

VIŠJA STROKOVNA ŠOLA ACADEMIA

MARIBOR

**KONSTRUKCIJSKA ZASNOVA Z IZRAČUNI IN
OPTIMIZACIJA CNC OBDELAVE OHIŠJA
REDUKTORJA V LADJEDELNIŠTVU**

Kandidat: Mirhad Pedljić

Vrsta študija: študent izrednega študija

Študijski program: Strojništvo

Mentor – predavatelj: Dragan Gogić, mag. inž. metal. in mater.

Mentor v podjetju: Robert Fašnik, dipl. inž. stroj.

Lektorica: Jasmina Vajda Vrhunec, prof. slov.

Maribor, 2025

IZJAVA O AVTORSTVU DIPLOMSKEGA DELA

Podpisani Mirhad Pedljić sem avtor diplomskega dela z naslovom Konstrukcijska zasnova z izračuni in optimizacija CNC obdelave ohišja reduktorja v ladjedelništvu, ki sem ga napisal pod mentorstvom Dragana Gogića, mag. inž. metal. in mater.

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- je predloženo delo izključno rezultat mojega dela,
- sem poskrbel, da so dela in mnenja drugih avtorjev, ki jih uporabljam v predloženi nalogi, navedena oz. citirana skladno s pravili Višje strokovne šole Academia Maribor,
- se zavedam, da je plagiatorstvo – predstavljanje tujih del oz. misli kot moje lastne – kaznivo po Zakonu o avtorski in sorodnih pravicah (Ur. l. RS 16/07 – uradno prečiščeno besedilo, 68/08, 110/2013 in 56/2015) (v nadaljevanju ZASP), prekršek pa podleže tudi ukrepom Višje strokovne šole Academia Maribor skladno z njenimi pravili,
- skladno z 32.a členom ZASP dovoljujem Višji strokovni šoli Academia Maribor objavo diplomskega dela na spletnem portalu šole.

Maribor, junij 2025

Podpis:

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju Draganu Gogiću, mag. inž. metal. in mater., za vso pomoč in nasvete v času najinega sodelovanja ter za vse, kar je naredil zame. Njegova podpora, strokovnost in potrpežljivost so zame neprecenljive. Hvala, da je vedno verjel vame in me usmerjal, ko sem potreboval nasvet. Njegov prispevek k moji rasti bo trajal še dolgo po tem, ko bo njegovo mentorstvo zaključeno. Hvaležen sem mu za vse, kar sem se naučil od njega, in sem prepričan, da bom to znanje uporabil v prihodnosti.

Zahvaljujem se podjetju Mega Metal, d. o. o., in direktorju Emirju Osmanoviću, ki mi je omogočil ta študij ter me podpiral pri osebnem razvoju v podjetju in tudi pri izobrazbi. Seveda sem zelo hvaležen tudi podjetju, ki mi je dovolilo uporabo virov za boljšo vizualno prezentacijo in razumevanje postopka izdelave reduktorja.

POVZETEK

V diplomskem delu so obravnavani konstrukcijska zasnova, izračun in optimizacija CNC-obdelave ohišja reduktorja in njegovih sestavnih delov. Reduktorji so ključni elementi v prenosu moči med glavnimi stroji in propulzijskimi sistemi ladij. Poseben poudarek je namenjen razvoju ohišja in notranjih sestavnih delov, ki morajo zagotavljati visoko trdnost, zanesljivost in odpornost proti koroziji. Hkrati pa morajo ohranjati minimalno maso in omogočati ekonomično proizvodnjo ter lažjo eksploatacijo izdelka.

V okviru diplomskega dela so izvedeni ključni konstrukcijski izračuni, ki vključujejo določitev mehanskih lastnosti materiala, analizo obremenitev in določitev potrebnih dimenzij reduktorja. Pri tem so uporabljeni sodobni programski paketi za modeliranje (Solidworks in AutoCad). Poleg konstrukcije je velik poudarek na optimizaciji procesa CNC-obdelave. Proučene so strategije obdelave, izbira ustreznih orodij in nastavitev stroja, kar omogoča krajši čas obdelave, zmanjšanje stroškov in izboljšanje kakovosti površine. Pri optimizaciji se upoštevajo posebnosti materiala ohišja, kot so trdota, obrabna odpornost in možnost varjenja. Rezultati dela prikazujejo, kako z optimiziranim pristopom k načrtovanju in obdelavi doseči tehnično dovršeno, stroškovno učinkovito in trajno rešitev reduktorja, prilagojeno specifičnim zahtevam ladjedelnštva. Zaključki dela so uporabni kot smernice za nadaljnji razvoj izdelkov in izboljšanje proizvodnih procesov. Analizirani so različni materiali, ki se uporabljajo pri izdelavi ohišij reduktorjev v ladjedelnštvu, ob upoštevanju dejavnikov, kot so trdnost, odpornost proti koroziji in obdelovalnost. Prikazana je primerjava materialov z vidika njihove ekonomičnosti in uporabnosti v industrijskih aplikacijah. Obdelava ohišja reduktorja zahteva uporabo specifičnih orodij in orodij za natančno rezanje in oblikovanje.

V tem delu so proučeni različni tipi rezalnih orodij in njihova optimizacija glede na specifične zahteve obdelave, kot so vrsta materiala, oblika in velikost ohišja. Raziskani so različni obdelovalni postopki, vključno z rezanjem, vrtanjem, brušenjem in obdelavo površin, ter tudi, kako optimizirati te postopke z uporabo sodobnih CNC-tehnologij. Predstavljena je uporaba različnih strategij obdelave, kot so progresivno rezanje, optimizacija poti orodja in zmanjšanje časa obdelave z večjo avtomatizacijo in računalniškim planiranjem.

Ključne besede: *optimizacija, natančnost, izboljšava, prihranek.*

ABSTRACT

Structural design with calculations and optimization of CNC machining of gearbox housing in shipbuilding

This thesis addresses the design, calculation, and optimization of CNC machining for the gearbox housing and its components. Gearboxes are key elements in the power transmission between main engines and propulsion systems in ships. Special attention is given to the development of the housing and its internal components, which must ensure high strength, reliability, and resistance to corrosion, while also maintaining minimal weight, enabling cost-effective production, and facilitating easier product operation.

The thesis includes key design calculations, such as determining the mechanical properties of materials, load analysis, and the determination of required gearbox dimensions. Modern software packages for modeling, such as SolidWorks and AutoCAD, are used for this purpose. In addition to the design, significant emphasis is placed on the optimization of the CNC machining process. Various machining strategies, tool selection, and machine settings are explored, aiming to reduce machining time, lower costs, and improve surface quality. Optimization takes into account the specific characteristics of the housing material, such as hardness, wear resistance, and weldability. The results of this work demonstrate how an optimized approach to design and machining can achieve a technically advanced, cost-effective, and durable gearbox solution tailored to the specific demands of the shipbuilding industry. The conclusions provide guidelines for further product development and improvements in manufacturing processes. Various materials used in the production of gearbox housings in shipbuilding are analyzed, considering factors such as strength, corrosion resistance, and machinability. A comparison of materials is presented, focusing on their economic feasibility and suitability for industrial applications. Machining the gearbox housing requires the use of specific tools for precise cutting and shaping.

This section investigates different types of cutting tools and their optimization based on specific machining requirements, such as material type, shape, and size of the housing. Different machining processes, including cutting, drilling, grinding, and surface finishing, are examined, along with how to optimize these processes using modern CNC technologies. The use of various machining strategies, such as progressive cutting, tool path optimization, and reducing machining time through increased automation and computer-aided planning, is also presented.

Keywords: *optimization, precision, improvement, cost savings.*

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	12
1.1 OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA	12
1.2 Namen, cilj in osnovne trditve.....	13
1.3 Predpostavke in omejitve	14
1.4 Uporabljene raziskovalne metode	15
2 TEORETIČNE OSNOVE REDUKTORJEV	16
2.1 Osnovne značilnosti reduktorjev	16
2.2 Vrste in klasifikacija reduktorjev	17
2.3 Materijali za izdelavo reduktorjev	21
2.4 Standardi in regulative za reduktorje.....	22
3 ANALIZA OBREMENITEV IN ZAHTEV	25
3.1 Analiza sil in momentov v sistemu.....	25
3.2 Delovni pogoji in zahteve za reduktorje v ladjedelništvu	27
4 IZRAČUN IN KONSTRUKCIJA REDUKTORJA.....	31
4.1 Izbira predstavnega razmerja.....	31
4.2 Izračun enostopinskega reduktorja	32
4.3 Izračun modula zobnikov Z1 in Z2	33
4.4 Izračun gredi 1	37
4.5 Dimenzioniranje gredi 1	40
4.6 Izračun gredi 2	42
4.7 Dimenzioniranje gredi 2	44
4.8 Izbira in izračun ležaja za gred 1	46
4.9 Izbira in izračun ležaja za gred 2	49
4.10 Izbira pogonskega elektromotorja	51
5 KONSTRUKCIJSKA ZASNOVA REDUKTORJA.....	52
5.1 CAD-modeliranje in tehnične risbe.....	52
5.2 Izbira materiala za posamezne komponente.....	61
5.3 Rešitev za zmanjšanje hrupa in vibracij	66
5.4 Rešitve za mazanje in tesnjenje	68
5.5 Mehanska obdelava na CNC-stroji.....	70
5.6 Optimizacija postopka mehanske obdelave.....	88

5.7 Merilni protokol.....	92
6 VZDRŽEVANJE IN ŽIVLJENSKA DOBA.....	102
6.1 Strategija vzdrževanja reduktorjev	102
6.2. Ocenjevanje življenjske dobe in analiza obrabe.....	105
6.3 Predlogi za podaljšanje življenjske dobe.....	107
6.4 Predlogi za izboljšanje vzdrževanja	108
7 EKONOMSKA UPRAVIČENOST PROJEKTA	111
7.1 Vgradnja reduktorja in preiskus delovanja.....	114
8 TRAJNOST.....	115
9 SKLEP	116
10 LITERATURA	118

KAZALO TABEL

<i>Tabela 1: Izbira ležaja.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabela 2: Izbira stožčastega ležaja</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 3: Izbira pogonskega elektromotorja</i>	<i>51</i>
<i>Tabela 4: Lastnosti materiala – legirano jeklo 20 Cr.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 5: Lastnosti materiala – jeklo 38NiCrMo5</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 6: Lastnosti materiala – jeklo 42CrMo</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 7: Merilni protokol reduktorja</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 8: Začetna ponudba.....</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 9: Ugotavljanje verodostojnosti ponudbe in izpada podanih ur.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 10: Končna listna in rezultati po končnem procesu optimizacije postopka</i>	<i>113</i>

1 UVOD

Razvoj sodobnih reduktorjev zahteva celosten pristop k načrtovanju, ki vključuje mehanske izračune, konstrukcijsko zasnovo in optimizacijo proizvodnih procesov. V tem delu bom predstavil postopek konstrukcijske zasnove reduktorja, ki vključuje analizo obremenitev in ključnih funkcijskih zahtev, izračune za določitev optimalne geometrije in materialov ter optimizacijo CNC-obdelave.

1.1 OPIS PODROČJA IN OPREDELITEV PROBLEMA

Področje

Reduktorji so ključni mehanski elementi, ki se uporabljajo za prenos in prilagoditev vrtilnega momenta ter hitrosti v različnih industrijskih aplikacijah. Sestavljeni so iz več komponent, kot so: gredi, ležaji, zobniki, male osovine in ohišje. Ena od najpomembnejših komponent reduktorja je njegovo ohišje, ki zagotavlja mehansko zaščito notranjih komponent, homogeno notranjost reduktorja in strokovno stabilnost celotnega sistema.

Opredelitev problema

Tradicionalni pristopi k izdelavi reduktorja in njegovih sestavnih komponent vključujejo litje, ki mi sledi mehanska obdelava. Sodobne proizvodne tehnologije, kot je CNC-obdelava, omogočajo izdelavo kompleksnejših geometrij z višjo natančnostjo, vendar prinašajo tudi izzive, kot so dolgi čas obdelave, visoki stroški in zahtevno načrtovanje obdelovalnih strategij. Hkrati je optimizacija teh procesov, tako kot samo načrtovanje in konstrukcijske rešitve, vse bolj pomembna zaradi naraščajočega pritiska na zmanjševanje proizvodnih stroškov, časa in vplivov na okolje.

V kontekstu konstrukcijske zasnove reduktorja je pogosto problem doseči optimalno ravnovesje med naslednjimi dejavniki:

Strukturna stabilnost in trdost

Reduktor in njegovo ohišje morata prenašati dinamične in statične obremenitve, ampak pri tem ne sme priti do deformacij ali poškodb.

Tehnološka izvedljivost

Kompleksna geometrija reduktorja lahko oteži proces CNC-obdelave, poveča stroške in čas izdelave.

Stroškovna učinkovitost

Materialni in proizvodni stroški morajo ostati v sprejemljivih mejah, da je izdelek konkurenčen na trgu.

Glavni cilj raziskave

Glavni cilj raziskave je razviti reduktor in njegovo konstrukcijsko zasnovo, ki bo optimalno združevala funkcionalne zahteve z vidika trdnosti in natančnosti, hkrati pa bo temeljila na optimizirani CNC-obdelavi.

1.2 Namen, cilj in osnovne trditve

Namen:

- razviti konstrukcijsko zasnovo in opraviti pravilne izračune reduktorja v ladjedelništvu;
- izboljšati mehanske lastnosti in znižati proizvodne stroške;
- s pomočjo optimizacije CNC-obdelave izboljšati učinkovitost proizvodnega procesa.

Cilji:

- izdelati konstrukcijsko zasnovo ohišja in sestavnih delov reduktorja, ki ustreza zahtevam ladjedelniške industrije, kot so odpornost proti koroziji, mehanska robustnost in nizka masa;
- izvesti podrobne in natančne tehnične izračune za določitev ključnih dimenzij, materialov in proizvodnih toleranc;
- optimizirati CNC-proces obdelave, da se zmanjša čas obdelave, poveča natančnost in zmanjša poraba materiala;
- proučiti možnosti za implementacijo sodobnih pristopov, kot so računalniške simulacije in generativno oblikovanje, za izboljšanje učinkovitosti.

Osnovne trditve:

- **H1:** Ustrezno izbrani materiali in pravilno dimenzioniranje komponent reduktorja bodo zmanjšali obrabo in podaljšali življenjsko dobo reduktorja.
- **H2:** Optimizacija prestavnega razmerja in uporaba ustreznih zobnikov bosta izboljšali učinkovitost prenosa moči v ladji.
- **H3:** Vgradnja primerne maziva in primerna izbira tesnilnih elementov bosta bistveno zmanjšali trenje ter posledično hrup in vibracije v reduktorju.
- **H4:** Trajnost v zasnovi reduktorjev v ladjedelništvu prispeva k večji učinkovitosti, daljši življenjski dobi in manjšemu okoljskemu vplivu

1.3 Predpostavke in omejitve

- Predvideva se uporaba materialov, ki so primerni za morsko okolje, kot so aluminijeve zlitine, titan, nerjavno jeklo ali drugi proti koroziji odporni elementi.
- Obratovalni pogoji: reduktor bo deloval v pogojih, značilnih za ladjedelniško industrijo, kot so nihanje temperature, visoke vlažnosti in izpostavljenost soli.
- CNC-stroji: predvideva se uporaba sodobnih obdelovalnih CNC-strojov, ki omogočajo visoko natančnost obdelave (do 0,01 mm) in podpirajo optimizacijo poti orodja.
- Geometrija ohišja: konstrukcijska zasnova bo predvidevala standardno pravokotno ali cilindrično obliko ohišja z dodatnimi ojačitvami za povečanje mehanskih lastnosti.

Omejitve

- Dimenzijske omejitve: velikost ohišja je omejena z dimenzijami CNC-stroja in zahtevami za namestitev v ladijski pogonski sistem.
- Časovne omejitve: čas razvoja zasnove, simulacij in izdelave prototipa je omejen zaradi potreb industrije po hitrem razvoju.
- Standardi in regulative: oblikovanje mora ustrezati mednarodnim standardom, kot so ISO 9001 za kakovost in pomorske specifikacije.

1.4 Uporabljene raziskovalne metode

- Analiza literature: pregled znanstvenih člankov, knjig in literarnih virov za pridobivanje teoretičnega znanja o konstrukcijskih rešitvah.
- Inženirska metoda: posvetovanje z inženirji in strokovnjaki iz ladjedelništva in CNC-obdelave za validacijo rezultatov in izboljšanje predlaganih rešitev.

2 TEORETIČNE OSNOVE REDUKTORJEV

Reduktorji so strojni elementi, ki zmanjšujejo hitrost vrtenja pogonskega stroja in hkrati povečujejo navor. Običajno so sestavljeni iz zobnikov ali drugih prenosnih elementov in se uporabljajo v različnih industrijskih aplikacijah, kjer je treba prilagoditi hitrost in moč izhodne gredi glede na vhodni pogon. Na sliki 1 lahko vidimo prikaz enostopenjskega reduktorja.



Slika 1: Enostopenjski reduktor

Vir: Lastni vir

2.1 Osnovne značilnosti reduktorjev

Reduktorji, uporabljeni v ladjedelništvu, imajo specifične značilnosti, morajo se prilagajati zahtevam morskega okolja in potrebam ladijskega pogona.

Visoka robustnost in zanesljivost

Reduktorji morajo biti zasnovani za dolgotrajno delovanje v zahtevnih razmerah, kot so visoke obremenitve, vibracije in korozivno morsko okolje.

Velika prestavna razmerja

Ladijski reduktor omogoča prilagoditev hitrosti motorja in hitrost propelerja, ki običajno deluje pri nižjih vrtljaji za zagotavljanje največje učinkovitosti.

Večstopenjska zasnova

Pogosto ima eno ali več stopenj prenosa, odvisno od potrebe moči in velikosti ladje.

Večstopenjski reduktor omogoča boljše prilagajanje delovnim pogojem.

Moč in velikost

Zasnovani so za prenašanje velikih moči, običajno v MW-območju.

Velikost reduktorja je prilagojena dimenzijam ladijskega pogona in razpoložljivemu prostoru.

2.2 Vrste in klasifikacija reduktorjev

Glede na vrsto zobniškega prenosa jih delimo na:

- **Cilindrični reduktorji**

Imajo ravne zobnike, poševne zobnike ali zobnike s poševnimi zobmi (primer evolventni zobniki).

Prednosti: prosta izdelava, visoka učinkovitost.

Uporaba: splošna industrija, ladijski pogoni.

Na sliki 2 je prikazan cilindrični reduktor.



Slika 2: Cilindrični reduktor

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Stožčasti reduktorji**

Zobniki so stožčaste oblike in omogočajo prenos moči pod kotom običajno 90°.

