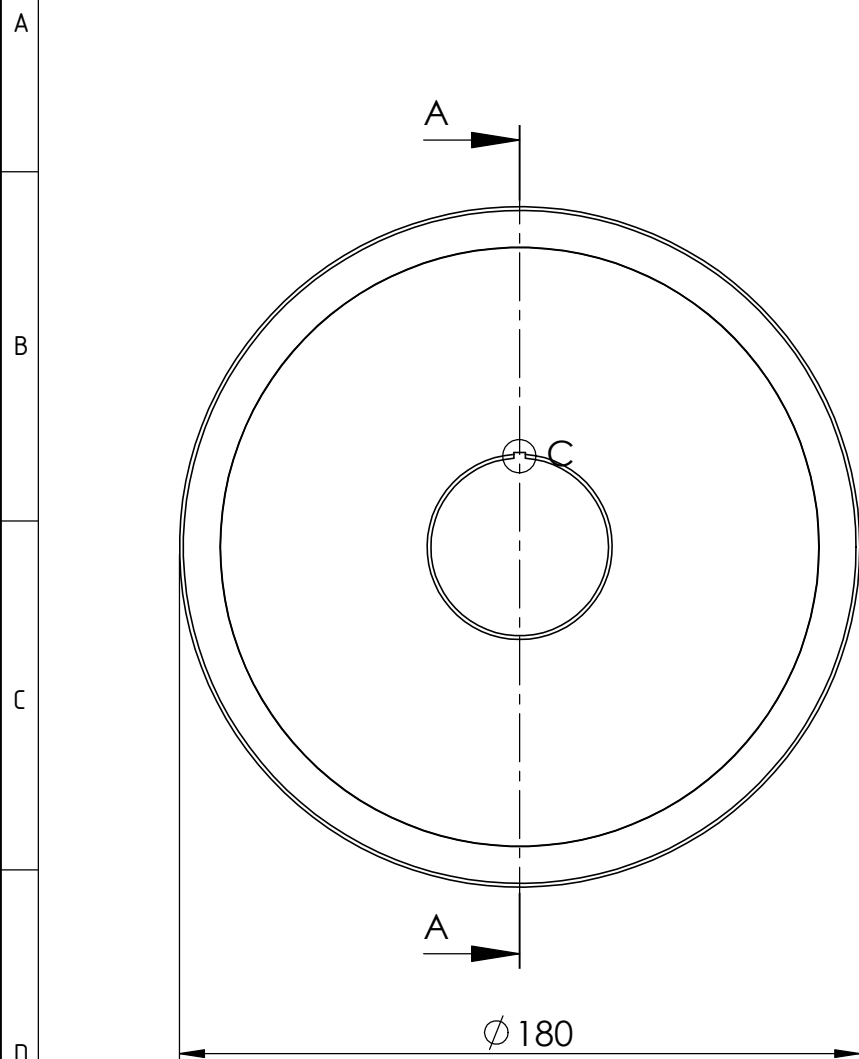
LITERATURA

- [1] Sprague IV RC, Martin JC, Davidson CJ, Farrar RP. Force-velocity and power-velocity relationships during maximal short-term rowing ergometry. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39(2):358–64.
- [2] Kleshnev DV. *Biomechanics of rowing.* 2016.
- [3] Skalicki B, Grilec J. *Električni strojevi i pogoni.* 2005.
- [4] Wolf R. *Osnove električnih strojeva.*
- [5] Jiang W, Wang P, Ni Y, Wang J, Wang L, Liao Y. Multimode Current Hysteresis Control for Brushless DC Motor in Motor and Generator State with Commutation Torque Ripple Reduction. *IEEE Trans Ind Electron.* 2018;65(4):2975–85.
- [6] Gatto G, Marongiu I, Perfetto A, Serpi A. Brushless DC generator controlled by constrained predictive algorithm. *IEEE Int Symp Ind Electron.* 2010;1224–9.
- [7] Barisa T, Sumina D, Kutija M. Control of generator-and grid-side converter for the interior permanent magnet synchronous generator. *2015 Int Conf Renew Energy Res Appl ICRERA 2015.* 2015;1015–20.
- [8] Sharma S, Singh B. Permanent Magnet Brushless DC Generator Based Stand-Alone Wind Energy Conversion System. :1–6.
- [9] Domitran Z. *Utjecaj odstupanja dimenzija na životni vijek polimernih zupčanika.* 2013.
- [10] VDI 2736 - 2.
- [11] VDI 2736 - 1. 2010. p. 1–5.
- [12] Oberšmit E. *Ozubljenja i zupčanici.* 1982.
- [13] Jia B Bin, Li TS, Liu XJ, Cong PH. Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions. *Wear.* 2007;262(11–12):1353–9.
- [14] Opalić M, Rakamarić P. *Reduktor Proračun i konstrukcija jednostupanjskog zupčanog prijenosnika.*
- [15] Horvat Z. *VRATILO Podloge za proračun.*

PRILOZI

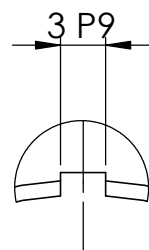
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

✓ (✓ Ra 0,8 ✓ Ra 1,6)