Prednosti: prilagodljivost glede smeri prenosa.

Uporaba: ladijski krmni sistemi, menjalniki za vgradnjo pod kotom.

Na sliki 3 je prikazan stožčasti reduktor.



Slika 3: Stožčasti reduktor s Siemensovim elektromotorjem

Vir: Lastni vir

- **Polžasti reduktorji**

Vključujejo polžni zobniški prenos, ki omogoča velika prestavna razmerja in kompaktno zasnovo.

Prednosti: tih in gladek prenos.

Uporaba: dvigala, vitli, težke mašine za površinske kope, premogovnik.

Na sliki 4 je prikazan polžasti reduktor.



Slika 4: Polžasti reduktor v preseku

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Planetni reduktorji**

Sestavljeni so iz sončnega zobnika, planetnih zobnikov in notranjega obroča.

Prednosti: visoko prestavno razmerje, kompaktna zasnova, visoka zmogljivost.

Na sliki 5 je prikazan planetni reduktor.



Slika 5: Planetni reduktor

Vir: Lastni vir

GLEDE NA ŠTEVILO PRENOSNIH STOPENJ:

- **Enostopenjski reduktorji**

Prenos moči poteka prek enega para zobnikov (slika 6).

Prednosti: enostavnost, nizki stroški.

Uporaba: enostavnejši sistemi, področja malo manjših obremenitev.



Slika 6: Enostopenjski reduktor v preseku

Vir: Lastni vir

- **Večstopenjski reduktorji**

Vključujejo več parov zobnikov za doseganje visokega prestavnega razmerja (slika 7).

Prednosti: omogočajo velike redukcije hitrosti in prenašanje večjih sil.

Uporaba: ladijski motorji z visokimi vrtljaji.



Slika 7: Večstopenjski reduktor

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Glede na konfiguracijo osi**

Vzporedne, pravokotne in kombinirane osi. Glede na konfiguracijo (slika 8) se lahko uporabljajo v širšem spektru strojništva, kot so: ladijski propulzijski sistemi z visoko kompleksnostjo, pogoni s prostimi omejitvami in pogonski sistemi v transportu in navitki (trakasti transporterji v premogovniku).



Slika 8: Različne konfiguracijske osi

Vir: Lastni vir

2.3 Materiali za izdelavo reduktorjev

Izdelava reduktorjev zahteva uporabo različnih materialov, ki so primerni za prenos sile in omogočajo dolgo življenjsko dobo ter učinkovito delovanje z minimalno obrabo. Materiali, ki se običajno uporabljajo za izdelavo reduktorjev, vključujejo:

- **Jeklo**

Jeklo je najpogostejše uporabljen material v izdelavi reduktorjev, saj ponuja odlično kombinacijo trdnosti, trpežnosti in odpornosti proti obrabi. Posebne vrste jekla so:

- **Legirano jeklo** (npr. 20Cr, 40Cr, 18CrNiMo7-6): to jeklo vsebuje legirne elemente, ki povečujejo trdnost in odpornost proti utrujenosti materiala, kar je še posebej pomembno pri obremenjenih reduktorjih.
- **Nerjaveče jeklo:** uporablja se v okolju, kjer so prisotni agresivni dejavniki (npr. v živilski industriji ali pri delovanju v korozivnih razmerah).
- **Ogljikovo jeklo:** uporablja se za manj obremenjene reduktorje, saj je poceni in lahko obdelovano, vendar ima slabšo odpornost proti obrabi.

- **Litje kovin**

Za posamezne komponente, kot so ohišja reduktorjev, se lahko uporabljajo materiali, pridobljeni z litjem. Prednosti vključujejo večjo fleksibilnost v oblikovanju in izdelavi večjih delov, kot so:

- **Lito železo.** To je priljubljena izbira za izdelavo ohišij, ker ponuja dobro odpornost proti obrabi, vendar ni tako trdno kot jeklo.
- **Aluminij in aluminijeve zlitine.** Uporabljajo se pri lažjih reduktorjih, kjer sta pomembni lažja teža in dobra toplotna prevodnost. Aluminijasti reduktorji so pogosti v aplikacijah, kjer je pomembna teža, na primer v avtomobilskih industrijah ali manjših električnih motorjih.
- **Bron in druge zlitine**

Bron. Ponuja dobro odpornost proti obrabi in se uporablja za delovne dele, kot so zobniki ali ležaji v reduktorjih. Bron ima tudi dober mazalni učinek in se pogosto uporablja v aplikacijah, kjer je potrebna stabilnost pri visokih temperaturah.

- **Medenina in druge zlitine.** Te se pogosto uporabljajo za manj obremenjene dele ali v specifičnih industrijah, kot je mornarica, kjer so potrebni materiali, odporni proti koroziji.

- **Plastika in kompoziti**

V nekaterih lahkih aplikacijah, kjer ni pričakovane visoke obremenitve ali velike hitrosti, se lahko uporabljajo plastika ali kompozitni materiali. Te komponente so lažje in cenejše za proizvodnjo ter se uporabljajo za manj zahtevne naloge.

- **Specifični materiali za zobnike**

- Tempered Steel (kaluženo jeklo): zobniki so pogosto kaljeni, da bi dosegli visoko trdnost in odpornost proti obrabi. Kaljeno jeklo je ključnega pomena za zobnike, saj omogoča dolgo življenjsko dobo pri visokih obremenitvah;
- nitrirano jeklo: proces nitiranja poveča trdoto površine zobnikov, kar povečuje odpornost proti obrabi in izboljšuje delovanje pri velikih obremenitvah.

- **Maziva in premazi**

Maziva (olje, maščobe) so prav tako ključnega pomena za delovanje reduktorjev. Materiali za mazanje zmanjšajo trenje med premikajočimi se deli, kar preprečuje pregrevanje in povečanje obrabe. Uporabljajo se lahko tudi posebni premazi za zmanjšanje trenja in povečanje vzdržljivosti. Izbira materiala za izdelavo reduktorjev je odvisna od obremenitev, hitrosti vrtenja, okolja (temperature, korozija) in potrebnih lastnosti, kot so trdota, odpornost proti obrabi in trajnost. Jeklo in zlitine so najpogostejše uporabljeni materiali za kritične komponente, medtem ko se za manj obremenjene dele lahko uporabita tudi plastika in aluminij.

(Jurić, 2001)

2.4 Standardi in regulative za reduktorje

V ladjedelništvu se pri projektiranju, proizvodnji in uporabi reduktorjev (tj. mehanskih prenosnikov, ki zmanjšujejo hitrost vrtenja) upoštevajo različni standardi in regulative, ki zagotavljajo varnost, zanesljivost in skladnost z industrijskimi zahtevami. Nekateri najpomembnejši standardi in regulative, ki se uporabljajo pri reduktorjih v ladjedelništvu, vključujejo:

- **ISO-standardi (Mednarodna organizacija za standardizacijo)**

ISO 9001. Sistem vodenja kakovosti. Pri proizvodnji reduktorjev v ladjedelništvu je pomembno zagotavljati visoko kakovost izdelkov, zato se pogosto upošteva ta standard, ki zahteva dosledno obvladovanje kakovosti in sledljivost procesov.

ISO 6336. Standard za izračun obremenitev zobnikov in njihovo zasnov. Ta standard se uporablja za določitev dimenzij, materialov in zasnov zobnikov v reduktorjih.

ISO 14120. Standard za zaščito mehanskih naprav, vključno z varnostnimi zaščitami, ki se nanaša na zaščito pred poškodbami pri uporabi reduktorjev.

- **EN-standardi (evropski standardi)**

EN 12001. Ta evropski standard opredeljuje zahteve za mehanske prenosnike in reduktorje, ki se uporabljajo v različnih industrijskih panogah, vključno z ladjedelništvom.

EN 60034. Standard za električne motorje, ki se pogosto uporabljajo v kombinaciji z reduktorji v ladijskih pogonskih sistemih. Ta standard vključuje zahteve za motorje z visoko učinkovitostjo in varnostjo.

EN 50347. Določa zahteve za varnost in zaščito prenosnih mehanizmov, vključno z reduktorji, ki so lahko del večjih mehaničnih sklopov v ladjedelniških aplikacijah.

Lloyd's Register (LR) in ABS (American Bureau of Shipping)

Lloyd's Register (LR) in American Bureau of Shipping (ABS) sta dve največji organizaciji za certificiranje in nadzor ladijskega inženiringa. Pri razvoju in certificiranju reduktorjev v ladjedelništvu pogosto upoštevajo njuna pravila, ki se nanašajo na zasnov, testiranje in izvedbo mehanskih prenosnikov.

LR Rules and Regulations: določajo tehnične zahteve za ladijske pogonske sisteme, vključno z reduktorji in njihovimi komponentami. To vključuje preverjanje materialov, zasnov in življenjske dobe ter preverjanje obratovalnih pogojev.

DNV GL (Det Norske Veritas - Germanischer Lloyd)

DNV GL je eden izmed največjih svetovnih ponudnikov storitev v ladjedelništvu, ki vključuje smernice za zasnov in testiranje reduktorjev, vključno s kriteriji za učinkovitost, zanesljivost in varnost v težkih pomorskih pogojih.

Smernice DNV GL vključujejo tudi priporočila za izbiro materialov in zaščito pred korozijo, kar je še posebej pomembno v morskem okolju.

MARPOL (Mednarodna konvencija za preprečevanje onesnaževanja z ladij)

Čeprav se MARPOL osredotoča predvsem na zmanjšanje onesnaževanja, ima lahko vpliv tudi na zasnovo sistemov na ladjah, vključno z mehaničnimi sistemi, kot so reduktorji, ki so del propulzijskih sistemov ladij. Učinkovita in zanesljiva uporaba reduktorjev lahko pomaga pri zmanjševanju emisij in povečanju energetske učinkovitosti.

Inštitut za pomorske tehnike (SMI)

SMI pogosto izdaja tehnične smernice in priporočila za ladjedelniške tehnologije, vključno z mehaničnimi sistemi, kot so reduktorji. To vključuje smernice za zagotavljanje varnosti, zmogljivosti in dolge življenjske dobe komponent.

Zakonodaja o varnosti pri delu

Zakonodaja, kot so smernice Evropske unije in nacionalni predpisi za varnost pri delu (npr. v Sloveniji Zakon o varnosti pri delu), ureja varnostno rabo mehaničnih prenosnikov, kot so reduktorji, v ladjedelništvu. To vključuje obveznost ustreznih varnostnih označb in zaščitnih ukrepov pri uporabi teh naprav na ladjah.

Pravila za energetske učinkovitost

V zadnjih letih so bili sprejeti tudi predpisi, ki se nanašajo na energetske učinkovitost pomorskih plovil. Ti predpisi vključujejo zahteve za optimizacijo pogonskih sistemov, vključno z uporabo reduktorjev, da bi zmanjšali porabo goriva in emisije CO₂. (Sloveinije, 2019)

3 ANALIZA OBREMENITEV IN ZAHTEV

3.1 Analiza sil in momentov v sistemu

Analiza obremenitev in zahtev, ki se pojavljajo pri uporabi reduktorjev v ladjedelništvu, je ključnega pomena za zagotavljanje njihove zanesljivosti, varnosti in dolgoživosti. Ladijski reduktorji, ki se uporabljajo v pogonskih sistemih ladij, morajo biti zasnovani tako, da prenesejo različne vrste obremenitev in delujejo v zahtevnem okolju. Obremenitve in tehnične zahteve, ki jih je treba upoštevati pri analizi obremenitev za reduktorje v ladjedelništvu:

Obremenitve pri pogonskem prenosu

Reduktorji v ladjah delujejo v mehanizmih, ki prenašajo moč iz glavnega motorja na propulzijski sistem (npr. propeler). V tem kontekstu so glavne obremenitve naslednje:

- **Vrtljiva obremenitev (torzijska obremenitev).** Reduktorji morajo prenašati visoke torzijske sile, ki nastanejo zaradi vrtenja motorja, ki je povezan s propelerjem. Obremenitev je odvisna od moči motorja, hitrosti vrtenja in prenosa navora.
- **Obremenitve pri zagonu in ustavljanju.** Med zagonom in ustavljanjem pogonskega sistema so lahko prisotne nenadne in močne torzijske obremenitve. Ta dinamika obremenitev se mora upoštevati pri analizi materialov in dimenzioniranju reduktorjev.
- **Obremenitve zaradi sprememb hitrosti.** Pri ladjah, ki imajo spremenljivo hitrost (npr. zaradi spreminjanja hitrosti motorja ali prestavljanja), morajo biti reduktorji zasnovani tako, da prenašajo spremembe obremenitev in zmanjšajo vibracije.
- **Obremenitve zaradi zavornih sil.** Zavorni sistemi ladij vplivajo na reduktorje, saj pri zaviranju nastajajo močne obremenitve na pogonskem sistemu, vključno z zmanjšanjem hitrosti vrtenja propelerja.
- **Dinamične obremenitve.** Pri hitrem zaviranju se pojavljajo nenadne spremembe hitrosti vrtenja, ki vplivajo na strukturo reduktorja. To lahko povzroči udarce in vibracije, ki povečajo obremenitve na zobnikih in drugih mehanskih komponentah.
- **Obremenitve zaradi dolgotrajnega upora.** Pri počasnem zaviranju skozi visoke upore se na reduktorju pojavijo dolgotrajne statične obremenitve, ki lahko vplivajo na življenjsko dobo komponent, kot so ležaji in zobniki.

- **Obremenitve zaradi vibracij in dinamičnih učinkov**

Pogonski sistemi ladij, vključno z reduktorji, so pogosto izpostavljeni različnim vibracijam, ki so lahko posledica različnih dejavnikov:

- **Vibracije pri neurejenih delovnih pogojih** Na ladjah so lahko prisotni neurejeni delovni pogoji, kot so spremembe hitrosti, močno nalaganje ali nestabilnost ladje, kar lahko povzroči nepričakovane dinamične obremenitve.
- **Vibracije zaradi nezadostnega uravnoteženja.** Neuravnoteženost propelerja ali motnje pri delovanju motorja lahko povzročijo dodatne obremenitve na reduktorju, kar vodi v povečano obrabo in zmanjšano zanesljivost.
- **Kavitation in udarni valovi.** Udarni valovi ali kavitation, ki nastanejo zaradi nenadnih sprememb hitrosti ali obremenitev na propelerju, lahko povzročijo dodatne sile na reduktor.

- **Obremenitve zaradi korozije in oksidacije**

Pogonski sistemi, vključno z reduktorji, so izpostavljeni težkim morskim razmeram, kjer so prisotni slana voda, vlaga in drugi okoljski dejavniki. Korozija in oksidacija lahko povzročita:

- **Korozija materialov.** Materiali, kot so jeklo in kovine, so nagnjeni k koroziji zaradi izpostavljenosti morski vodi, kar lahko oslabi strukturo reduktorja in povzroči neuspeh komponent.
- **Korozijska utrujenost.** Daljša izpostavljenost solni vodi in vlagi lahko povzroči utrujenost materialov, kar vodi v razpoke in okvare v kritičnih delih reduktorja, kot so zobniki in ohišje.
- **Obremenitve zaradi pregrevanja**

Pogonski sistemi ladij delujejo pri visokih obremenitvah in lahko povzročijo pregrevanje reduktorjev, kar vpliva na njihovo delovanje:

- **Visoka temperatura delovanja.** Pri visoki obremenitvi motorjev ali dolgotrajni visoki hitrosti lahko pride do pregrevanja reduktorjev, kar negativno vpliva na mazanje, materialne lastnosti in splošno učinkovitost sistema.
- **Termična širitev in krčenje.** Pri velikih temperaturnih spremembah se materiali lahko širijo ali krčijo, kar vpliva na natančnost delovanja reduktorja. To lahko povzroči povečano obrabo zobnikov in ležajev.

- **Obremenitve zaradi udarcev in nesreč**

Med plovbo lahko pride do različnih udarcev in nenadnih sprememb v obremenitvah, zaradi katerih so lahko izpostavljeni dodatnim napetostim:

- **Udarci ob trkih**

Reduktorji v pogonskih sistemih ladij so lahko izpostavljeni nenadnim udarcem, bodisi pri trkih z drugimi plovili bodisi pri nenadnih spremembah smeri ali hitrosti. Takšni udarci lahko povzročijo težke obremenitve, ki lahko poškodujejo kritične komponente.

- **Padec napetosti ali izpad sistema.** Med težkimi operacijami, kot so nenadne spremembe smeri ali izpadi moči, lahko pride do nenadnih napetosti v sistemu, kar povzroči težke dinamične obremenitve na reduktorju.

- **Zahteve glede varnosti in standardov**

Pri upoštevanju teh obremenitev je treba upoštevati tudi regulative in varnostne zahteve, ki so specifične za ladjedelništvo:

- **Certifikacija in standardi.** Reduktorji morajo biti skladni z mednarodnimi standardi (ISO, DNV GL, ABS, Lloyd's Register) in nacionalnimi predpisi za varnost pri delu, zaščito pred korozijo, zaščito pred okvarami in obvladovanje izrednih situacij.

Zanesljivost in trajnost: reduktorji morajo biti zasnovani tako, da zagotavljajo dolgo življenjsko dobo, visoko zanesljivost in odpornost proti izrednim pogojem delovanja, kar vključuje zaščito pred vibracijami, pregrevanjem in korozijo.

- **Kombinacija obremenitev.** V praksi se lahko vse zgoraj omenjene obremenitve kombinirajo. Na primer med plovbo v slabih vremenskih razmerah, ko je prisotna visoka obremenitev, pa tudi nizka hitrost motorja in visoka vlažnost, so lahko vse obremenitve prisotne sočasno, kar lahko vpliva na obremenitev reduktorja in zahteva posebno pozornost pri zasnovi in analizi.

(Hangzhou Yiding Transmission Machinery Co., 2021)

3.2 Delovni pogoji in zahteve za reduktorje v ladjedelništvu

- **Termični delovni pogoji:** reduktorji delujejo v pogonskih sistemih, kjer se navor in hitrost prilagajata v širokem območju, kar pomeni tudi velike temperaturne spremembe. Temu ustrezne zahteve vključujejo:

- **Visoke temperature.** Pri dolgotrajnem delovanju pri visokih obremenitvah, kot so velike hitrosti plovbe, lahko pride do pregrevanja reduktorja, zlasti v predelih, kjer je mehansko trenje najmočnejše (npr. v zobnikih in ležajih). Delovna temperatura reduktorja mora biti optimizirana, da se preprečijo poškodbe in zmanjša učinkovitost.
- **Učinek temperature širjenja.** Zaradi temperaturnih nihanj se materiali širijo ali krčijo, kar lahko vpliva na natančnost delovanja. To je treba upoštevati pri dimenzioniranju zobnikov, ležajev in drugih sestavnih delov, da se preprečijo nastanek prekomernih napetosti in trenja.
- **Učinkovitost hlajenja.** Ker so reduktorji pogosto izpostavljeni visokim temperaturam, je zagotovitev učinkovitega sistema za hlajenje ključnega pomena. Uporaba maziv, ki so odporna proti visokim temperaturam, in primerno hlajenje (npr. z zrakom ali tekočino) sta ključna za vzdrževanje optimalne temperature delovanja.
- **Kemični in okoljski pogoji.** Reduktorji v ladjedelništvu delujejo v zelo zahtevnem okolju, ki vključuje visoko vlažnost, morsko vodo in druge korozivne dejavnike, ki lahko vplivajo na materialne lastnosti in dolgoživost komponent.
- **Korozija zaradi morske vode.** Reduktorji so nenehno izpostavljeni morski vodi, ki lahko povzroči korozijo kovinskih komponent. Zato je pri zasnovi kritično, da se uporabljajo materiali, ki so odporni proti koroziji, kot so legirane jeklene zlitine ali posebne obdelave površin (npr. galvanizacija ali anodizacija).
- **Učinki soli in vlage.** Slana voda in visoka vlažnost lahko povečata tveganje za oksidacijo in nastanek rje na delih, kot so zobniki, ležaji in ohišja. Zaščita pred vlago je nujna, zato je pogosto priporočljivo uporabljati hermetična ohišja in zaprte sisteme za mazanje.
- **Kemične snovi.** Poleg morske vode lahko reduktorji pridejo v stik tudi z drugimi kemikalijami, kot so goriva, maziva, detergenti in druge snovi, ki lahko vplivajo na sestavo maziv ali materialov, iz katerih so sestavljeni reduktorji.

Zahteve glede mazanja

Mazanje je ključno za zagotovitev gladkega delovanja reduktorjev in podaljšanje življenjske dobe njihovih komponent. Zlasti v ladjedelništvu so zahteve po učinkovitem in zanesljivem mazalnem sistemu naslednje:

- **Visoka kakovost maziv.** Maziva morajo imeti dobro odpornost proti visokim temperaturam in oksidacijo ter zaščito pred korozijo, da se prepreči obraba in poškodbe komponent, kot so zobniki in ležaji.
- **Hermetični sistemi za mazanje.** Reduktorji morajo biti opremljeni z zaprtimi in hermetičnimi sistemi za mazanje, da se prepreči vstop vode ali umazanije, ki bi lahko poškodovala notranje komponente.
- **Redno preverjanje maziv.** Ker so maziva podvržena velikim obremenitvam in temperaturam, je pomembno redno preverjanje njihove kakovosti, da se zagotovi dolgotrajno delovanje sistema brez pregrevanja ali poškodb.
- **Zahteve glede zaščite in varnosti.** Zaradi zahtevnosti delovnih pogojev morajo biti reduktorji zasnovani tako, da zagotavljajo visoko raven varnosti in zanesljivosti v vsakem trenutku delovanja. Med ključnimi varnostnimi zahtevami so:
- **Zaščita pred preobremenitvijo.** Reduktorji morajo biti zasnovani z ustreznimi zaščitnimi mehanizmi, kot so varnostni ventili ali elektronski sistemi za spremljanje preobremenitev, ki preprečujejo škodo na sistemu v primeru nenadnih sprememb v obremenitvah.
- **Enostaven dostop za vzdrževanje.** Zasnova reduktorja mora omogočiti enostaven dostop za redno vzdrževanje, pregledovanje in zamenjavo komponent (npr. ležajev, maziv, zobnikov), kar pripomore k večji zanesljivosti in zmanjšanju časa, ko plovilo ni operativno.
- **Zagotavljanje zaščite pred korozijo.** Reduktorji morajo biti zasnovani z materiali in prevlekami, ki zagotavljajo zaščito pred negativnimi učinki morske vode, kot sta korozija in oksidacija, kar zagotavlja dolgo življenjsko dobo in zanesljivost sistema.
- **Prostorski in oblikovni pogoji.** Reduktorji na ladjah pogosto delujejo v omejenih prostorih, kjer so dimenzije in težnostna omejitev ključni dejavniki pri zasnovi. Za optimizacijo prostora in učinkovitosti:
- **Kompaktna zasnova.** Reduktorji morajo biti zasnovani tako, da so čim bolj kompaktni in lahki, vendar hkrati robustni, saj ladje pogosto nimajo veliko prostora za velikanske in težke naprave.
- **Prilagodljivost za različne tipične konfiguracije.** Zasnova mora omogočati prilagodljivost za različne konfiguracije vrste pogonskih sistemov in ladijskih postavitvev, kot so morska ali rečna plovila ter različne vrste motorjev in propelerjev. Reduktorji v

ladjedelništvu morajo izpolnjevati številne zahteve, ki zagotavljajo njihovo učinkovito in zanesljivo delovanje v zahtevnem pomorskem okolju. Ti vključujejo sposobnost prenosa velikih torzijskih obremenitev, odpornost proti vibracijam, zagotavljanje učinkovitega hlajenja in mazanja ter zaščito pred korozijo in prekomernimi temperaturnimi spremembami. Poleg tega je treba upoštevati varnostne standarde in zagotavljanje enostavnega vzdrževanja, da se podaljša življenjska doba sistema in zagotovi varnost plovila. (Jurić, 2005)

4 IZRAČUN IN KONSTRUKCIJA REDUKTORJA

Kot konstrukter v podjetju Mega Metal, d. o. o., sem dobil nalogo, da konstruiram reduktor, ki pride vgrajen v manjšo ladjo. Namen ladje je prevoz drobnega blaga na kratkih relacijah. Pogoji dela: sladka voda, brez drugih kemičnih dodatkov, zahtevana manjša gabaritna velikost in tiho delovanje.

Glede na zahteve, ki bi jih ladja morala izpolnjevati, sem moral konstruirati enostopenjski reduktor s cilindričnimi zobniki s poševnimi zobmi.

4.1 Izbira predstavnega razmerja

Glede na osnovne vhodne podatke in skupno uskladitev z naročnikom smo definirali osnovne podatke:

- Vhodna moč: $P = 36$ (kW)
- Število obratov elektromotorja: $n = 980$ (min⁻¹)
- Število zob pogonskega zobnika: $Z_1 = 24$
- Prenosno razmerje: $I = 2$
- Vrsta pogona: enakomeren
- Čas vključevanja elektromotorja: -1 , (max2)
- Vrsta delovnega stroja: z enakomernimi udari ($KA = 1,25$)
- Moment inercije obrtnih mas delovnega stroja, spojke S2 in zobnika 2 z gredjo II:

Treba je bilo upoštevati, da se pri nastavljeni moči na pogonski gredi reduktorja (pri čemer lahko zavzamejo vrednost moči 20–50 % ali več, kar je predvsem odvisno od tipa delovnega stroja).

- Material zobnika: 38NiCrMo5
- Kot naklona stranske črte zoba $\beta = 10^\circ$
- Koeficient premikanja profila $x = 0$
- Material gredi 42CrMo
- Razdalja med ležaji: $L = 145$ mm

- Kakovost izdelave zobnika: IT7
- Ležaji za $L_h \geq 10\,000h$: stožčasto-valjčasti
- Ohišje reduktorja: varjeno iz jekla 20 Cr

Preostale potrebne podatke je bilo treba vzeti iz Krautovega strojnega priročnika, literature »Osnove konstruiranja« itd.

Pri izdelavi reduktorja je bilo treba vse podatke izračunati, narediti delovne risbe gredi in zobnika. Na koncu je treba narediti sklopni načrt. Vsi podatki morajo imeti naveden vir, iz katerega so pridobljeni. Tabele, ki so omenjene pri izračunu, so vzete iz Krautovega strojnega priročnika.

4.2 Izračun enostopenjskega reduktorja

K izračunu enostopenjskega reduktorja sem pristopil po korakih in v smiselnem zaporedju, tako da sem pred samo izdelavo dobil potrebne podatke, ki bodo osnova za izdelavo reduktorja.

Število zob zobnika

$$Z_1 = 24$$

$$Z_2 = i * Z_1 = 48$$

Število vrtljaja na gredi

Gred 1:

$$N_1 = N_{ul} = 980 \text{ (min}^{-1}\text{)}$$

Gred 2:

$$N_2 = N_1 : i = 980 : 2 = 490 \text{ (min}^{-1}\text{)}$$

Obodne hitrosti na gredi

Gred 1:

$$\omega_1 = (N_1 * \pi) : 30 = (980 * \pi) : 30 = 102,57 \text{ (rad /s)}$$

$$\omega_2 = (N_2 * \pi) : 30 = (490 * \pi) : 30 = 51,28 \text{ (rad /s)}$$

Navor na gredi

Gred 1:

$$M_{O1} = \frac{P_{ul}}{\omega_1} = \frac{36 * 10^3}{102,57} = 350,97 [Nm]$$

Gred 2

$$M_{O2} = M_{O1} * I * \eta = 350,97 * 2 * 0,95 = 666,84 (Nm)$$

Moč na gredi

Gred 1:

$$P1 = P_{ul} = 36 (kW)$$

Gred 2:

$$P2 = P1 * \eta = 36 * 0,95 = 34,2 (kW)$$

4.3 Izračun modula zobnika Z1 in Z2

Korekcija zoba

Preverjamo, ali je potrebna korekcija zoba za zobnike z manjšim številom zob od 17. Glede na to, da je število zob $Z1 = 24$, nam tega ni treba preverjati, ker je število zob teh zobnikov večje od kritičnega števila $Z_{gr} = 17$. To pomeni da ne bo prišlo do odpoklica zob v bazi, kar bi lahko povzročilo njihovo oslabitev.

Normalni modul za zobnike na osi površinskega pritiska na strani drobljenja zob:

$$m_n = (\cos\beta * \sqrt[3]{6,22 * P1 * (i + 1)} * \xi_{x1} \cos\beta) : (I * K_{d1} * \Psi1 * Z1^2 * \eta1) [m]$$

Normalni modul za čelne zobnike, ki temelji na upogibni napetosti na korenu zoba:

$$m_n = (\sqrt[3]{0,637 * P1 * \phi_{n1} * \xi_{\beta} * \cos\beta}) : (\delta_{df1} * \Psi1 * Z1 * \eta1 * \xi_e) [m]$$

Izračun in izbira faktorja, potrebnega za izračunavanje modula:

$\xi_1 = 1$ – faktor korekcije zoba (nimamo korekcije)

$\Psi_1 = 20$ – faktor dolžine zoba (za zelo dobro obdelane zobe in zobnike, vgrajene v zasebna ohišja)

($\xi_2 = 0,8752$) – pridobljeno z interpolacijo in se nanaša na parcialne dele sklopitve

$$Z_{n1} = Z : \cos^3 \beta = 25,51 \text{ in } Z_{n2} = Z_2 : \cos^3 \beta = 50,2;$$

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 0,8075 + 0,8752 = 1,6827 \text{ – skupne stopnje sklopitve}$$

Za material zobnika sledi: 38NiCrMo5

$\delta_{df0} = 100$ [MPa] – upogibna napetost

$K_1 = 2,5$ [MPa] – napetost tečenja

$\xi_k = 1$ – koeficient maziva

$V = 1,5$ – zaželeni koeficient varnosti na stranski pritisk

Uveljavlja se začetni modul $m_n = 6$ [mm]

Obodna hitrost zobnika, izračunana na podlagi na podlagi njegovega delovnega premera

$$v = \omega_1 * m_n * Z_1 = 102,57 * 0,006 * 24 = 14,77 \left[\frac{m}{s} \right]$$

$a_1 = 8-10$ uveljavljamo 9 – faktor natančnosti in kakovosti obdelave

$a_2 = 1$ – faktor natančnosti sestavljanja in splošnih delovnih pogojev za dobro lego zobnika s simetrično razdeljenimi ležišči in tiho delo

$Z_a > Z_a \text{ v } > 20 \left[\frac{m}{s} \right]$ sledi:

$$\xi_{k_1} = \frac{a_1 * a_2}{a_1 + v} = \frac{9 * 1}{9 + 14,77} = 0,37 \text{ – faktor udarnih pogojev}$$

$\delta_{df1} = \delta_{df0} * S_{k1} = 100 * 0,37 = 37 \text{ [MPa]}$ – dovoljena upogibna napetost v podnožju zoba (samo pri izračunu modula)

$$K_{d1} = \frac{K1 * S_K}{v} = \frac{2,5 * 1}{1,5} = 1,66 \text{ [MPa]} \text{ – dovoljena upogibna napetost strani zoba}$$

Normalni modul:

$$m_n = \cos1 * \sqrt[3]{(6,22 * 36 * 10^3 * (2 + 1) * 1 * \cos10) : (2 * 1,66 * 10^6 * 20 * 24^2 * 102,57)} \\ = 5,44 \text{ [mm]}$$

$$m_n = \sqrt[3]{0,637 * 36 * 10^3 * 9,623 * \cos10 : 37 * 10^6 * 20 * 24 * 102,57 * 1,34616} \\ = 4,45 \text{ [mm]}$$

Ob upoštevanju višje dobljene vrednosti se sprejme standardni modul:

$m_{n1} = 6 \text{ [mm]}$ – fiktivni modul (proti stopnji prioritete)

Stvarni modul za zobnike s prvimi zobmi:

$$m_{s1} = \frac{m_{n1}}{\cos\beta} = 6,092 \text{ [mm]}$$

Stopnja varnosti za stranski pritisk:

$$v1 = K1 : K_{D1} \geq 1,2 : 2$$

$v1 = 2,5 : 1,5 = 1,66$ – stopnja varnosti izpolnjena, ker je večji od 1,25

Stopnja varnosti za zvijanje v podnožju zoba:

$$v_{D1} = \delta_{df1} : \delta_1 \geq 1,25 : 2,5$$

Dejanska upogibna napetost v podnožju zoba

$$\delta_1 = \frac{F_{oz1} * \phi_{n1}}{\Psi * \pi * m_{n1}^2} = (2 * 350,97 * 10^3) : (6 * 24) = 4874,58 \text{ [N]}$$

Obodna sila:

$$F_{0Z1} = \frac{2 * M_{01}}{m_{n1} * z_1} = \frac{2 * 350,97 * 10^3}{6 * 24} = 20,74 \text{ [MPa]}$$

$$V_{D1} = \frac{37}{20,74} = 1,78 - \text{stopnja varnosti je izpolnjena, ker je večji od 1,25}$$

Medosna razdalja

$$A = \frac{D1 + D2}{2} = \frac{146,208 + 292,416}{2} = 19,312 \text{ [mm]}$$

Mera prek zoba:

$$W1 = m_{s1} * \cos A [\pi * (k1 - 0,5) + Z1 \operatorname{inv} A + 2 * x1 * \tan A]$$

$$W2 = m_{s1} * \cos A [\pi(k2 - 0,5) + Z2 * \operatorname{inv} A + 2 * x1 * \tan A]$$

$$\tan a_x = \sqrt{\tan^2 a + \frac{4 * (x1 : Z1) * (1 + x1 : Z1)}{\cos^2 \alpha}} = \sqrt{\tan^2 20^\circ + \frac{4 * (0 : 24) * (1 + 0 : 48)}{\cos^2 20^\circ}} = 0,3639$$

$$\operatorname{Inv} a = 0,015020$$

Celotno število zob:

$$k1 = (Z1 : \pi) * (\tan a_x - \operatorname{inv} a) + 0,5 = 4$$

$$k2 = (Z2 : \pi) * (\tan a_x - \operatorname{inv} a) + 0,5 = 6$$

$$W1 = 6,092 * 0,9396 * [\pi * (4 - 0,5) + 24 * 0,015020 + 2 * 0 * 0,3639] = 64,97 \text{ [mm]}$$

$$W2 = 6,092 * 0,9396 * [\pi * (6 - 0,5) + 48 * 0,015020 + 2 * 0 * 0,3639] = 102,98 \text{ [mm]}$$

Širina zobnika:

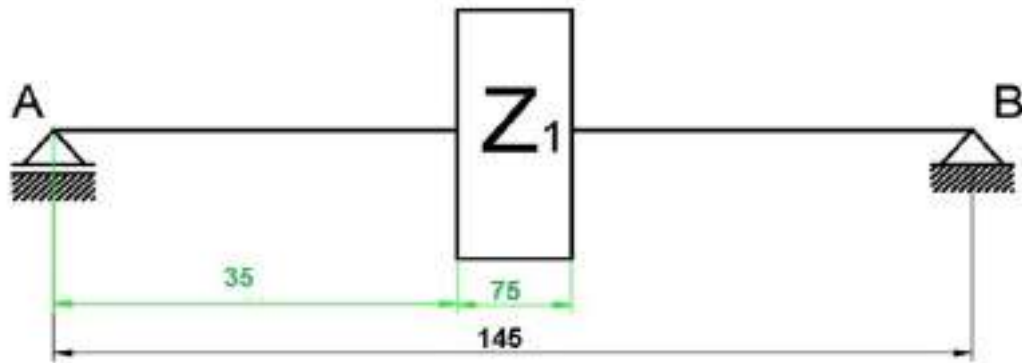
$$b1 = 0,5 * D1 = 0,5 * 146,208 = 73,104 \text{ [mm]}$$

$$b2 = 0,6 * D2 = 0,6 * 292,416 = 175,44 \text{ [mm]}$$

Uveljavlja se širina zobnika $b = 75 \text{ [mm]}$.

4.4 Izračun gredi 1

Na spodnji sliki je prikazana shema sklopa prve gredi in zobnika. Izračun bo izveden z analizo sklopa kot navadnega nosilca, na katerega delujejo vse komponente sil, ki nastanejo pri gibanju.