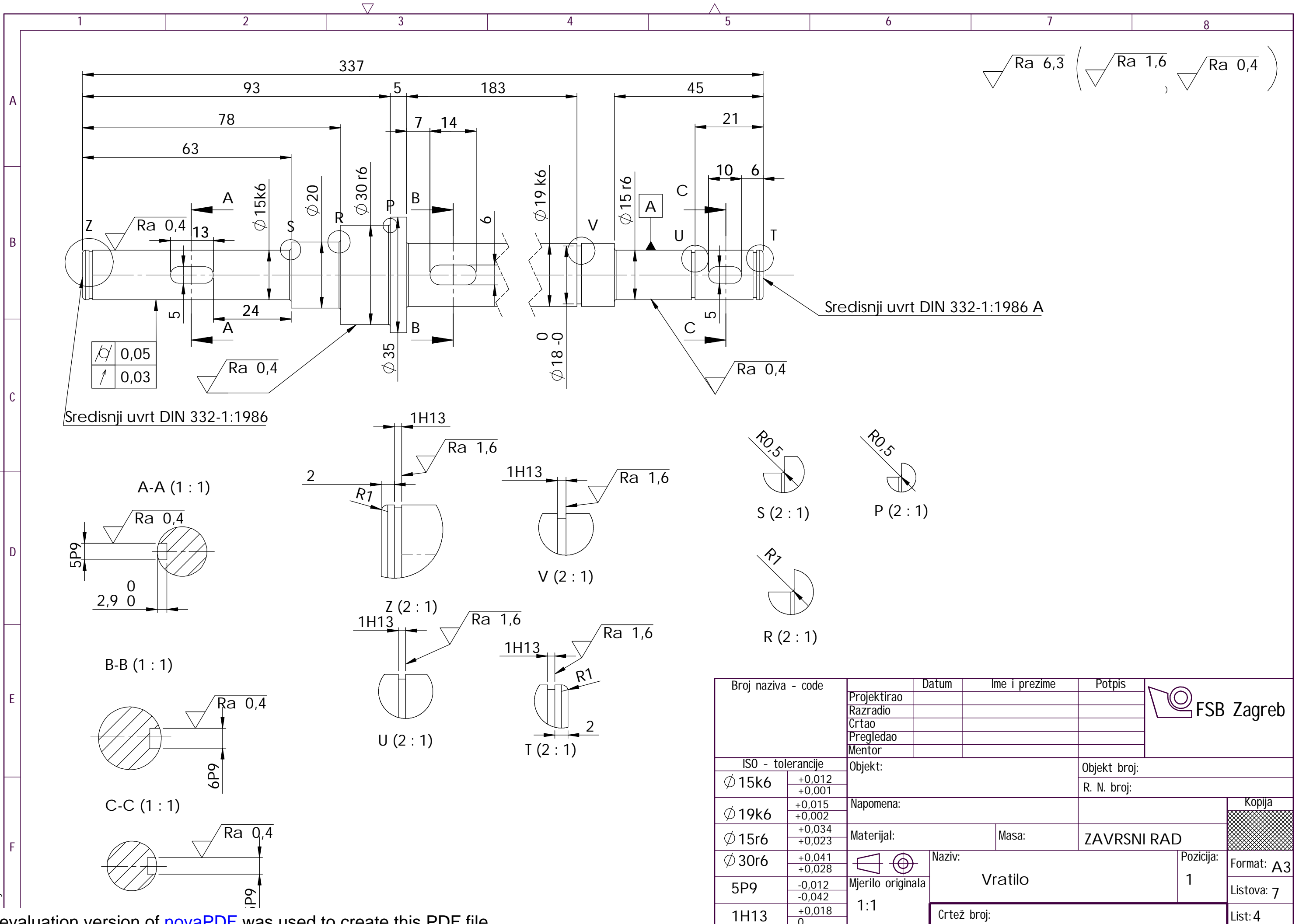
Napomena: Sva ne kotirana skosenja 1x45°

| | | |
|-----------------------------|-----|--------------|
| Broj zubi | z1 | 37 |
| Modul | m | 4 mm |
| Standardni profil | | HRN M.C1.015 |
| Pomak profila | x1m | 0 |
| Promjer temeljne kruznice | db1 | 139,1 mm |
| Kontrola, kvaliteta | | |
| Promjer kinematske kruznice | dw1 | 145,07 mm |
| Osnj razmak | aw1 | |
| Kut zahvatne linije | | |
| Brzina vrtnje | | |



C (2:1)

| | | | | | |
|--------------------|-------------|-----------------------|---------------|-----------------------|------------|
| Broj naziva - code | Projektirao | Datum | Ime i prezime | Potpis | |
| | Razradio | | | | |
| | Crtao | | | | |
| | Pregledao | | | | |
| | Mentor | | | | |
| ISO - tolerancije | Objekt: | | Objekt broj: | | |
| $\phi 47H7$ | +0,025 | | | R. N. broj: | |
| | 0 | | | Smjer: konstrukcijski | |
| 3 P9 | -0,006 | Napomena: | | Kopija | |
| | -0,031 | | | ZAVRSNI RAD | |
| | | Materijal: PA 66 | Masa: 1,4 kg | Naziv: Zupcanik 1 | |
| | | Mjerilo originala | | Pozicija: 1 | Format: A3 |
| | | Crtež broj: MT-2018-1 | | | Listova: 1 |
| | | | | | List: 1 |

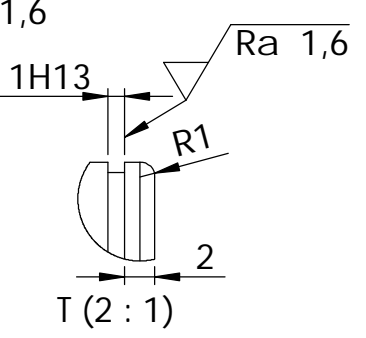
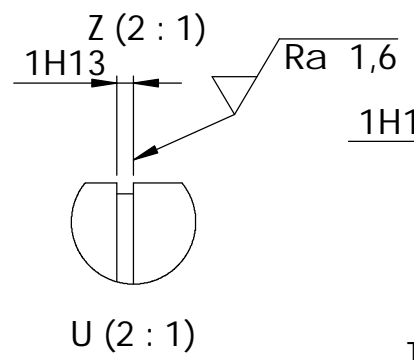
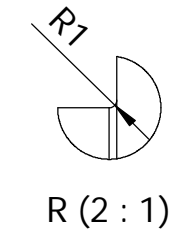
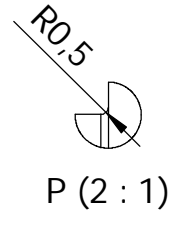
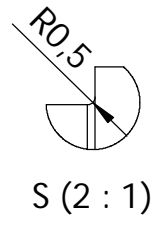
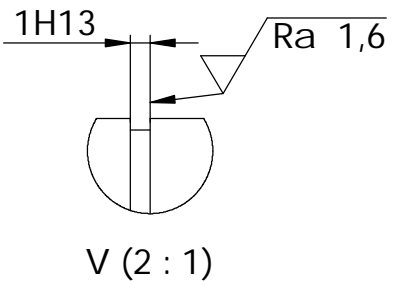
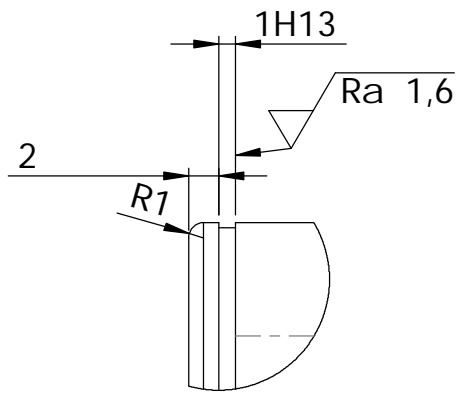
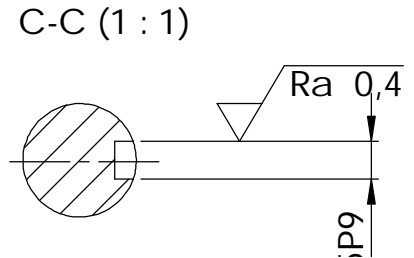
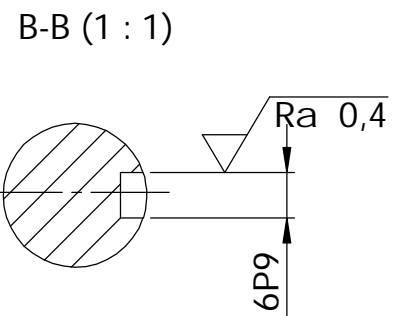
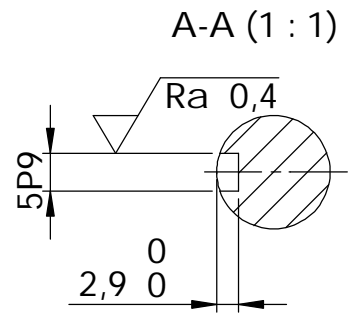


$\sqrt{Ra 6,3}$ ($\sqrt{Ra 1,6}$, $\sqrt{Ra 0,4}$)

| | |
|------------|------|
| ϕ | 0,05 |
| \uparrow | 0,03 |

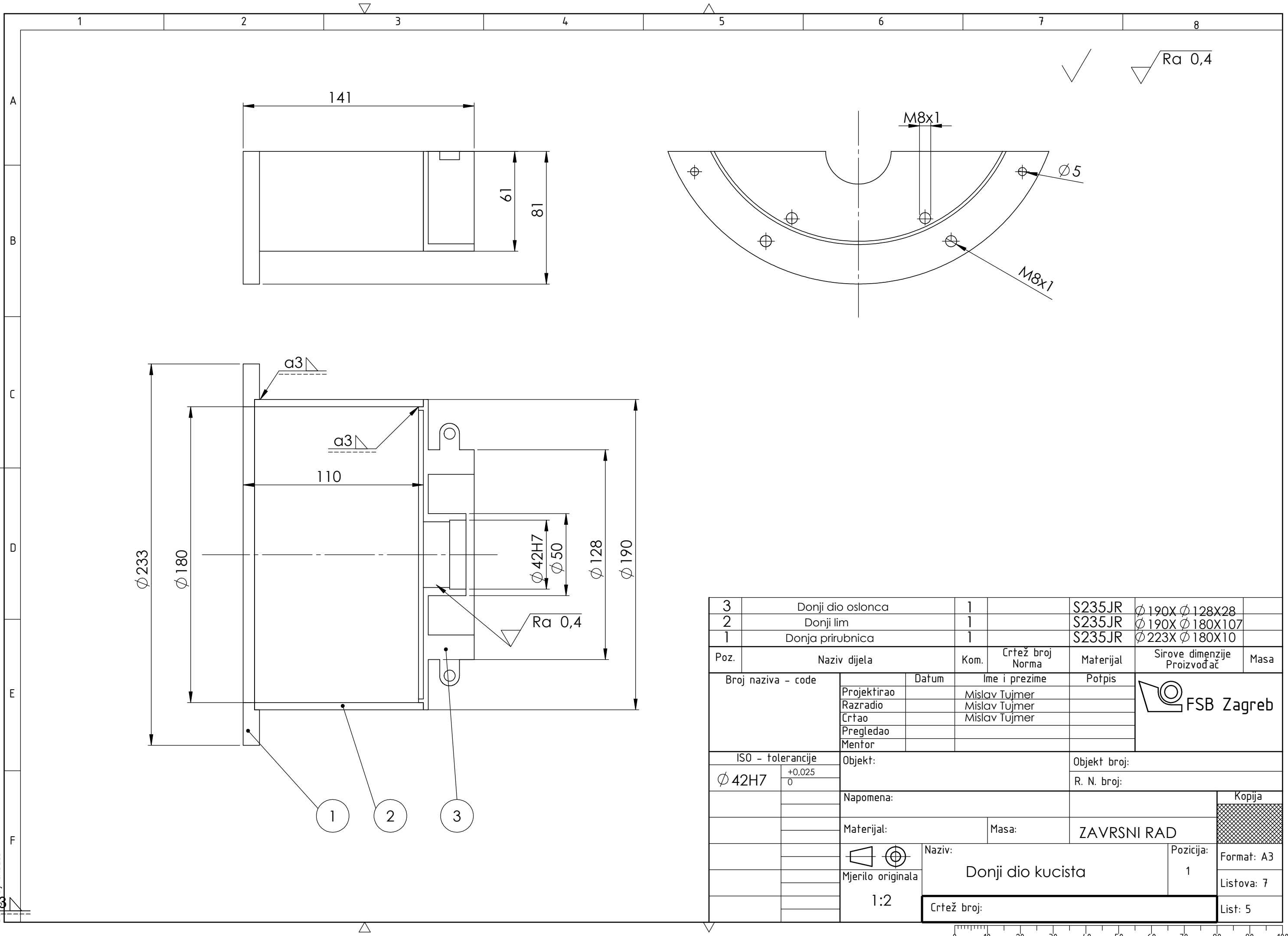
Sredisnji uvrst DIN 332-1:1986

Sredisnji uvrst DIN 332-1:1986 A

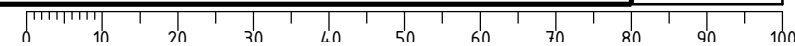


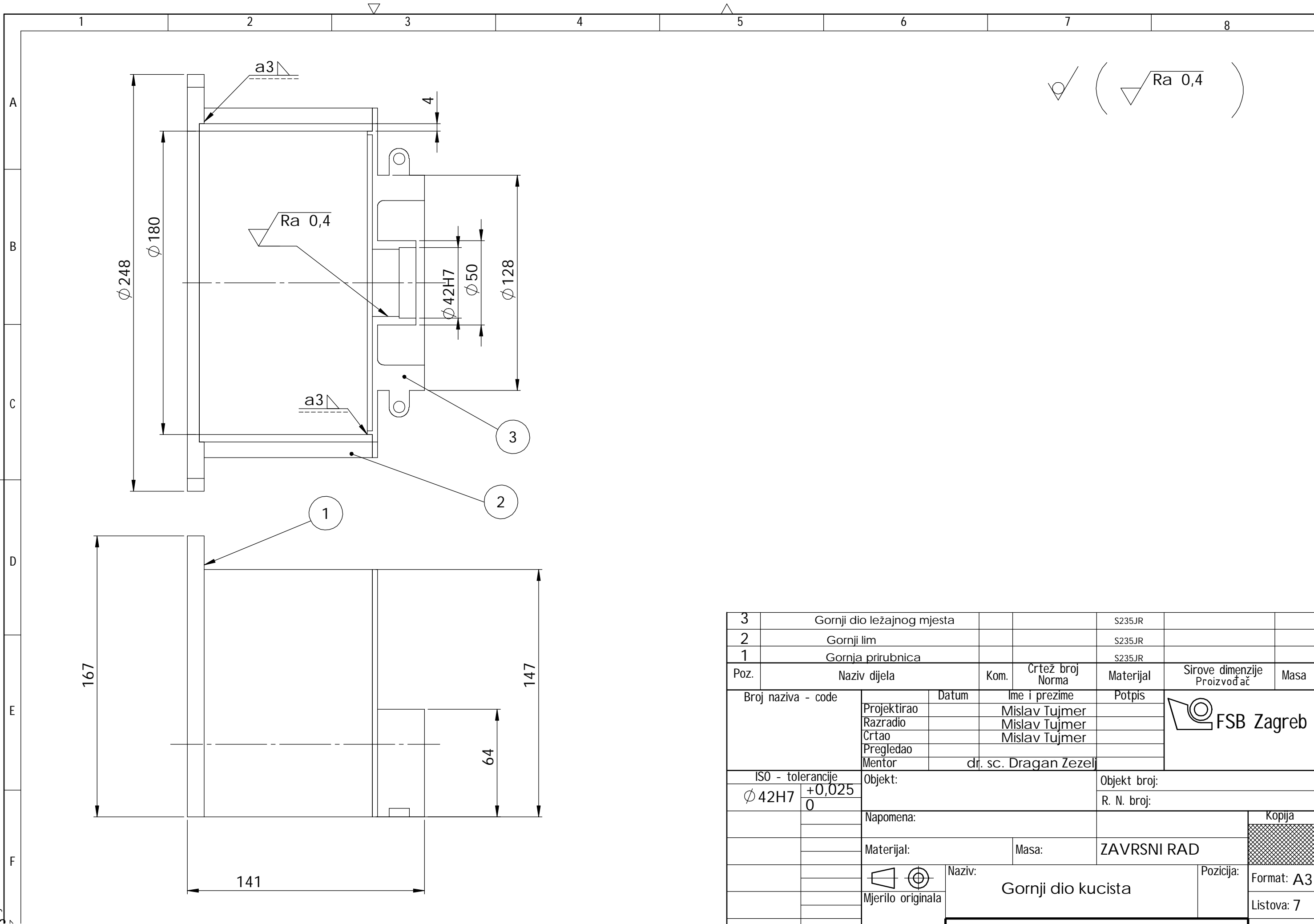
| | | | | | |
|--------------------|------------------|-------------------|---------------|--------------|------------|
| Broj naziva - code | Projektirao | Datum | Ime i prezime | Potpis | |
| | Razradio | | | | |
| | Crtao | | | | |
| | Pregledao | | | | |
| | Mentor | | | | |
| ISO - tolerancije | | Objekt: | | Objekt broj: | |
| $\phi 15k6$ | +0,012 +0,001 | | | R. N. broj: | |
| $\phi 19k6$ | +0,015 +0,002 | Napomena: | | | |
| $\phi 15r6$ | +0,034 +0,023 | Materijal: | Masa: | ZAVRSNI RAD | |
| $\phi 30r6$ | +0,041 +0,028 | Naziv: | | Pozicija: | Kopija |
| 5P9 | -0,012 -0,042 | Vratilo | | 1 | Format: A3 |
| 1H13 | +0,018 0 | Mjerilo originala | | | Listova: 7 |
| | | 1:1 | Crtež broj: | | List: 4 |