Slika 9: Shema gredi 1 z zobnikom 1

Vir: Lastni vir (AutoCad)

Sile, ki delujejo na gred nosilca:

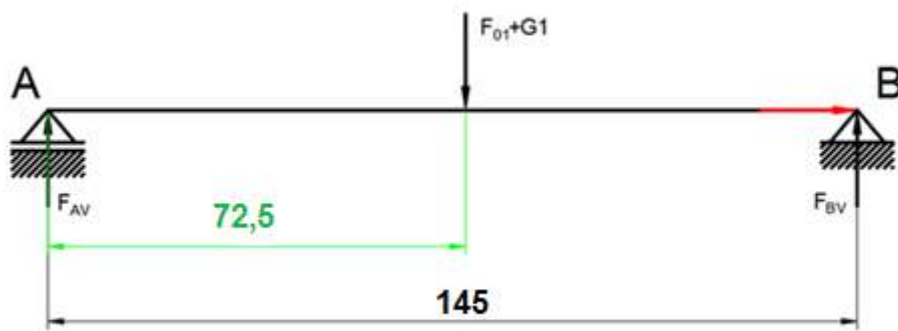
$$F_{O1} = \frac{2 * M_{O1}}{D_1} = \frac{2 * 350,97 * 10^3}{146,208} = 4800,96 \text{ [N]} - \text{obodna sila}$$

$$F_{r1} = F_{O1} * \operatorname{tg} \alpha = 4800,96 * \operatorname{tg} 20^\circ = 1747,4 \text{ [N]} - \text{radialna sila}$$

$$G_1 = \rho * V * g = \rho * \frac{D_1^2 * \pi}{4} * b * g = 7860 * \frac{0,146208^2 * \pi}{4} * 0,075 * 9,81 = 97,043 \text{ [N]}$$

– teža zobnika

– Vertikalna ravnina

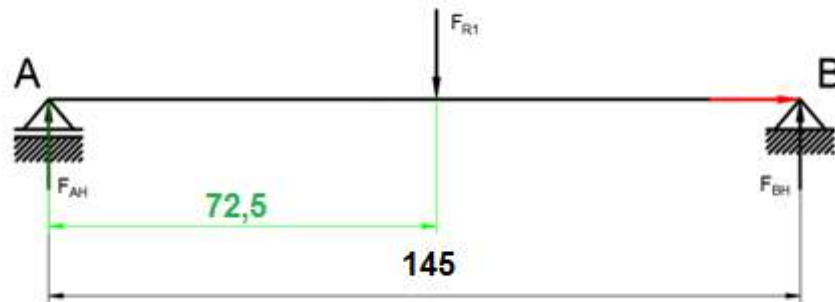


$$\begin{aligned} \sum F_{Xi} &= 0 - \text{ni sile} \\ \sum F_{Yi} &= 0 \Rightarrow F_{AV} + F_{BV} - F_{O1} - G_1 = 0 \\ \sum M_A &= 0 \Rightarrow F_{BV} * 145 - (F_{O1} + G_1) * 72,5 = 0 \end{aligned}$$

Iz predhodno določenih enačb so bile izračunane reakcije v oporah konstrukcije:

$$\begin{aligned} F_{BV} &= \frac{(F_{O1} + G_1) * 72,5}{145} = \frac{(4800,96 + 97,04) * 72,5}{145} = 2449 \text{ [N]} \\ F_{AV} &= F_{O1} + G_1 - F_{BV} = 4800,96 + 97,04 - 2840,84 = 2449 \text{ [N]} \end{aligned}$$

Horizontalna ravnina



Slika 10: Shema sil, delujejo na gred 1

Vir: Lastni vir (Auto Cad)

Sile, ki delujejo na gred 1:

$$\begin{aligned}\sum F_{Xi} &= 0 \\ \sum F_{Yi} &= 0 \Rightarrow F_{AH} + F_{BH} - F_{r1} = 0 \\ \sum M_A &= 0 \Rightarrow F_{BH} \cdot 145 - F_{r1} \cdot 72,5 = 0\end{aligned}$$

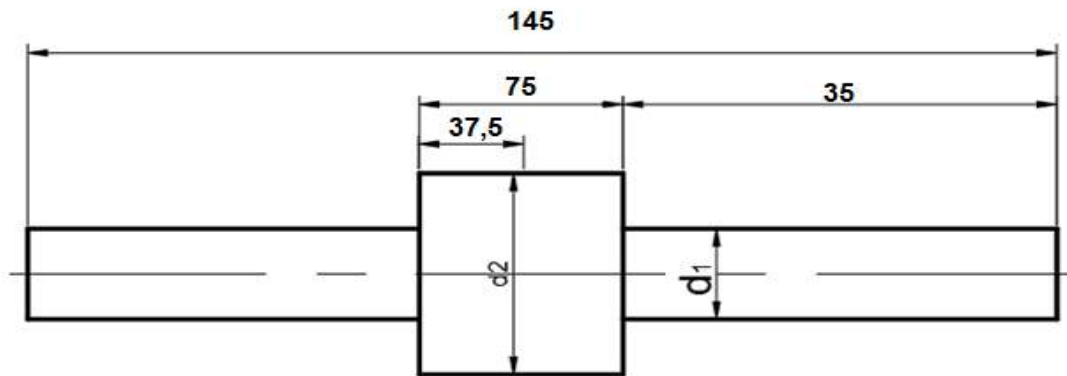
Iz predhodno določenih enačb so bile izračunane reakcije v oporah konstrukcije:

$$\begin{aligned}F_{BH} &= \frac{F_{r1} \cdot 72,5}{145} = \frac{1747,4 \cdot 72,5}{145} = 873,7 \text{ [N]} \\ F_{AH} &= F_r - F_{BH} = 1747,4 - 873,7 = 873,7 \text{ [N]}\end{aligned}$$

Skupne rezultirajoče sile:

$$\begin{aligned}F_A &= \sqrt{F_{AV}^2 + F_{AH}^2} = \sqrt{2449^2 + 873,7^2} = 2600,18 \text{ [N]} \\ F_B &= \sqrt{F_{BV}^2 + F_{BH}^2} = \sqrt{2449^2 + 873,7^2} = 2600,18 \text{ [N]}\end{aligned}$$

4.5 Dimenzioniranje gredi 1



Slika 11: Gred 1

Vir: Lastni vir (AutoCad)

Dimenzioniranje bo izvedeno z izračunom najmanjših premerov, ki so lahko na določenih delih, nato pa bo gred oblikovana po želji in bo prikazana v tehnični dokumentaciji v obliki delavniške risbe.

V tem primeru je relevantno izračunati premer d_1 na levi strani, saj v delu med elektromotorjem in zobnikom prihaja do upogibanja, zato bo ekvivalentni moment večji v primerjavi z ekvivalentnim momentom na desni strani, kjer obstaja samo upogibanje.

Preračun premera d_1 :

Preračun premera d_1 :

$$M_{S1} = F_A \cdot 95 = 2600,18 \cdot 35 = 91006,3 \text{ [Nmm]} = 91,0063 \text{ [Nm]} - \text{moment zvijanja}$$

$$M_{OI} = 350,97 \text{ [Nm]} - \text{moment zvijanja, ki je bil že predhodno izračunan}$$

Ekvivalentni moment:

$$M_{ekv} = \sqrt{M_{S1}^2 + 3 \cdot \alpha_0^2 + M_{Ot}^2}$$

$3 \cdot \alpha_0^2 \approx 0,48$ – pri izmenično spremenljivem zvijanju in nespremenljivem uvijanju

α_0 – odnos, ki prikazuje način naprezanja na zvijanje in upogibanje

$$M_1 = \sqrt{91,0063^2 + 0,48 + 350,97^2} = 362,57 \text{ [Nm]}$$

- $\sigma_a = 210[\text{MPa}]$ – meja razpoka oziroma dinamična vzdržljivost na zvijanje za jeklo **42CrMo**

$\sigma_{fdoz} = \frac{\sigma_{Df}}{\nu} = \frac{210}{1,5} = 140[\text{MPa}]$ – dovoljena napetost na zvijanje
 $\nu = 1,5$ – stopnja varnosti

Napetost je enaka:

$$\sigma_f = \frac{32 * M_{ekv}}{\pi * d_1^3} \leq \sigma_{fdoz}$$

Iz predhodne enačbe se pridobi premer d_1 :

$$d_i = \sqrt{\frac{32 * M_t}{\pi * \sigma_{\mu it}}} = \sqrt{\frac{32 * 362,57 * 10^9}{\pi * 140}} = 29,77 [\text{mm}]$$

Ker je to premer na mestu ležajne ročice, ga je treba povečati za 10–20 %:

- $d_1 = 1,15 * 29,77 = 34,23 [\text{mm}]$.

Določa se standardni premer $d_1 = 35 [\text{mm}]$, ki je potreben zaradi izbire ležaja.

Izračun premera d_2 :

$$M_{v_2} = F * 725 = 2600,18 * 72,5 = 188513,05 [\text{Nmm}] = 188,51 [\text{Nm}]$$

Ekvivalentni moment:

$$M_{ekv} = \sqrt{M_{S_2}^2 + 3 * \alpha_o^2 + M_{O_1}^2} = \sqrt{188,51^2 + 0,48 + 350,97^2} = 398,39 [\text{Nm}]$$

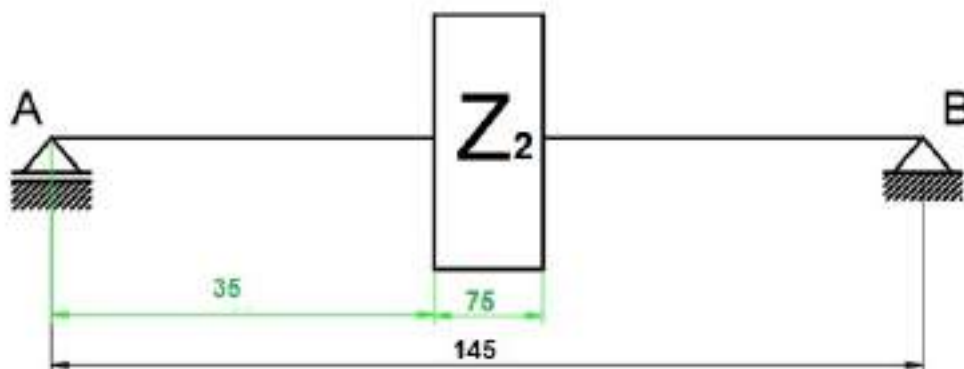
Premer d_2 :

$$d_2 = \sqrt{\frac{32 * M_m}{\pi * \sigma}} = \sqrt{\frac{32 * 398 * 39 * 10^2}{\pi * 140}} = 30,72 [\text{mm}]$$

Ker se na tem mestu nahaja zobnik ter tudi zaradi možnosti lažje montaže zobnika na gred in dodatne varnosti, mora biti podani premer večji od premera, ki se nahaja na ležajni ročici. **Tako da je:**

$$\mathbf{d_2 = 45 [\text{mm}]}$$

4.6 Izračun gredi 2



Slika 12: Shema gredi 2 z zobnikom 2

Vir: Lastni vir (AutoCad)

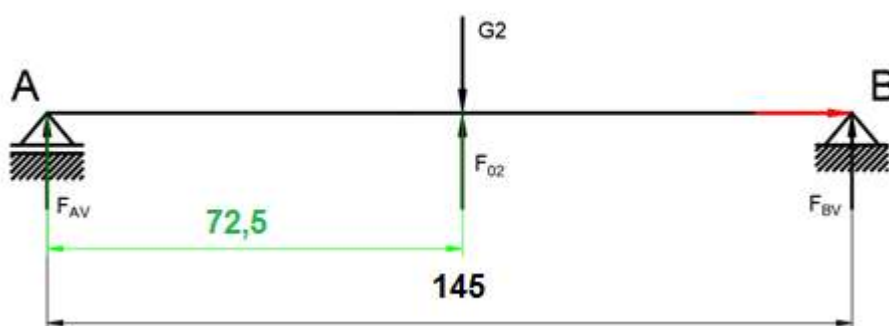
Sile, ki delujejo na gredni nosilec:

$$F_{02} = \frac{2 * M_{O2}}{D_2} = \frac{2 * 666,84 * 10^3}{292,416} = 4560,89 [N] - \text{obodna sila}$$

$$F_{r2} = F_{02} * \operatorname{tg} \alpha = 4560,89 * \operatorname{tg} 20^\circ = 1660,03 [N] - \text{radialna sila}$$

$$G_2 = \rho * V * g = \rho * \frac{D_2^2 * \pi}{4} * b * g = 7860 * \frac{0,292416^2 * \pi}{4} * 0,075 * 9,81 = 388,17 [N] - \text{teža zobnika}$$

– Vertikalna ravnina



Slika 13: Sile, ki delujejo na vertikalno ravnino gredi 2

Vir: Lastni vir (AutoCad)

Vertikalna ravnina:

$$\begin{aligned}\sum F_{AV} &= 0 \text{ -- ni sile} \\ \sum F_{Vi} &= 0 \Rightarrow F_{AV} + F_{BV} + F_{O2} - G_2 = 0 \\ \sum M_A &= 0 \Rightarrow F_{BV} * 145 + (F_{O2} - G_2) * 72,5 = 0\end{aligned}$$

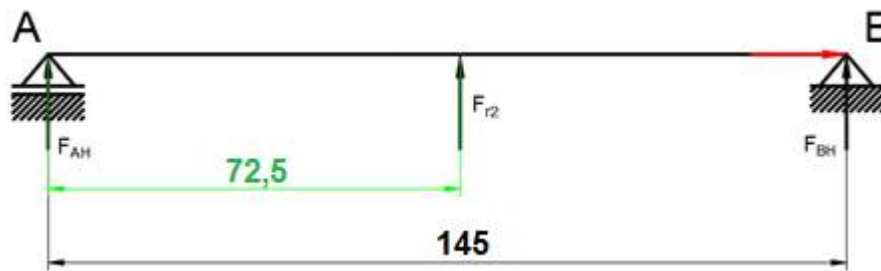
Iz predhodnih dveh enačb smo pridobili reakcije v oporah konstrukcije:

$$F_{BV} = \frac{-(F_{O2} - G_2) * 72,5}{145} = \frac{-(4560,89 - 388,17) * 72,5}{145} = -2086,36 [N] \quad - \quad \text{narobe}$$

predpostavljena smer

$$F_{AV} = -F_{O2} + G_2 - F_{BV} = -4560,89 + 388,17 + 2086,36 = -2086,36 [N] \quad - \quad \text{narobe}$$

predpostavljena smer



Slika 14: Sile, ki delujejo na horizontalno ravnino gredi 2

Vir: Lastni vir (AutoCad)

Sile, ki delujejo na horizontalno ravnino:

$$\begin{aligned}\sum F_{Xi} &= 0 \\ \sum F_{Yi} &= 0 \Rightarrow F_{AH} + F_{BH} + F_{r2} = 0 \\ \sum M_A &= 0 \Rightarrow F_{BH} * 145 - F_{r2} * 72,5 = 0\end{aligned}$$

Iz predhodnih enačb smo pridobili reakcije v oporah konstrukcije:

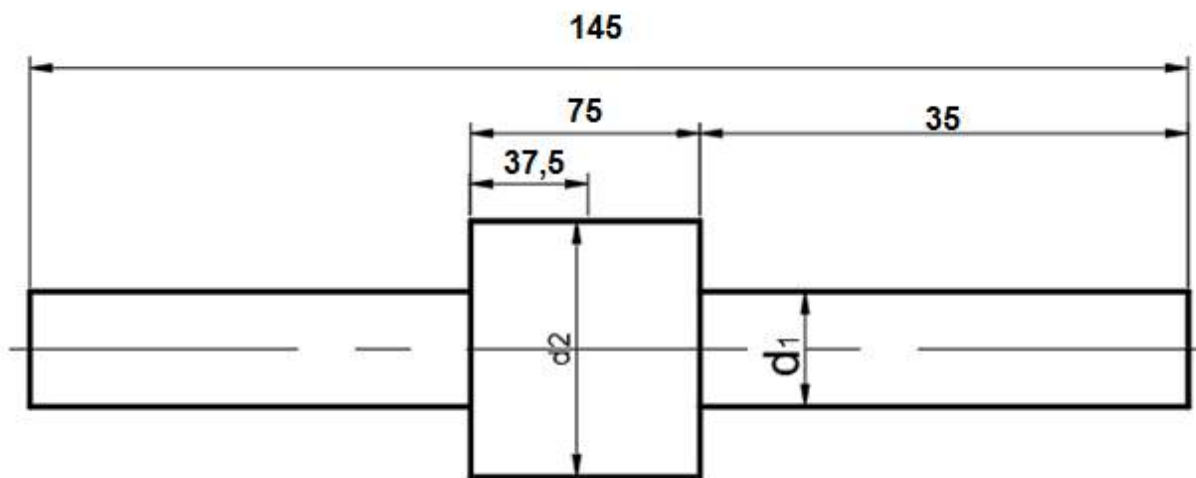
$$\begin{aligned}F_{BH} &= \frac{-F_{r2} * 72,5}{145} = \frac{-1660,03 * 72,5}{145} = -830,015 [N] \\ F_{AH} &= -F_{r2} - F_{BH} = -1660,03 + 830,015 = -830,015 [N]\end{aligned}$$

Rezultirajoče sile:

$$F_A = \sqrt{F_{AV}^2 + F_{AH}^2} = \sqrt{(-2086,36)^2 + (-830,015)^2} = 2245,4[N]$$

$$F_B = \sqrt{F_{BV}^2 + F_{BH}^2} = \sqrt{(-2086,36)^2 + (-830,015)^2} = 2245,4[N]$$

4.7 Dimenzioniranje gredi 2



Slika 15: Gred 2

Vir: Lastni vir (AutoCad)

V obravnavanem primeru je relevantno dimenzioniranje premera d_{1d_1d1} na levi strani, saj med elektromotorjem in zobnikom prihaja do kombinirane obremenitve z zvijanjem. Posledično je ekvivalentni moment na tem odseku večji kot na desni strani, kjer deluje izključno upogibni moment.

Izračun premera d_1 :

$$M_{s1} = F_d * 95 = 2245,4 * 35 = 78589 [Nmm] = 78,589[Nm] - \text{moment zvijanja}$$

$$M_{O2} = 666,84[Nm] - \text{moment upogibanja, ki je že predhodno izračunan}$$

Ekvivalentni moment:

$$M_{edv} = \sqrt{M_{si}^2 + 3 * \alpha_0^2 + M_{o2}^2}$$

$3 * \alpha_0^2 \approx 0,48$ – pri izmenično spremenljivem in nespremenljivem upogibanju

α_0 – odnos, ki prikazuje napetost pri upogibanju

$$M_{clv} = \sqrt{78,589^2 + 0,48 + 666,84^2} = 671,45 \text{ [Nm]}$$

$\sigma_{Dr} = 210 \text{ [MPa]}$ – meja razpoka oziroma dinamična vzdržljivost na zvijanje za **42CrMo**:

$$\sigma_{fdoz} = \frac{\sigma_{Df}}{v} = \frac{210}{1,5} = 140 \text{ [MPa]} \text{ – dovoljena napetost zvijanja}$$

$v = 1,5$ – stopnja varnosti

Napetost je enaka:

$$\sigma_f = \frac{32 * M_{div}}{\pi * d_1^3} \leq \sigma_{fdoz}$$

Iz predhodne enačbe izhaja premer d_2 :

$$d_2 = \sqrt[3]{\frac{32 * M_{ckr}}{\pi * \sigma_{fdoz}}} = \sqrt[3]{\frac{32 * 671,45 * 10^3}{\pi * 140}} = 36,56 \text{ [mm]}$$

Ker je to premer na mestu ležajne ročice, ga je treba povečati za 10–20 %:

$$d_1 = 1,15 * 36,56 = 42,01 \text{ [mm]}$$

Določa se standardni premer $d_2 = 45 \text{ [mm]}$, ki je potreben zaradi izbire ležaja.