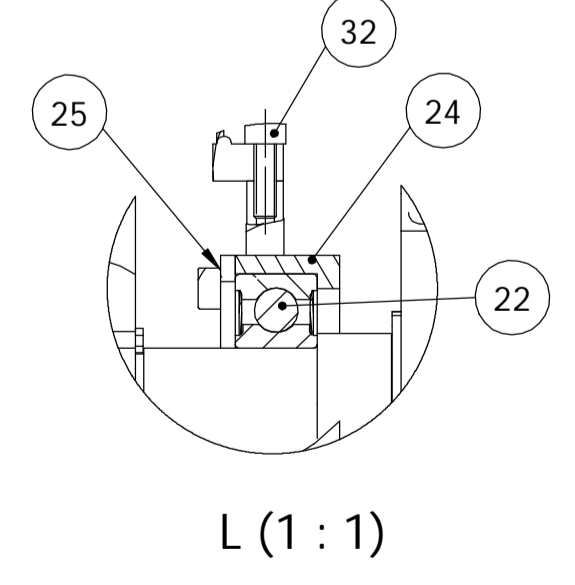
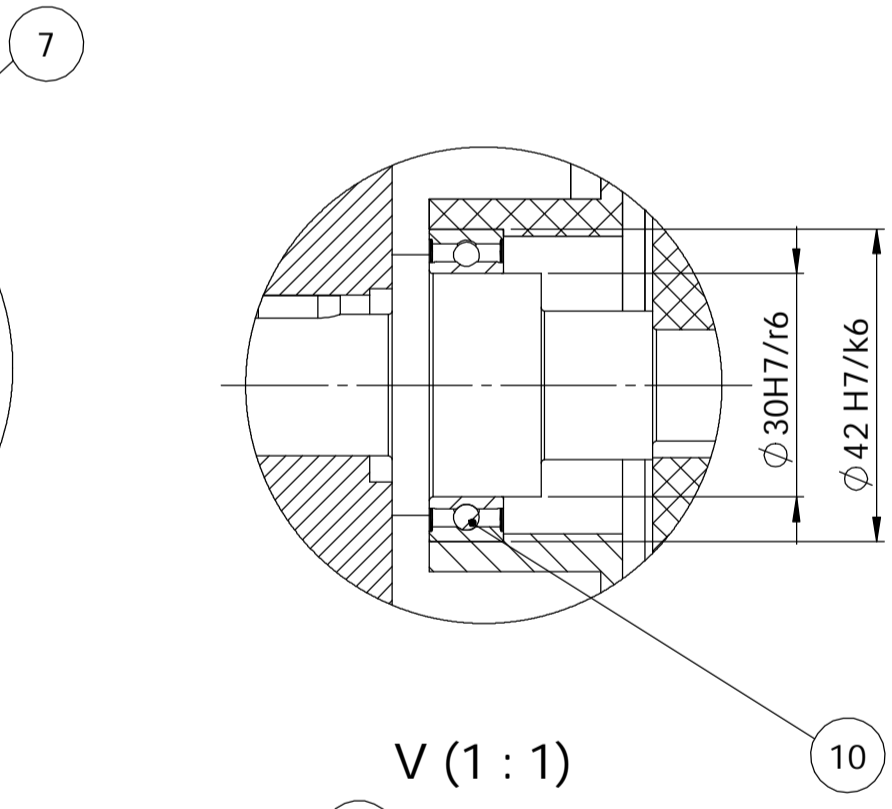
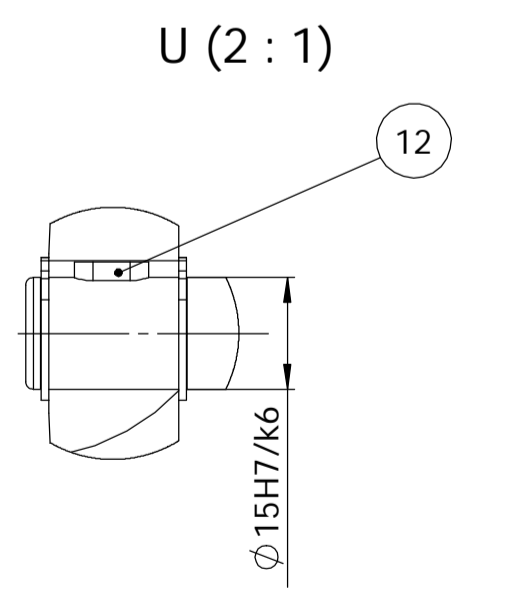
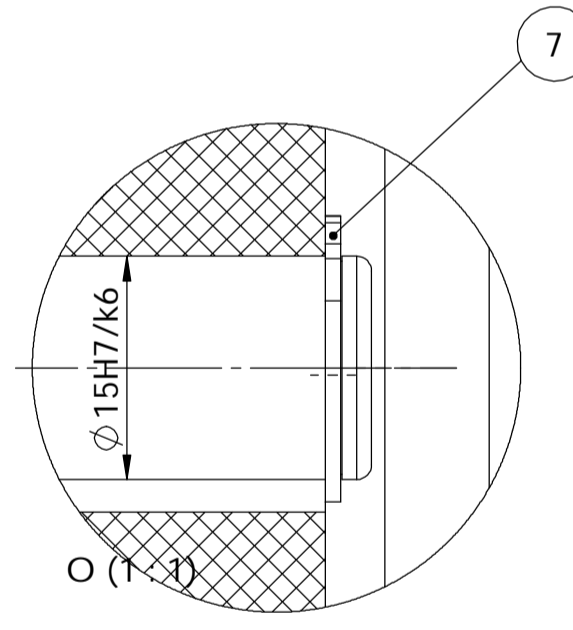