Izračun premera d_2 :

$$M_{S2} = F_A * 72,5 = 2245,4 * 72,5 = 162791,5 \text{ [Nmm]} = 162,7915 \text{ [Nm]}$$

Ekvivalentni moment:

$$M_{cov} = \sqrt{M_{S2}^2 + 3 * \alpha_0^2 + M_{O2}^2} = \sqrt{162,7915^2 + 0,48 + 666,84^2} = 686,42 \text{ [Nm]}$$

Prečnik d2:

$$d_2 = \sqrt{\frac{32 * M_{mi}}{\pi * \sigma_{Ne}}} = \sqrt{\frac{32 * 686,42 * 10^3}{\pi * 140}} = 36,83 \text{ [mm]}$$

Ker se na tem mestu nahaja zobnik ter tudi zaradi možnosti lažje montaže zobnika na gred in dodatne varnosti, mora biti podani premer večji od premera, ki se nahaja na ležajni ročici. Tako da je:

$$d_2 = 52 \text{ [mm]}.$$

4.8 Izbira in izračun ležaja za gred 1

$d_1 = 35 \text{ [mm]}$ – premer na mestu ležajne ročice gredi 1

$F_3 = 2600,18 \text{ [N]}$ – največja radialna sila

$F_s = 0 \text{ [N]}$ – največja radialna sila

$n = 980 \text{ [min}^{-1}\text{]}$ – največje število obratov

$L_h = 10 - 10^3 \text{ [h]}$ – orientacijska vrednost delovnega časa ležaja

$f_T = 1$ – orientacijska vrednost faktorja trdote na delovni temperaturi, temperatura do 100°C

$f_D = 10,35$ – orientacijska vrednost dejavnika udara pri dinamičnih obremenitvah za vrsto pogona »zobniški prenos z zobniki, izdelanimi z običajno mehansko obdelavo (brez dodatnega brušenja ali površinske dodelave)«

Izbira se tip stožčastega valjčnega ležaja **35 KB 03** iz »Strojarskog priručnika« Bojana Krauta.

Tabela 1: Izbira ležaja

<i>Stožasti ležaji (nastavak)</i>								
Oznaka	Dimenzije (mm)						Nosivost (kN)	
	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>b</i>	<i>b₁</i>	<i>r</i>	<i>r₁</i>	<i>C₀</i>	<i>C</i>
<i>Niz KB 03</i>								
20 KB 03	20	52	15	13	2	0,8	16	22,4
25	25	62	17	15	2	0,8	21,6	30
30	30	72	19	16	2	0,8	28,5	37,5
35 KB 03	35	80	21	18	2,5	0,8	37,5	48
40	40	90	23	20	2,5	0,8	46	56
45	45	100	25	22	2,5	0,8	57	68
50 KB 03	50	110	27	23	3	1	67	78
55	55	120	29	25	3	1	78	90
60	60	130	31	26	3,5	1,2	91,5	108
65 KB 03	65	140	33	28	3,5	1,2	108	125
70	70	150	35	30	3,5	1,2	122	140
75	75	160	37	31	3,5	1,2	137	156
80 KB 03	80	170	39	33	3,5	1,2	153	173
85	85	180	41	34	4	1,5	170	193
90	90	190	43	36	4	1,5	190	212
95 KB 03	95	200	45	38	4	1,5	228	250
100	100	215	47	39	4	1,5	255	275
105	105	225	49	41	4	1,5	270	290

Vir 1: Krautov priročnik

 $m = 10/3$ – eksponent časa trajanja za valjčne ležaje $C_0 = 37,5$ [kN] – statična moč obremenitve ležaja – tabela 1 $C = 48$ [kN] – dinamična moč obremenitve ležaja – tabela 1 $V = 1$ – izračunski faktor – tabela 1, notarnji prstan se vrti

Iz tabele 1 se jemljejo vrednosti radialnega in aksialnega dinamičnega faktorja obremenitve na osnovi obrazca in priporočil, razloženih v tabeli:

$$\frac{F_x}{C_0} = \frac{0}{37500} = 0 \Rightarrow e = 0,19$$

$$\frac{F_x}{V \cdot F_y} = \frac{0}{1 * 2600,18} = 0$$

$$\frac{F_x}{V * F_y} < e \Rightarrow X = 1 \text{ i } Y = 0$$

Ekvivalentna obremenitev:

$$F = V * X * F_y + Y * F_x = 1 * 1 * 2245,4 = 2245,4 \text{ [N]}$$

Faktor trajnosti ležaja:

$$f_L = \sqrt{\frac{L_h}{500 h}} = \sqrt[3]{\frac{10 * 10^3}{500}} = 2,71$$

Faktor hitrosti obračanja:

$$f_n = \sqrt{\frac{33,33 \text{ min}^{-1}}{n}} = \sqrt[3]{\frac{33,33}{490}} = 0,40$$

Potrebna dinamična moč obremenitve ležaja:

$$C = F * \frac{f_L}{f_n} * \frac{f_D}{f_T} = 2245,4 * \frac{2,71}{0,4} * \frac{1,35}{1} = 20536,98 \text{ [N]} = 20,536 \text{ [kN]}$$

Potrebna dinamična moč obremenitve je manjša od dinamične moči obremenitve ležaja, kar pomeni, da ležaj izpolnjuje vse zahteve in se dela preskus ležaja **35 KB 03**.

$$f_n = \sqrt[n]{\frac{33,33 \text{ min}^{-1}}{n}} = \sqrt[3]{\frac{33,33}{980}} = 0,32$$

Potrebna dinamična moč obremenitve ležaja:

$$C = F * \frac{f_L}{f_n} * \frac{f_D}{f_T} = 2600,18 * \frac{2,71}{0,32} * \frac{1,35}{1} = 29727,37 \text{ [N]} = 29,727 \text{ [kN]}$$

Potrebna dinamična moč obremenitve je manjša od dinamične moči obremenitve ležaja, kar pomeni, da ležaj izpolnjuje vse zahteve **35 KB 03**.

Življenjska doba:

$$L = \left(\frac{f_T}{f_D} * \frac{C}{F} \right)^m * 10^6 = \left(\frac{1}{1,35} * \frac{48}{2,6} \right)^3 * 10^6 = 2557,47 * 10^6 \text{ obrata}$$

Število delovnih ur:

$L_h = \frac{L}{60 \cdot n} = \frac{1241,37 \cdot 10^6}{60 \cdot 490} = 42223,8[h]$ – število delovnih ur zadostuje, ker je večje od zahtevanega števila delovnih ur, torej od 20 000.

Mejno število obratov:

$D = 80 [mm]$ – zunanji premer ležaja

$E_S = 1,25$ – faktor tipa mazanja za mazanje z oljem;

Za koeficient E_K je treba izračunati odnos aksialne in radialne komponente sil:

$$\frac{F_x}{F_y} = \frac{0}{2600,18} = 0$$

$N_0 = 320000 [min^{-1}]$ – karakteristična konstanta hitrosti obračanja v odvisnosti od vrste krogličnega ležaja

$$tn_g = \frac{E_S \cdot E_K \cdot N_0}{D-10} = \frac{1,25 \cdot 1 \cdot 320000}{85-10} = 5333,33[min^{-1}]$$

Mejno število obratov je večje od največjega števila obratov gredi, kar pomeni, da je ležaj v celoti izpolnil vse zahtevane lastnosti in ga je mogoče uporabiti kot oporo za obe gredi z obeh strani v reduktorju.

4.9 Izbira in izračun ležaja za gred 2

$d_1 = 45 [mm]$ – premer na mestu ležajne ročice gredi 1

$F_3 = 2245,4 [N]$ – največja radialna sila

$F_+ = 0 [N]$ – največja radialna sila

$n = 490 [min^{-1}]$ – največje število obratov

$L_h = 10 - 10^3 [h]$ – orientacijska vrednost delovnega časa ležaja

$f_7 = 1$ – orientacijska vrednost faktorja trdote na delovni temperaturi, temperatura do 100 °C

$f_D = 1,35$ – orientacijska vrednost faktorja udara pri dinamični obremenitvi za vrsto pogona »zobniški prenos z zobniki, obdelanimi s konvencionalnimi postopki (brez finega brušenja ali površinske dodelave«

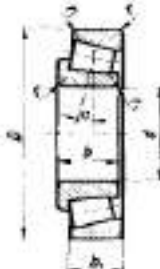
Vzame se tip stožčastega valjčnega ležaja 45 KB 02 iz »Strojarskog priručnika« Bojana Krauta.

Tabela 2: Izbira stožčastega ležaja

Stožasti ležaji
Niz KB
(JUS M.C3.735 — 1966)

Niz KB:

Stožasti ležaji podnose velika sestavljena (redilna i aksijalna) obremenjenja. Vanjski i notranji prsten mogu se montirati posebice.



Oznaka	Dimenzije (mm)						Nosivost (kN)	
	d	D	B	b ₁	r	r ₁	C ₁₀	C
Niz KB 02								
20 KB 02	20	47	14	12	1,5	0,5	12,9	18,7
25	25	52	15	13	1,5	0,5	15,6	19
30	30	62	16	14	1,5	0,5	20,8	26
35 KB 02	35	72	17	15	2	0,8	26,5	32,5
40	40	80	18	16	3	0,8	31	39
45	45	85	19	18	2	0,8	36	42,5
50 Krautov	50	90	20	17	2	0,8	40,2	48,5
55	55	100	21	18	2,5	0,8	32	38
60	60	110	22	19	2,5	0,8	36	62
65 KB 02	65	120	23	20	2,5	0,8	43,5	73,5
70	70	125	24	21	2,5	0,8	71	79
75	75	130	25	22	2,5	0,8	81,5	85
80 KB 02	80	140	26	22	3	1	88	96,5
85	85	150	28	24	3	1	106	114
90	90	160	30	26	3	1	120	127
95 KB 02	95	170	32	27	3,5	1,2	132	157
100	100	180	34	29	3,5	1,2	156	160
105	105	190	36	30	3,5	1,2	170	176
110 KB 02	110	200	38	32	3,5	1,2	194	196
120	120	215	40	34	3,5	1,2	218	220

Vir: Krautov priročnik

Življenjska doba:

$$L = \left(\frac{f_T}{f_D} * \frac{C}{F} \right)^m * 10^6 = \left(\frac{1}{1,35} * \frac{32,5}{2,24} \right)^3 * 10^6 = 1241,37 * 10^6 \text{ (obrata)}$$

Število delovnih ur:

$$L_h = \frac{L}{60 * n} = \frac{1241,37 * 10^6}{60 * 490} = 42223,8[h] \text{ (ur)} - \text{število delovnih ur zadostuje, ker je večje od zahtevanega števila delovnih ur, torej od 20 000.}$$

Mejno število obratov:

D = 85 (mm) – zunanji premer ležaja

Es = 1,25 – faktor tipa mazanja za mazanja z oljem

Ek = 1 – koeficient kombinirane obremenitve

No = 32 000 min⁻¹ – karakteristična konstantna hitrosti vrtenja

V odvisnosti od vrste krogličnega ležaja:

$$N_g = E_s * E_k * N_o / (D - 10) = 1,25 * 1 * 320000 / (85 - 10) = 5333,33 \text{ min}^{-1}$$

Mejno število obrata je večje od največjega števila obratov gredi. To pomeni, da ležaj v celoti izpolnjuje vse zahtevane karakteristike in se lahko uporablja kot opora za obe gredi na obeh straneh v reduktorju.

4.10 Izbira pogonskega elektromotorja

Potrebujemo elektromotor moči 36 kW in število obratov $n = 980 \text{ min}^{-1}$. Tako na podlagi podanih zahtev uveljavljamo motor **KONČAR** iz kataloga (www.koncar-mes.hr/wp-content/uploads/katalozi/katalog_elektromotorji_hr_en_de.pdf).

Tabela 3: Izbira pogonskega elektromotorja

2p=6		1000 min ⁻¹				400V / 50Hz				1200 min ⁻¹ / 440V / 60Hz				
P (kW)	Motor type	n (min ⁻¹)	η (%)	cos φ	I _L (A)	I _L (A)	M _L (Nm)	M _L (Nm)	M _L (Nm)	J (kgm ²)	m (kg)	P (kW)	n (min ⁻¹)	η (%)
0,05	SAZ 50B-6	850	45	0,62	0,35	2,2	0,75	2,2	2,3	0,0001291	1,3	0,05	1000	0,55
0,07	SAZ 63A-6	850	45	0,62	0,42	2,2	0,8	2,2	2,3	0,0002111	4	0,07	1000	0,42
0,12	SAZ 63B-6	860	49	0,63	0,8	2,2	1,3	2,2	2,3	0,0002988	4,1	0,12	1000	0,6
0,18	SAZ 71A-6	870	51	0,67	0,9	2,2	2	3,6	1,8	0,0004573	4,9	0,2	1040	0,9
0,25	SAZ 71B-6	880	53	0,68	1,1	2,3	2,7	5,7	1,8	0,0006423	5,7	0,3	1060	1,1
0,37	SAZ 80A-6	900	65	0,75	1,2	3,5	4	3,7	3,9	0,0013695	7,7	0,4	1080	1,2
0,55	SAZ 80B-6	900	67	0,77	1,3	3,4	6	2,1	2,2	0,0022011	9	0,6	1080	1,3
0,75	SAZ 90C-6	900	73	0,73	2,1	3,7	8	2,0	2,3	0,0029090	11,5	0,8	1080	2,1
0,75	SAZ 90S-6	900	70	0,65	2,4	3,3	8	2,2	2,3	0,0023898	12	0,8	1080	2,4
1,1	SAZ 90L-6	900	75	0,69	3,2	3,2	12	3,0	2,7	0,0039444	15,2	1,1	1080	3,2
1,5	SAZ 100L-6	930	76	0,75	3,8	4,0	15	5,9	2,3	0,0104246	20	1,3	1130	3,8
2,2	SAZ 112M-6	950	78	0,72	5,7	5,3	25	2,7	3,1	0,0148747	29	2,5	1170	5,7
3	SAZ 112MA-6	950	82	0,72	7,5	3,4	30	2,7	3,3	0,0188433	38	3,4	1140	7,5
3	SAZ 112S-6	940	81,5	0,72	7,4	4,6	30	2,1	2,3	0,0208890	39	3,4	1130	7,4
4	SAZ 132MA-6	950	80,1	0,72	9,8	5,8	40	2,7	3,9	0,0452678	40	4,3	1140	9,8
5,5	SAZ 132VB-6	950	84	0,74	12,8	5,8	55	2,8	3,9	0,0452678	49	6,2	1140	12,8
7,5	SAZ 160MA-6	965	80,5	0,81	15,5	7,5	75	2,8	3,3	0,0524623	78	8,7	1160	15,5
11	SAZ 160L-6	965	88	0,82	22	7,5	118	2,8	3,3	0,1207090	110	12,5	1160	22
15	FAZ 180C-6	970	90,5	0,84	28,5	7,8	150	2,8	3,6	0,1609081	165	17	1185	28,5
18,5	FAZ 180LA-6	975	90	0,86	37	7,7	180	2,4	3,3	0,2385562	220	21	1170	37
18,5	FAZ 200LA-6	970	90	0,96	37	6,5	180	2,2	2,5	0,2772834	255	21	1170	37
22	FAZ 200LB-6	975	91	0,92	40,5	6,1	215	2,2	2,8	0,3190255	285	25	1170	40,5
30	FAZ 225MA-6	975	93,5	0,93	56,3	7,3	295	3,0	3,9	0,7260641	380	34	1170	56,3
37	FAZ 250MA-6	980	93	0,75	77	7,8	360	2,8	3,9	1,0005490	495	40	1180	77
45	FAZ 280S-6	985	93	0,77	90	7,8	435	2,5	3,9	1,4678774	510	50	1180	90
55	FAZ 280MA-6	985	93,5	0,77	110	7,8	535	2,5	3,9	1,7612895	550	60	1180	110
75	FAZ 315S-6	990	94,5	0,82	140	7,5	725	2,5	2,6	4,4998275	800	84	1185	140
90	FAZ 315MA-6	990	94,5	0,88	172	7,2	870	2,1	2,7	5,0523680	885	101	1185	172
118	FAZ 315LA-6	990	94,5	0,90	208	7,6	1060	2,1	2,7	6,7528900	960	124	1185	208

Vir: Katalog za izbiro elektromotorja KONČAR

Uveljavljamo elektromotor KONČAR z oznako 7 AZ 250M-6, izhodno močjo 37 kW in izhodnim številom obrata $n = 985 \text{ 0/min}$ (Šojat, 2006).

5 KONSTRUKCIJSKA ZASNOVA REDUKTORJA

5.1 CAD-modeliranje in tehnične risbe

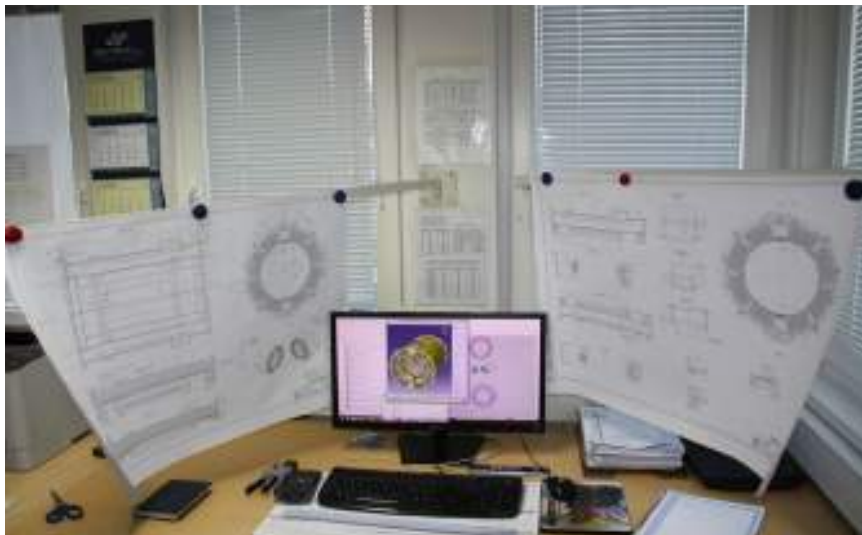
Po končanem izračunu in pridobljenih rešitvah se v nadaljnjem postopku ukvarjam z modeliranjem in izdelavo tehničnih risb.

Kot konstrukter v podjetju sem zadolžen tudi za izdelavo 3D-modela in vseh sestavnih delov reduktorja. V prvi fazi prikazujem zobnike na tej gredi in na koncu ohišje, ki je izbrano.

Postopek risanja poteka na računalniku v konstruktorski sobi.