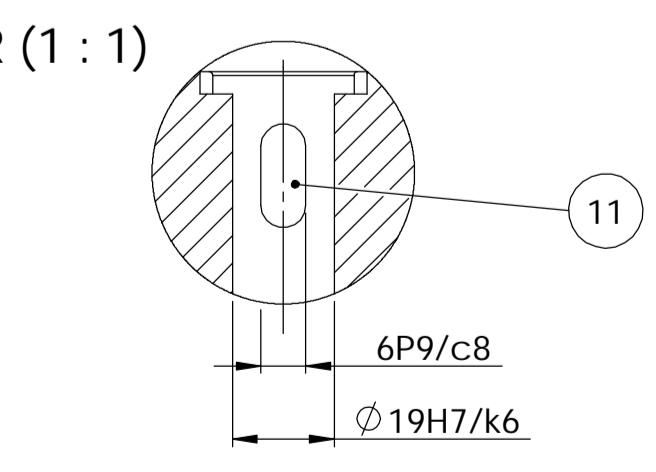
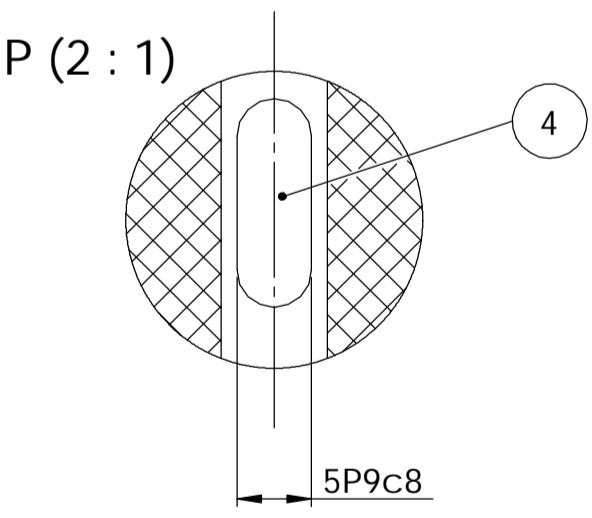
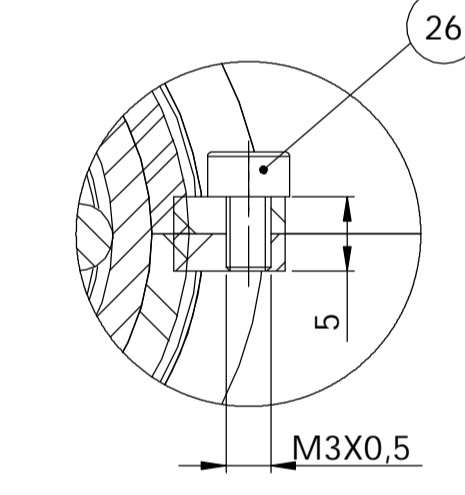