CAD-modeliranje:

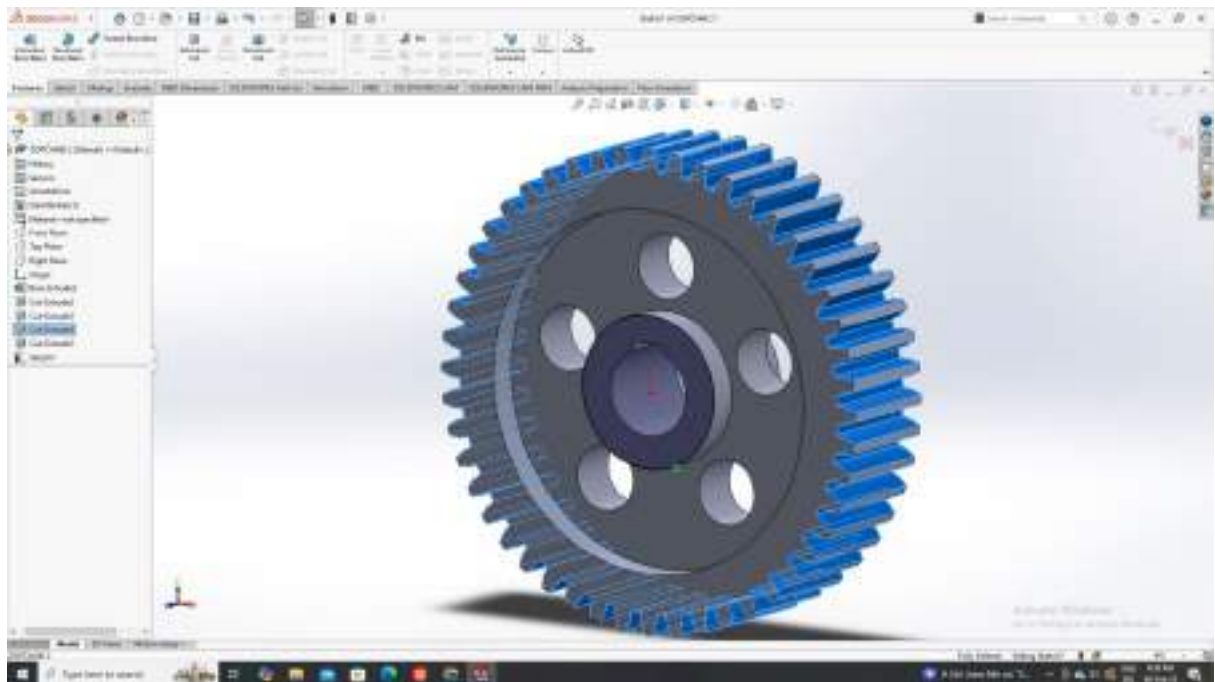
- uporaba naprednih CAD-programov (npr. SolidWorks, CATIA, AutoCAD) za ustvarjanje 3D-modelov vseh komponent reduktorja, vključno z zobniki, ohišjem, ležaji in drugimi mehanskimi deli (slika 16);
- podrobno modeliranje geometrijskih oblik, ki omogočajo natančno prikazovanje vseh potrebnih dimenzij in toleranc za CNC-obdelavo;
- ustvarjanje sestavov in prepoznavanje morebitnih težav v konstrukciji že v fazi načrtovanja, kar omogoča zgodnje odpravljanje napak.



Slika 16: Konstruktorska izdelava 3D-modela

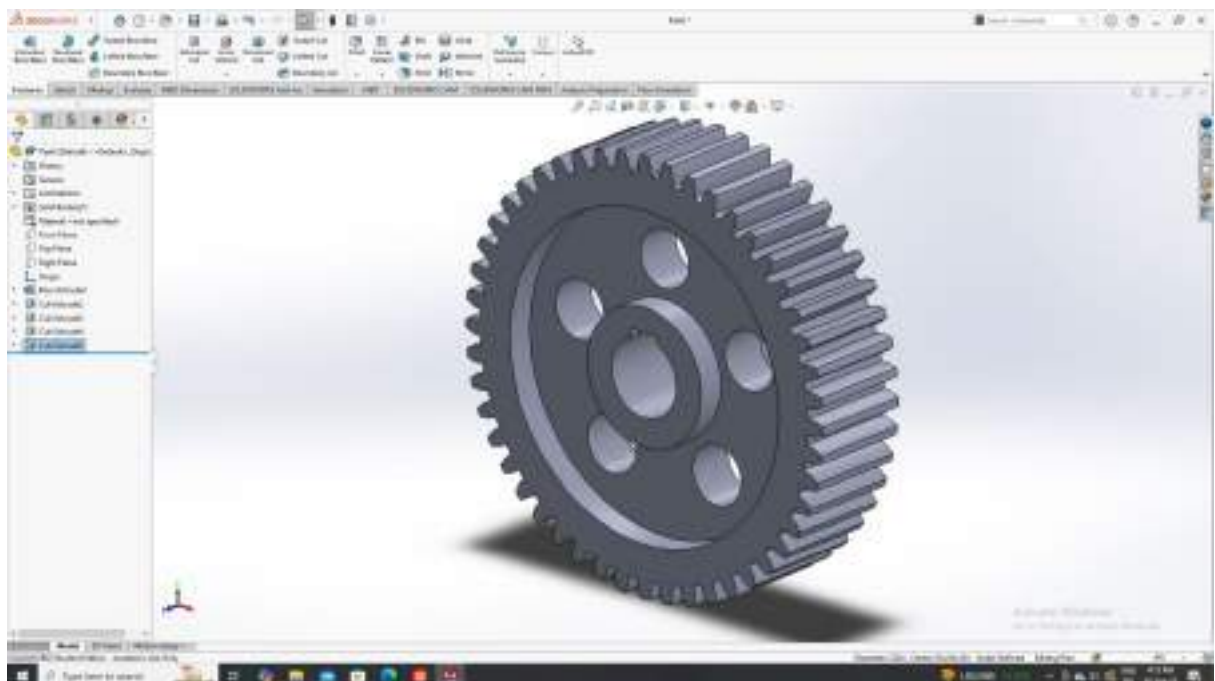
Vir: Viri podjetja Mega Metal

Iz slik 17 in 18 je razvidna izdelava 3D-modela gnanega zobnika.



Slika 17: Izdelava 3D-modela gnanega zobnika

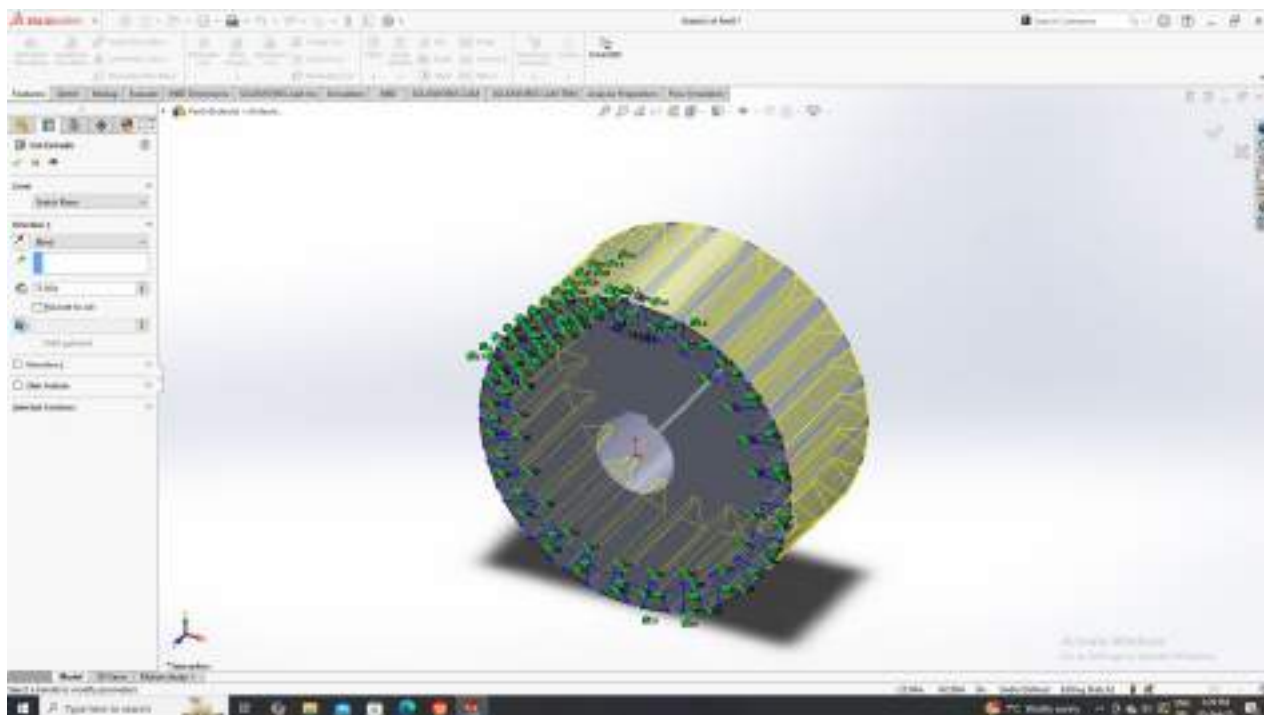
Vir: Lastni vir (SolidWorks)



Slika 18: Gnani zobnik

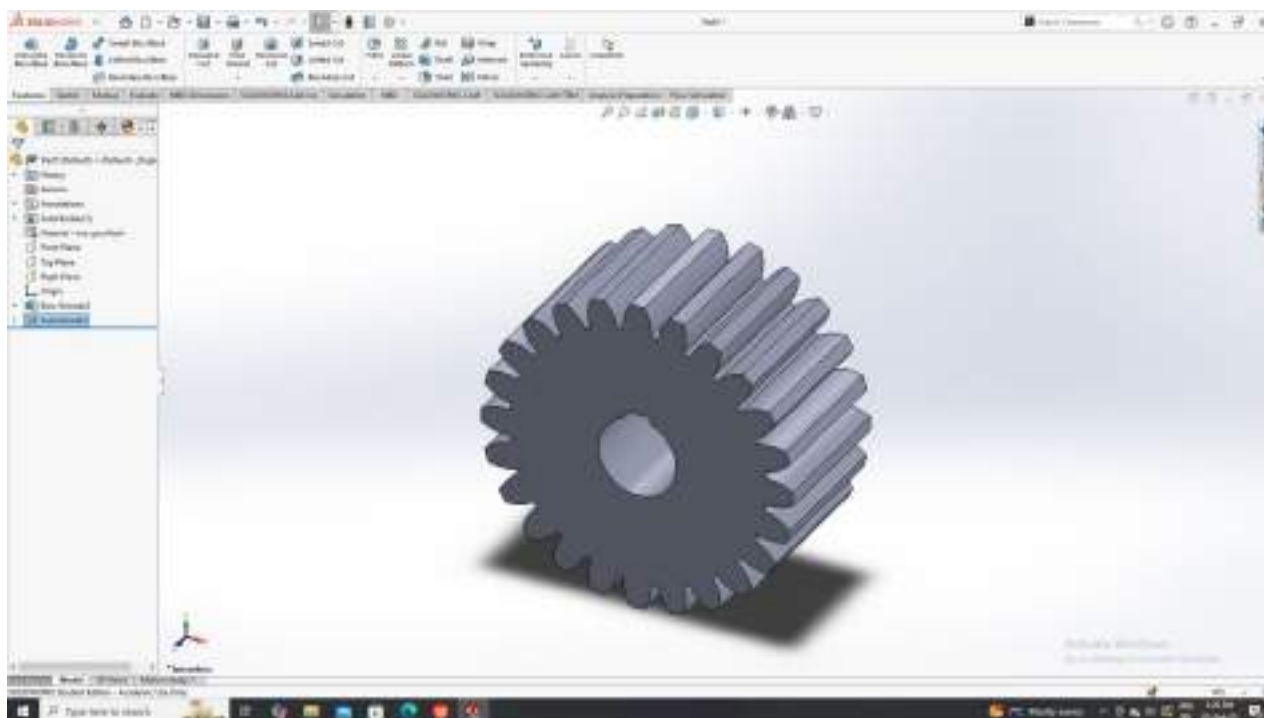
Vir: Lastni vir (SolidWorks)

Iz slike19 in 20 je razvidno izdelava pogonskega zobnika.



Slika 19: Izdelava 3D-modela pogonskega zobnika

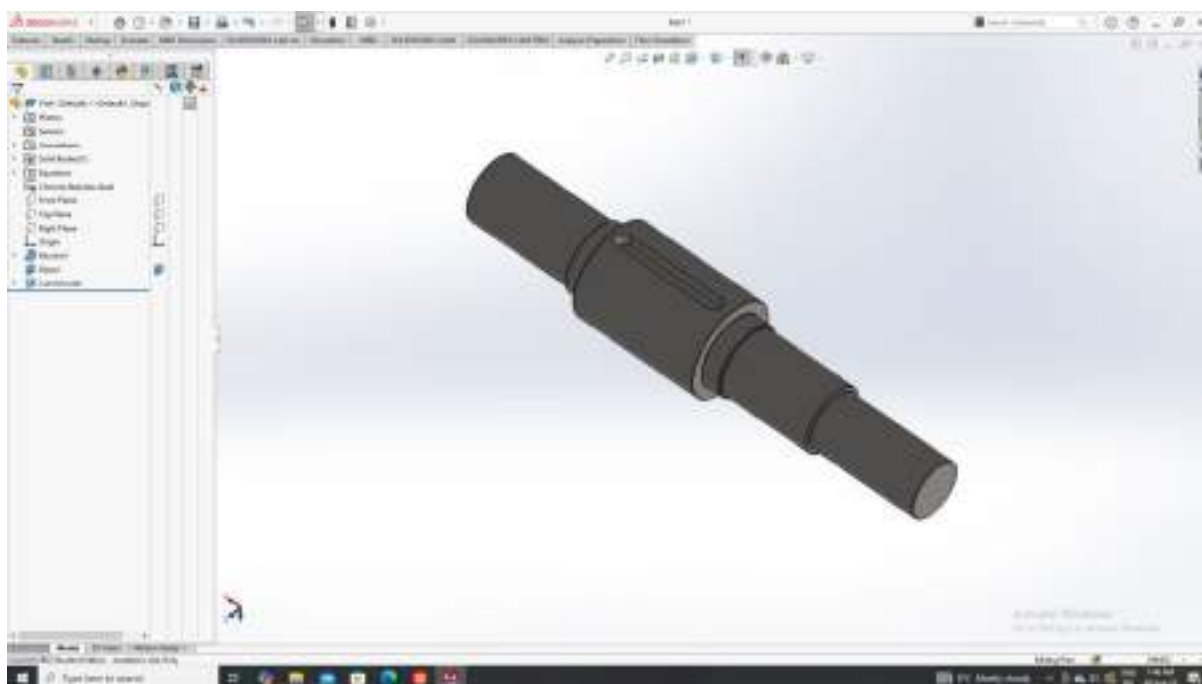
Vir: Lastni vir (Solid Works)



Slika 20: Pogonski zobnik

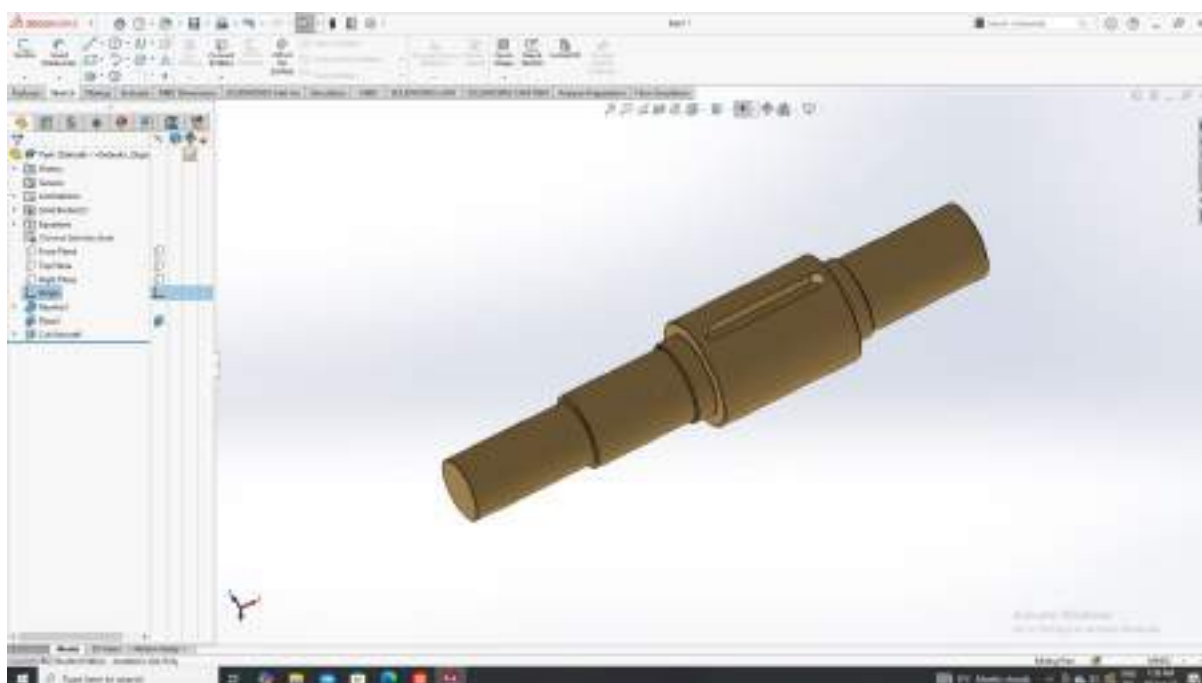
Vir: Lastni vir (SolidWorks)

Iz slik 21 in 22 je razvidna izdelava 3D-modela pogonskih gredi 1 in 2.