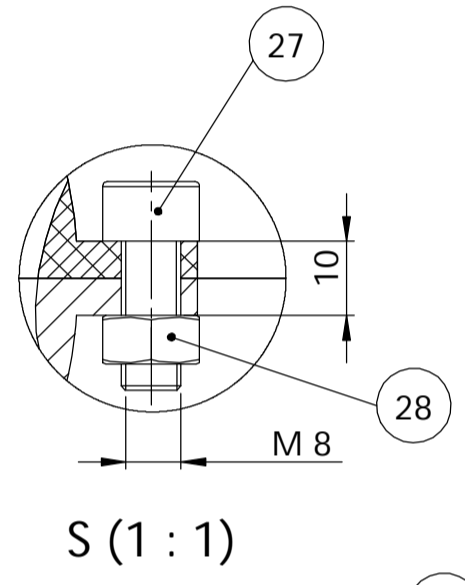
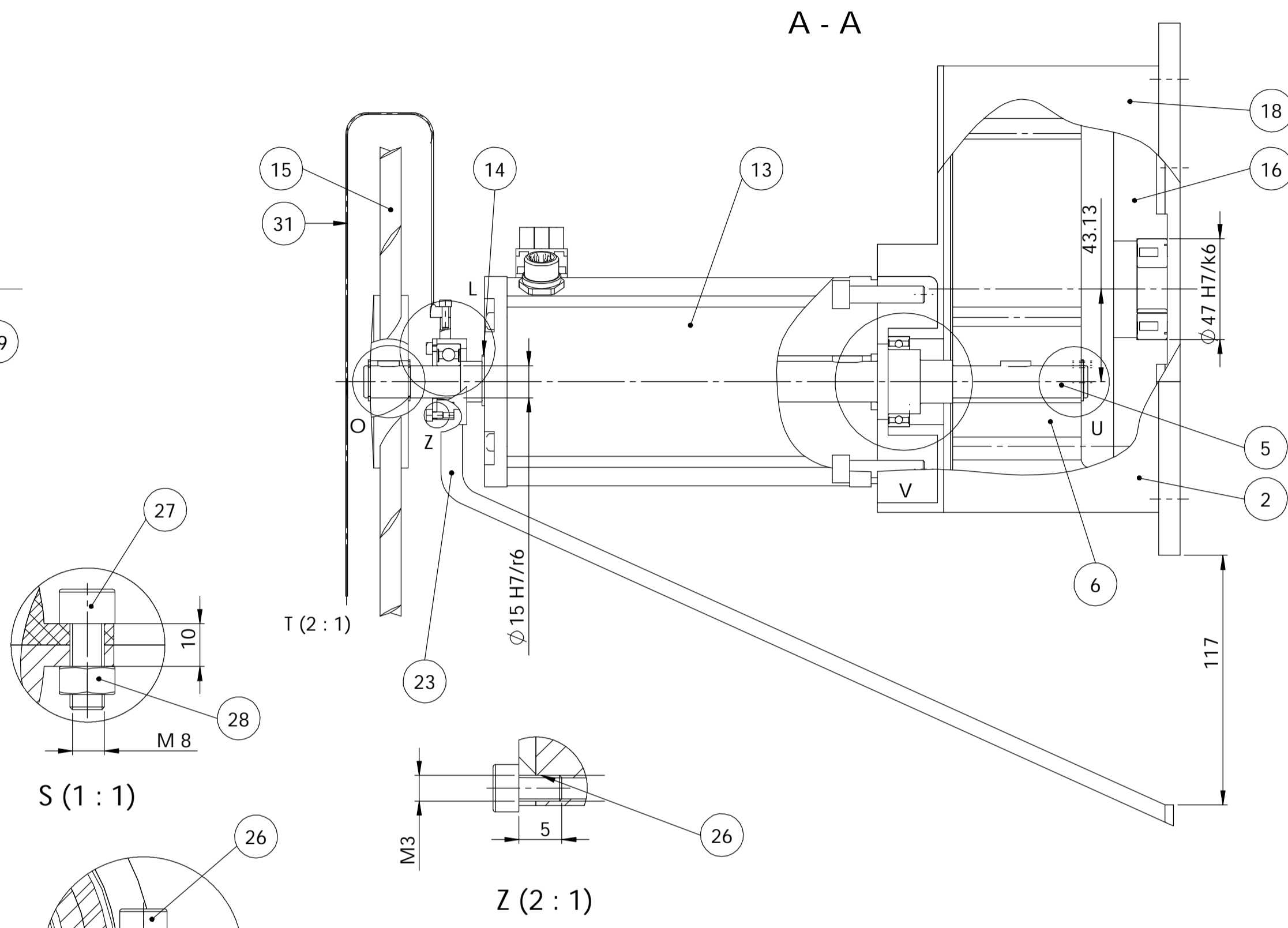
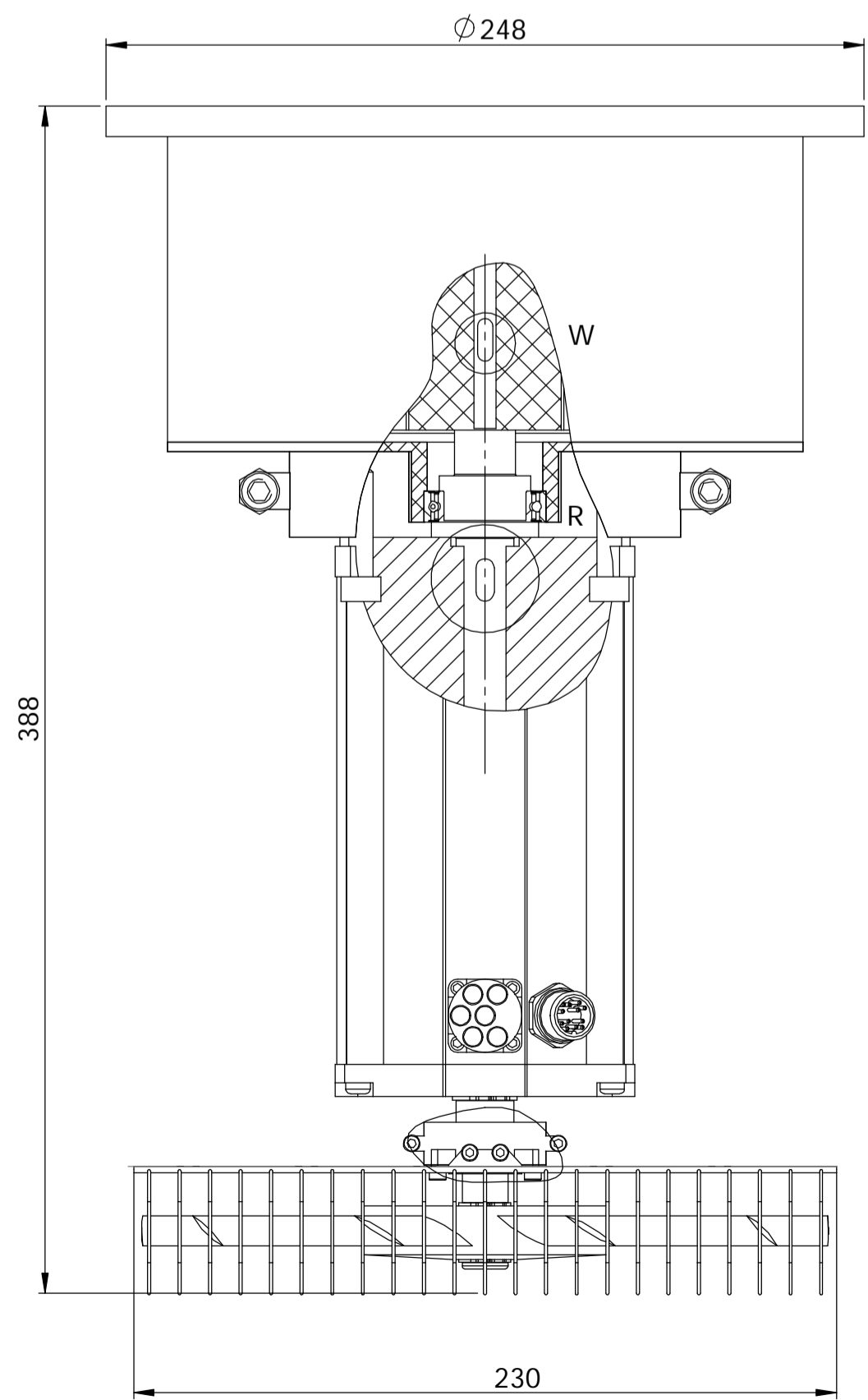
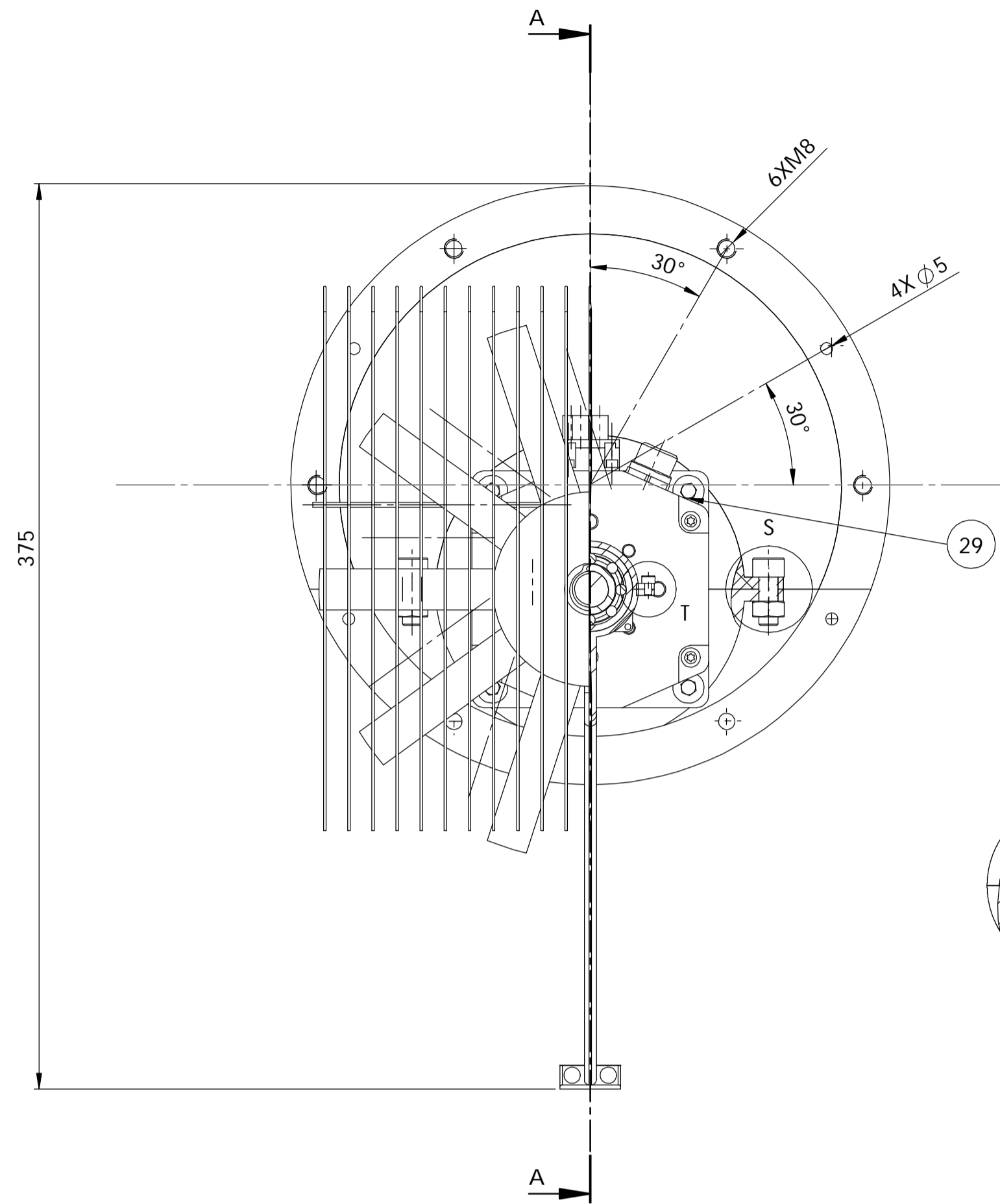