Slika 21: Izdelava 3D-modela pogonske gredi 1

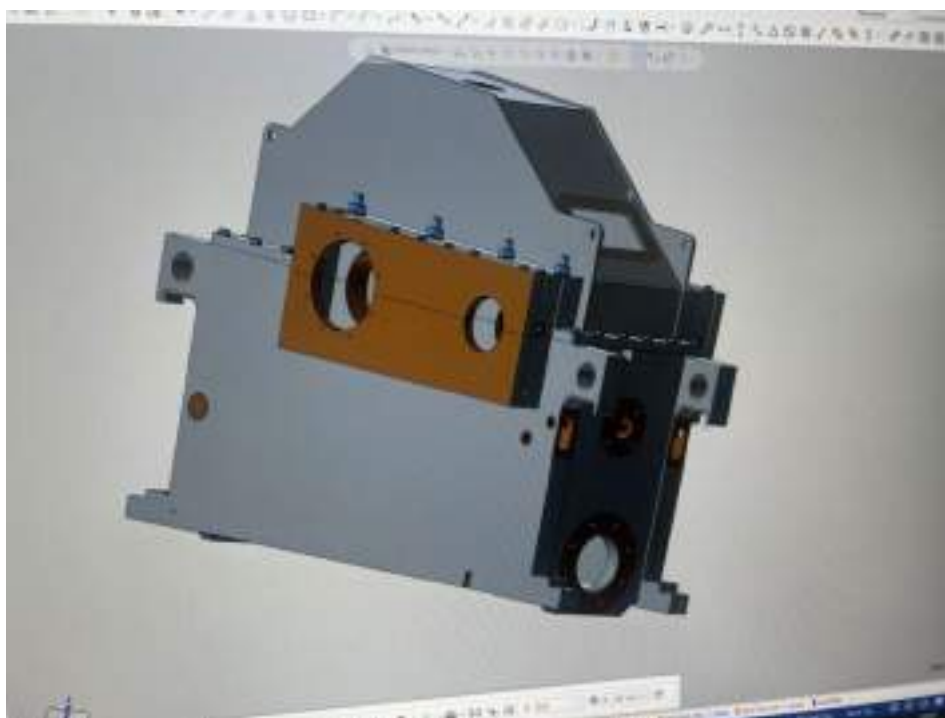
Vir: Lastni vir (SolidWorks)



Slika 22: Izdelava 3D-modela pogonske gredi 2

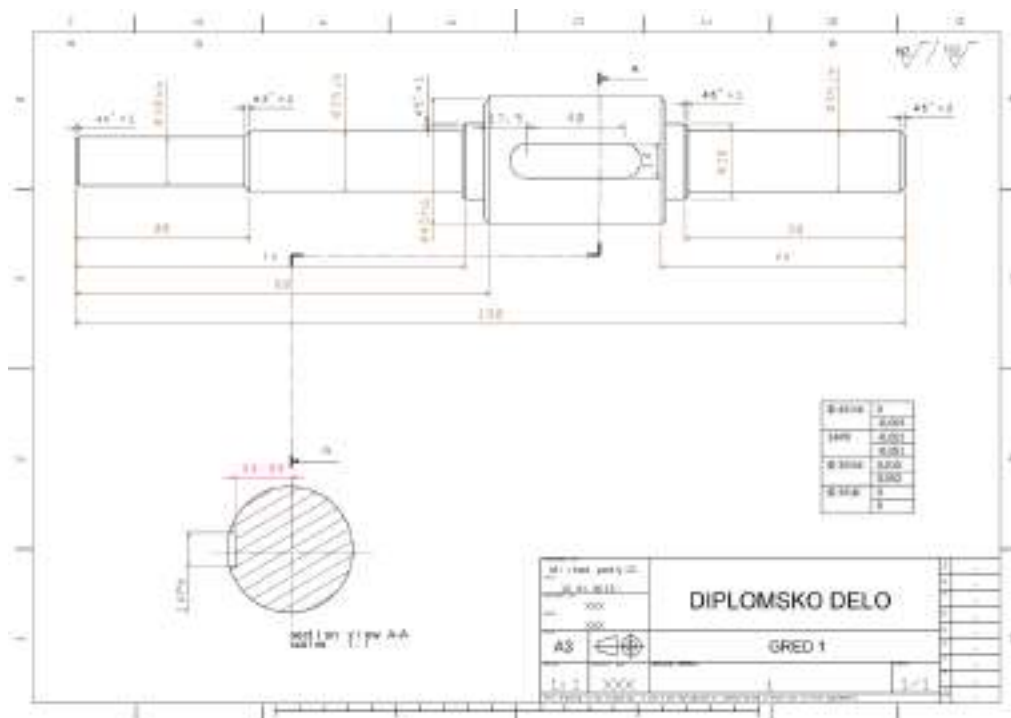
Vir: Lastni vir (SolidWorks)

Slika 23 prikazuje izdelavo 3D-modela reduktorja.



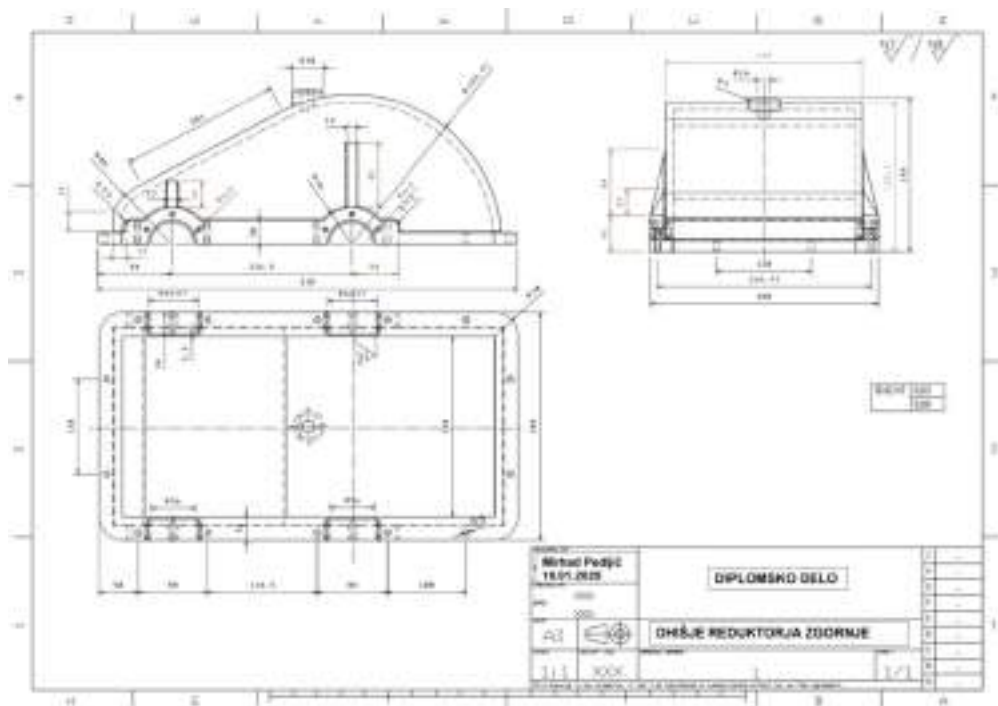
Slika 23: Sklopni 3D-model reduktorja

Vir: Vir podjetja Mega Meta



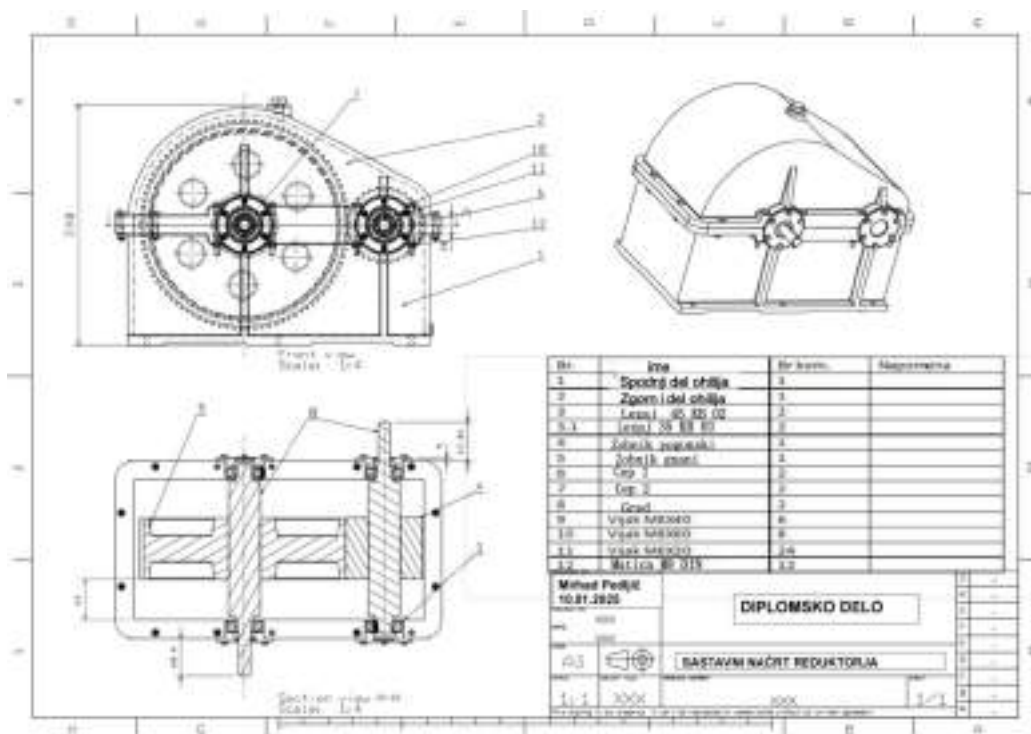
Slika 24: Tehnična dokumentacija gredi 1

Vir: Lastni vir



Slika 29: Tehnična dokumentacija zgornjega ohišja reduktorja

Vir: Lastni vir



Slika 30: Sestavni načrt reduktorja

Vir: Lastni vir

5.2 Izbira materiala za posamezne komponente

- Ohišje reduktorja

Ohišje reduktorja mora biti dovolj trdno, da prenese mehanske obremenitve, hkrati pa mora biti odporno proti koroziji, saj bo pogosto izpostavljeno morski vodi in drugim neugodnim okoljem.

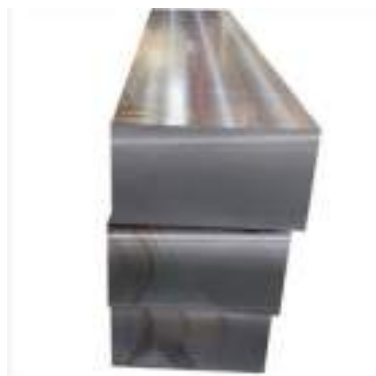
Nerjaveče jeklo: za dodatno odpornost proti koroziji, zlasti v okolju, kjer je izpostavljenost morski vodi visoka (npr. zunanji deli ladje).

Odločil sem se za **legirano jeklo 20 Cr** (slika 31), ker mora sistem zagotavljati veliko trdnost in zanesljivost v procesu obratovanja. Nerjaveče jeklo bi bilo boljša izbira zaradi dodatnih postopkov zaščite, vendar sem se kot konstrukter odločil za legirano jeklo. V nadaljnjem procesu sem se osredotočil na premaze, s katerimi bi preprečil možnost prisotnosti rje. V tabeli 4 so prikazane lastnosti materiala 20 Cr. (Jovanović, 2003)

Tabela 4: Lastnosti materiala – **legirano jeklo 20 Cr**

Lastnost	Vrednost
Kemična sestava	C: 0.17–0.24%, Cr: 0.90–1.20%, Mn: 0.40–0.70%, Si: 0.17–0.37%, P ≤ 0.035%, S ≤ 0.035%
Gostota	7.85 g/cm ³
Tališče	1425–1460°C
Trdota (Brinell)	160–220 HB
Tlak trajne obremenitve (Rp0.2)	460–650 MPa
Tlak popolnega razpada (Rm)	700–900 MPa
Elastični modul (E)	210 GPa
Poškodljivost (A)	12–16%
Tegovina	850–1050°C (predelava v toplotni obdelavi)
Poškodljivost pri udarcu (Kv)	50–80 J
Kemična odpornost	Dobra odpornost proti koroziji, zlasti pri nizkih temperaturah
Pogosti uporabljeni deli	Zobniki, osi, gredi, mehanski deli, ki potrebujejo dobro odpornost proti obrabi

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 31: Jeklo 20 Cr

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Prenosni zobniki**

Zobniki so ključni deli, ki prenašajo navor v reduktorju, zato morajo imeti visoko trdnost, odpornost proti utrujenosti materiala in odpornost proti obrabi. V tabeli 5 so prikazane lastnosti materiala 38NiCrMo5.

Material izdelave: **38NiCrMo5**

Tabela 5: Lastnosti materiala – jeklo38NiCrMo5

Lastnost	Vrednost
Kemična sestava	C: 0.35–0.45%, Cr: 0.90–1.20%, Mo: 0.15–0.30%, Ni: 1.30–1.80%, Mn: 0.40–0.70%, Si: 0.20–0.35%, P ≤ 0.035%, S ≤ 0.035%
Gostota	7.85 g/cm ³
Tališče	1425–1480°C
Trdota (Brinell)	170–250 HB
Tlak trajne obremenitve (Rp0.2)	600–800 MPa
Tlak popolnega razpada (Rm)	900–1100 MPa
Elastični modul (E)	210 GPa
Poškodljivost (A)	12–18%
Tegovina	850–1050°C (predelava v toplotni obdelavi)
Poškodljivost pri udarcu (Kv)	50–80 J
Kemična odpornost	Dobra odpornost proti koroziji, zlasti pri višjih temperaturah
Kovine po toplotni	Dobra odpornost na obrabo in udarne obremenitve

Vir: Viri podjetja Mega Metal

Za zobnike, kjer so potrebne visoke trdnosti in odpornost proti utrujenosti materiala, se uporabljajo jekleni materiali z dodatkom kroma, ogljika, niklja ali molibdena (slika 32).

Pri izdelavi zobnika je treba na mestu stika narediti zobnik tako, da ima veliko odpornost proti obrabi. Podnožje zoba mora imeti veliko čvrstost in trdnost ter odpornost proti udarnim silam. Zobniki so izpostavljeni obremenitvi na zvijanje in površinski pritisk na mestu stika dveh zobnikov. Pri konstrukciji sem bil pozoren na to, da material ne dovoli možnosti nastanka plastične deformacije, ker so segmenti, ki se odlomijo, zelo nevarni za brezhibno delovanje preostalega sistema. Zaradi tega redno vzdrževanje in servisiranje ter uporaba pravega maziva zelo vplivajo na življenjsko dobo samega sistema.



Slika 32: Jeklo 38NiCrMo5

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Ležaji**

Ležaji v reduktorjih morajo biti zmogljivi, da prenašajo težke obremenitve in omogočajo gladko delovanje pri velikih hitrostih (slika 33).



Slika 33: Ležaj

Vir: Lastni vir

Materiali:

Visoko trdno jeklo: najpogosteje se uporabljajo visokokakovostni jekleni materiali, kot je kromirano jeklo, ki omogoča dolgo življenjsko dobo.

- **Gredi in drugi kovinski deli**

Gredi prenesejo navor iz enega dela reduktorja v drugega, zato morajo biti zelo trdne in odporne proti obrabi in utrujenosti materiala.

Materiali:

Visoko legirano jeklo (npr. 4140, 4340): to jeklo imajo visoko trdnost in odpornost proti utrujenosti. Pri preračunu gredi se morajo upoštevati sile in oblike napetosti (normalna napetost Sigma in tangencialne napetosti Tau – več različnih napetosti, ki delujejo istočasno). Na podlogi izračuna in pridobljenih rezultatov se izbere pravi material izdelave. **Izbral sem jeklo 42CrMo** (slika 34). Odlikujejo ga velika trdnost, odpornost proti obrabi, čvrstost in možnost izvajanja fine obdelave. Gredi v sistemu so toplotno obdelane s postopkom kaljenja in popuščanja. Med tem procesom se najprej segrejejo na ustrezno temperaturo, nato pa potopijo v škatle z ogljikom, kjer poteka cementacija – nasičenje površine z ogljikom – s čimer se izboljšata trdota in obrabna odpornost površine. Zunanja oblika gredi vsaj 10 mm se izboljša z ogljikom in na ta način dobimo boljše lastnosti, materialni stroški pa so manjši kot pri nakupu drugega jekla. Tabela 6 prikazuje lastnosti materiala 42CrMo. (Jovanović, 2003)

Tabela 6: Lastnosti materiala – jeklo 42CrMo

Lastnost	Vrednost
Kemična sestava	C: 0.38–0.45%, Cr: 0.90–1.20%, Mn: 0.15–0.25%, Mn: 0.60–0.90%, Si: 0.20–0.35%, P ≤ 0.035%, S ≤ 0.035%
Gostota	7.85 g/cm ³
Tališče	1425–1540°C
Trdota (Brinell)	170–250 HB
Tlak trajne obremenitve (Rp0.2)	550–750 MPa
Tlak popolnega razpada (Rm)	850–1000 MPa
Elastični modul (E)	210 GPa
Poškodljivost (A)	12–20%
Tegovina	1000–1300°C (predelava v toplotni obdelavi)
Zračni hladilni koeficient	0.34 W/(m·K)
Poškodljivost pri udarcu (Kv)	50–100 J
Kemična odpornost	Dobra odpornost na oksidacijo in korozijo, zlasti pri večjih temperaturah

Viri: Viri podjetja Mega Metal



Slika 34: Jeklo 42CrMo

Vir: Lastni vir

- **Tesnila**

Tesnila so ključna za preprečevanje uhajanja olja in zaščito komponent pred vdorom onesnaževalcev ali vode.

Material:

PTFE (politetrafluoretilen): uporablja se za posebne vrste tesnil, ki zahtevajo visoko odpornost proti kemikalijam in visokim temperaturam.

- **Olje in maziva**

Olja in maziva so ključna za zagotavljanje dolge življenjske dobe reduktorja, saj zmanjšujejo trenje in preprečujejo obrabo.

- **Materiali, uporabljen pri eksploataciji:**

Maziva na osnovi sintetičnih olj. Maziva, ki so odporna proti visokim temperaturam ter omogočajo dobro hlajenje in mazanje v zahtevnem okolju.

Mazanje zobnikov in ležajev se izvaja s potapanjem. Kot sredstvo za mazanje uporabljamo sintetična olja z večjim odstotkom viskoznosti zaradi zagotavljanja boljših mazivnih lastnosti in daljše življenjske dobe reduktorja.

5.3 Rešitev za zmanjšanje hrupa in vibracij

Vibracije in hrup predstavljajo največje tveganje pri eksploataciji in učinkovitem delu reduktorja. Pogosto so v operativnem delu reduktorja prisotne sile in obremenitve, ki smo jih izračunali in upoštevali pri dimenzioniranju reduktorja. Vibracije so odvisne od več dejavnikov, ki bi lahko vplivali na zanesljivo delo. Vibracije je težko odstraniti v celoti, ampak se morajo preprečiti v največji meri, na katero lahko kot konstrukterji vplivamo. Predstavljajo tveganje za obrabo celotnega sistema, učinkovitost odstotka eksploatacije in na koncu same plastične deformacije.

Poleg reduktorja trpi celotni sistem, kot so prenosne gredi, ležaji (ki bodo najprej poškodovani), pogonski motor in vsi rotirajoči deli. Pri konstrukciji se mora upoštevati nekaj dejavnikov:

- izbira materialov z dobrimi lastnostmi za absorpcijo vibracij;
- optimizacija geometrije in zasnove reduktorja;
- vgradnja aktivnih sistemov za zmanjšanje vibracij;
- izolacija hrupa in vibracij;
- vzdrževanje in kakovostna montaža.