| 3 | Donji dio oslonca | 1 | | S235JR | Ø 190X Ø 128X28 | |
|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------|--------------------------------|------------|
| 2 | Donji lim | 1 | | S235JR | Ø 190X Ø 180X107 | |
| 1 | Donja prirubnica | 1 | | S235JR | Ø 223X Ø 180X10 | |
| Poz. | Naziv dijela | Kom. | Crtež broj Norma | Materijal | Sirove dimenzije Proizvođač | Masa |
| Broj naziva - code | | Datum | Ime i prezime | | Potpis | |
| Projektirao | | | Mislav Tujmer | | | |
| Razradio | | | Mislav Tujmer | | | |
| Crtao | | | Mislav Tujmer | | | |
| Pregledao | | | | | | |
| Mentor | | | | | | |
| ISO - tolerancije | | Objekt: | | | Objekt broj: | |
| Ø 42H7 | +0,025 0 | | | | R. N. broj: | |
| Napomena: | | | | | Kopija | |
| Materijal: | | | Masa: | ZAVRSNI RAD | | |
| Mjerilo originala | | Naziv: | | | Pozicija: | Format: A3 |
| 1:2 | | Donji dio kucista | | | 1 | Listova: 7 |
| Crtež broj: | | | | | List: 5 | |





| 3 | Gornji dio ležajnog mjesta | | | S235JR | | |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------|------------------|--------------|-----------------------------|------|
| 2 | Gornji lim | | | S235JR | | |
| 1 | Gornja prirubnica | | | S235JR | | |
| Poz. | Naziv dijela | Kom. | Crtež broj Norma | Materijal | Sirove dimenzije Proizvođač | Masa |
| Broj naziva - code | | Datum | Ime i prezime | Potpis | | |
| Projektirao | | | Mislav Tujmer | | | |
| Razradio | | | Mislav Tujmer | | | |
| Crtao | | | Mislav Tujmer | | | |
| Pregledao | | | | | | |
| Mentor | | dr. sc. Dragan Zezelj | | | | |
| ISO - tolerancije | | Objekt: | | Objekt broj: | | |
| Ø 42H7 | +0,025 0 | | | R. N. broj: | | |
| Napomena: | | | | Kopija | | |
| Materijal: | | | Masa: | ZAVRSNI RAD | | |
| Mjerilo originala | | Naziv: | | Pozicija: | Format: A3 | |
| | | Gornji dio kucista | | | Listova: 7 | |
| Crtež broj: MT-2018-6 | | | | List: 6 | | |



| 24 | Vijak M3X0.5 - 10 | | | | | | | | |
|--------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------|------------------|---------|------------|--|--|
| 23 | Zastita ventilatora | 1 | | | | | | | |
| 22 | Lezaj BB20-KK | 1 | | | | | | | |
| 21 | Vijak M8x1 - 20 | | | | | | | | |
| 20 | Matica M 8X1 | | | | | | | | |
| 19 | Vijak M8X1 - 16 | | | | | | | | |
| 18 | Vijak M3X0.5 | | | | | | | | |
| 17 | Poklopac | 1 | | | | | | | |
| 16 | Gornji dio lezajnog mjesta | 1 | | | | | | | |
| 15 | Lezajno mjesto | 1 | | | | | | | |
| 14 | Lezaj 6202-2RSL | 1 | | | | | | | |
| 13 | Gornji dio kucista | 1 | | | | | | | |
| 12 | Gornji zupcanik | 1 | | | | | | | |
| 11 | Ventilator | 1 | | | | | | | |
| 10 | Uskocnik A19 | 1 | | | | | | | |
| 9 | Generator | 1 | | | | | | | |
| 8 | Pero 3 | 1 | | | | | | | |
| 7 | Pero 2 | 1 | | | | | | | |
| 6 | Lezaj W 63806-2RZ | 1 | | | | | | | |
| 5 | Uskocnik A15 | 1 | | | | | | | |
| 4 | Pogonski zupcanik | 3 | | | | | | | |
| 3 | Vratilo | 1 | | | | | | | |
| 2 | Pero 1 | 1 | | | | | | | |
| 1 | Donji dio kucista | | | | | | | | |
| | | | MT-2018-1 | S235JR | Ø248X141 | 0.32 kg | | | |
| Poz. | Naziv dijela | Kom. | Crtez broj | Materijal | Sirove dimenzije | Masa | | | |
| Broj naziva - code | | Datum | Ime i prezime | Potpis | | | | | |
| Projektirao | | Mislav Tujmer | | | | | | | |
| Razradio | | Mislav Tujmer | | | | | | | |
| Crtao | | Mislav Tujmer | | | | | | | |
| Pregledao | | Mislav Tujmer | | | | | | | |
| Voditelj radia | | prof. dr. sc. Dragan Zezelj | | | | | | | |
| ISO - tolerancije | | Objekt: | Ergometar varijabilnog otpora | Objekt broj: | | | | | |
| Ø15H7/k6 | +0.017 -0.012 | Napomena: | | R. N. broj: | | | | | |
| Ø42H7/k6 | +0.023 -0.018 | Materijal: | | Masa: 9.8 kg | ZAVRSNI RAD | Kopija | | | |
| Ø19H7/k6 | +0.019 -0.015 | Naziv: | | SKLOP | Pozicija: | 1 | Format: A1 | | |
| Ø47H7/k6 | +0.023 -0.018 | Mjerilo originala: | | 1:2 | Crtez broj: | List: 1 | | | |
| 6P9/c8 | +0.076 +0.028 | Crtez broj: | | | | | | | |
| 5P9/c8 | +0.076 +0.028 | | | | | | | | |