- **Izbira materialov z dobrimi lastnostmi za absorpcijo vibracij**

Uporaba materialov z visoko elastičnostjo. Pri izdelavi reduktorjev je priporočljivo uporabiti materiale, ki imajo dobro sposobnost absorpcije vibracij, kot so določene zlitine jekla, kompoziti ali posebne vrste plastike.

Vibracijsko dušenje. Vgradnja komponent, kot so gumijasti ali poliuretanski vložki, med povezane dele (npr. med reduktorjem in motorjem) lahko učinkovito zmanjša prenos vibracij.

- **Optimizacija geometrije in zasnove reduktorja**

Izboljšana geometrija zobnikov. Zobniki, ki se uporabljajo v reduktorjih, naj bodo zasnovani tako, da zmanjšajo nepravilnosti pri delovanju. Na primer izbira zobnikov s poševnimi zobmi z večjim premerom ali pod kotom, ki zmanjša trenje in vibracije.

Premer in obremenitev koles. Zmanjšanje velikosti zobnikov pri obremenitvah, ki zmanjšujejo vibracije pri velikih hitrostih.

- **Vgradnja aktivnih sistemov za zmanjšanje vibracij**

Aktivni dušilci vibracij. Vgrajevanje aktivnih dušilcev vibracij, ki prilagajajo svojo odpornost glede na zaznane vibracije, lahko bistveno zmanjša hrup in tresljaje. Ti sistemi uporabljajo senzorje, ki zaznajo vibracije in s pomočjo računalniških algoritmov prilagodijo odziv.

- **Izolacija hrupa in vibracij**

Uporaba elastičnih nosilcev in podlag. Elastični nosilci, kot so gumijasti ali kovinsko-gumijasti nosilci, lahko zmanjšajo prenos vibracij iz reduktorja na preostale strukture ladje. Pomembno je, da se upošteva ustrezno dimenzioniranje teh nosilcev glede na težo in vibracijske lastnosti reduktorja.

Konstruktivna zaščita. Namestitev dodatnih zaščitnih slojev (zvočnih in vibracijskih zaščitnih oblog) okoli reduktorja lahko pripomore k zmanjšanju prenosa hrupa in vibracij na preostali del ladje.

- **Vzdrževanje in kakovostna montaža**

Redno vzdrževanje. Z rednim vzdrževanjem, ki vključuje čiščenje, mazanje in preverjanje obrabe zobnikov ter drugih delov, se lahko ohrani nemoteno delovanje reduktorja in zmanjša obraba, ki bi pripeljala do povečanja hrupa in vibracij.

Natančnost montaže. Pri montaži je izjemno pomembno, da so vsi deli pravilno poravnani in uravnoteženi. Slaba montaža lahko povzroči dodatne vibracije.

Glavni poudarek poleg konstrukcije in procesa izdelave je pravilno izobraženo osebje, ki izvaja montažo in redna vzdrževanja. Vsi deli morajo biti pravilno centrirani, postavljeni na način, da se zagotovijo pravokotnost, osnost in vzporednost vseh rotirajočih in mirujočih delov. Kontrolirani elementi pri mehanski obdelavi vključujejo: kotnost zobnika glede na os gredi, osnost ležajnih sedišč na obeh straneh gredi, vzporednost ležajev gredi 1 in gredi 2 ter ploskovnost med spodnjim in zgornjim delom ohišja reduktorja na mestu spoja. Glavni poudarek je na zagotavljanju ustrezne natančnosti pri mehanski obdelavi, ki omogoča pravilno delovanje in dolgo življenjsko dobo. (Krajnc, 2016)

5.4 Rešitve za mazanje in tesnjenje

Mazanje in tesnjenje prestavljata najpomembnejši dejavnik pri vsakem strojnem sklopu (slika 35). Ker se v reduktorju pojavljajo velike obremenitve in zobniki med seboj ustvarjajo stik, se pojavlja površinski pritisk na mestu stika. Podnožje zoba zobnika je obremenjeno na upogibanje in površinski pritisk, nato se mora na teh mestih preprečiti segrevanje. Zagotoviti se mora spolzka in podmazana površina zaradi obrabe zoba in pojavljanja hrupa, vibracij in notranjih sil, ki povzročajo vzdolžne razpoke in na koncu plastično deformacijo. Maziva morajo zagotavljati odlične mazalne lastnosti za zmanjšanje trenja in obrabe med kontaktnimi površinami (veliko viskoznost, aditive z dodatki proti obrabi, lastnost hitrega ohlajanja zaradi zagotavljanja delovne temperature). Maziva morajo imeti dolgo življenjsko dobo. Sistem mora ostati homogen in čist. Nastanek rje se mora preprečiti v 100 odstotkih. Kot konstrukter za mazanje sem vzel sintetična olja z aditivom proti obrabi in na ta način neposredno vplival na večjo življenjsko dobo reduktorja.



Slika 35: Prikaz mazanja

Vir: Lastni vir

Izbira primernega maziva:

- **Sintetična olja.** Za ekstremne pogoje, kot so visoke temperature, visok tlak in vlažnost, so sintetična olja pogosto najboljša izbira. Sintetična olja imajo boljšo odpornost proti oksidaciji in razgradnji ter omogočajo boljšo zaščito pred korozijo.
- **Maziva z visokim temperaturnim območjem.** Pri reduktorjih, ki delujejo v ekstremnih temperaturah (npr. v motorjih ladij), je priporočljivo uporabiti maziva, ki so zasnovana za širok temperaturni razpon in ohranjajo svoje lastnosti v vseh pogojih.

- **Mazalna olja z dodatki proti obrabi (EP).** Olja, obogatena z aditivi proti obrabi (Extreme Pressure – EP), pomagajo zaščititi zobnike pred obrabo pri visokih obremenitvah in pod visokim tlakom.
- **Visoko viskozna olja.** Za preprečevanje uhajanja in zagotavljanje dobre zaščite pri nizkih temperaturah je priporočljivo uporabljati olja z višjo viskoznostjo.

Prenosna mazalna oprema:

- **Krožno mazanje.** Uporaba sistema za krožno mazanje, kjer se olje natančno distribuira na vse potrebne komponente, omogoča enakomerno mazanje, kar podaljša življenjsko dobo reduktorja.
- **Avtomatski sistemi za mazanje.** Avtomatski sistemi za mazanje omogočajo stalno in natančno distribucijo maziva brez potrebe po ročnem posegu, kar zmanjša možnost napak in zagotavlja optimalno delovanje.

Hlajenje maziva:

- **Ohlajevalni sistemi.** Reduktorji, ki delujejo pri visokih temperaturah, potrebujejo učinkovite sisteme za hlajenje maziv. Lahko se uporabijo hladilniki, ki ohlajajo olje skozi vodne ali zračne sisteme, kar pomaga pri vzdrževanju stabilne temperature in preprečevanju pregrevanja.

Filtracija maziva:

- **Filtracijski sistemi.** Namestitev filtrov za odstranjevanje umazanije in delcev iz maziva pomaga preprečiti poškodbe komponent in ohranja kakovost maziva. Uporaba visoko učinkovite filtracije je ključna za zaščito pred kontaminacijo, še posebej pri dolgotrajnih in zahtevnih operacijah.

Rešitve za tesnjenje reduktorja:

- **Mehanska tesnila.** Pri visoko obremenjenih reduktorjih se lahko uporabijo mehanska tesnila za večjo zaščito pred uhajanjem maziva ter preprečevanje vdora vode in nečistoč.
- **Kompozitna tesnila.** Za boljšo odpornost proti abraziji in koroziji lahko uporabimo kompozitna tesnila, ki so odporna proti visokim temperaturam in kemičnim vplivom. (Krajnc, Mazila in tesnila v strojništvu, 2015)

5.5 Mehanska obdelava na CNC-stroju

Po narejeni konstrukciji, preverjeni usklajenosti in izdelanih tehničnih risbah se postopek nadaljuje v fazo realizacije v proizvodnih procesih. Postopek poteka v šestih fazah, ki so:

- faza razreza materiala;
- faza sestavljanja;
- faza varjenja;
- faza barvanja;
- faza mehanske obdelave;
- faza merjenja.

Glavno tveganje za uspešno realizacijo predstavlja postopek CNC-obdelave. Pri procesu obdelave uporabljamo različna orodja, tehnologije in pristope, s katerimi zagotavljamo kakovost izdelka, seveda upoštevajoč varnost pri delu delavca in stroja. Postopki obdelave so: rezkanje, vrtanje lukenj in vtiskovanje navoja. Postopek se izvaja na rezkalnem stroju »WHQ 13/3 TOS VARNSDORF«, prikazanem na sliki 46.



Slika 36: Stroj WHQ 13.3

Vir: Viri podjetja Mega Metal

Stroj WHQ 13/3 je visokokakovostni 6-osni stroj, zasnovan za natančno obdelavo zahtevanih delov in komponent v industrijah, kot so ladjedelništvo, strojogradnja in avtomobilska industrija. Ponuja visoko natančnost, fleksibilnost in robustnost za obdelavo različnih materialov, kot so: jeklo, plastika, les ipd. Ohišje reduktorja (zgornji in spodnji del reduktorja) obdelujemo na tem stroju.

Postopek zasnove pristopa:

- **Sprejem kosa v obrat mehanske obdelave** je začetni pogoj za obdelavo (slika 37). Sestavljeni kos sprejmemo in ga predamo oddelku »Sprejeti identi za obdelavo«. Pri tem se naredi identifikacija kosa: ime kosa, številka kosa, material izdelave, dimenzije, teža, višina, širina. Po sprejemu je treba izpolniti evidenco o sprejemu in podpis odgovorne osebe. Kosi običajno pridejo dan prej, ker se trudimo izpolniti pogoje temperature zaradi preprečevanja možnosti dilatacija obdelanih površin. Temperatura bi morala biti okrog 20–22 °C.



Slika 37: Zgornje in spodnje ohišje

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Obračanje kosa na zaželeni pogled in zasnova pristopa obdelave**

Po prevzemu identa v obrat mehanske obdelave se kos najprej vizualno pregleda, nato pa se pripravi za obdelavo na tisti strani, ki je predvidena kot prva v tehnološkem postopku. Na podlogi tega se zasnuje celotna priprava za nadaljevanje obdelave. Po potrebi na mizo stroja postavimo pripomočke, kot so »vinkli«, zaradi zagotavljanja boljše fiksnosti, zmanjšanja vibracij in boljše kakovosti obdelanih površin (slike 38, 39, 40, 41 in 42).



Slika 38: Pripravljanje kosa za obdelavo

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 39: Obračanje na želeni pogled

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 40: Pripomočki (»vinkli«) za zagotavljanje boljše fiksnosti

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 41: Postavljanje zgornjega ohišja in vpenjanje

Vir: Viri podjetja Mega Metal

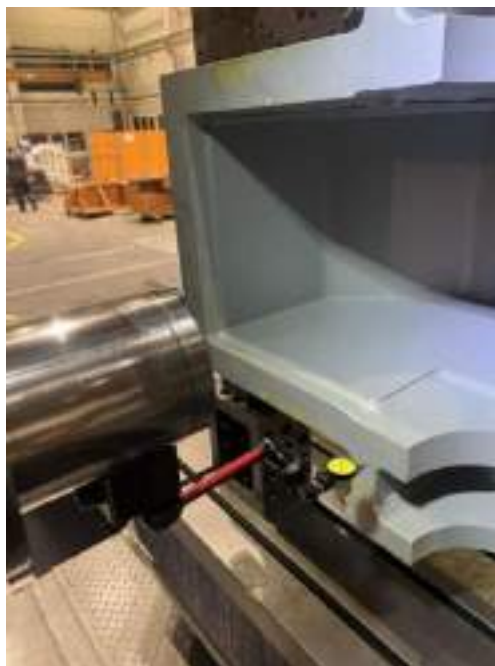


Slika 42: Vpenjalni elementi

Vir: Viri podjetja Mega metal

- **Pravilno centriranje in določitev nultih točk glede zahtev načrta**

Nulte točke določajo začetno referenčno pozicijo, iz katere stroj začne izvajati obdelovalni proces. To omogoča, da se vsi gibajoči deli orodja uskladijo z dimenzijami in geometrijo kosa, kar zagotavlja zanesljivost in natančnost obdelave (slike 43, 44 in 45).



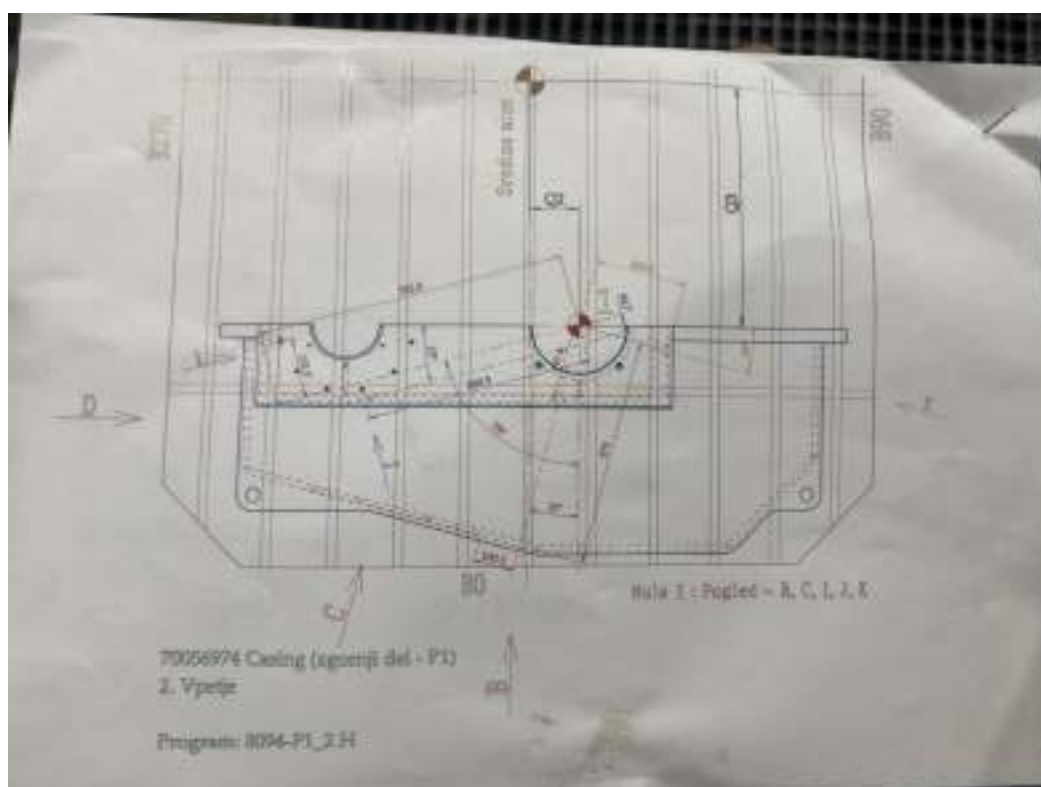
Slika 43: Postopek centriranja in preverjanja

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 44: Postopek enakomernega zategovanja

Vir: Viri podjetja Mega Metal

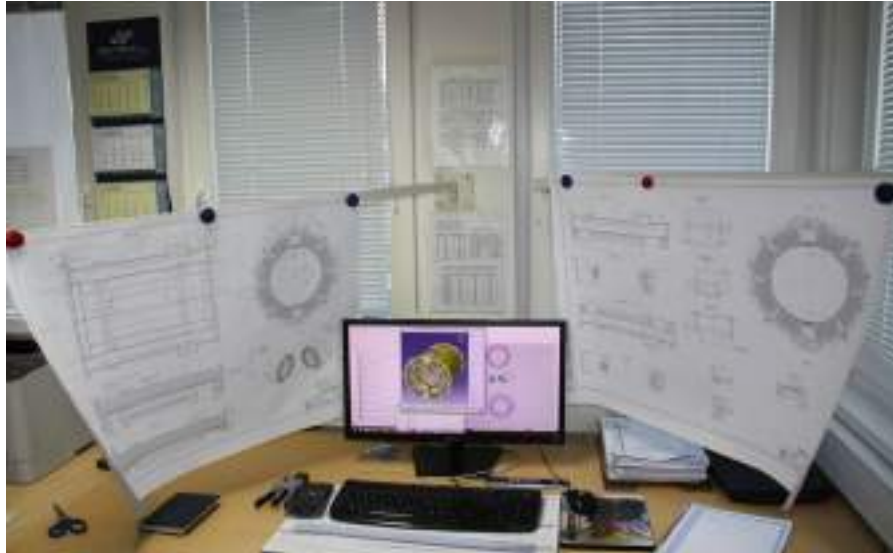


Slika 45: Podana navodila za centriranje

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Pripravljanje tehničnih risb**

Na podlogi tehničnih risb se določijo: vrsta obdelave (struženje, rezkanje, vrtanje ipd.), natančnost obdelave, površinska obdelava (brušenje kot visoka stopnja obdelave oziroma kakovosti obdelane površine) ali kaki drugi posebni postopki, kot sta toplotna in kemična obdelava (slika 45).



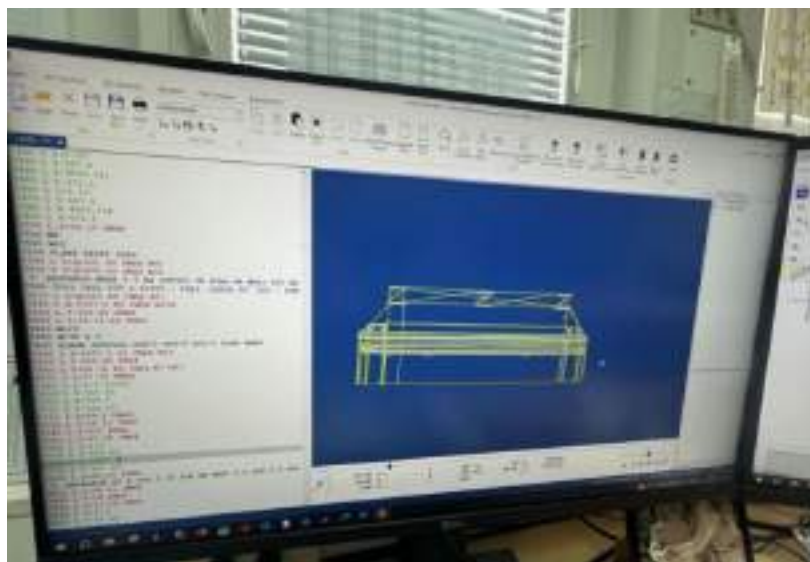
Slika 46: Pripravljanje dokumentacije za proizvodnjo

Vir: Viri podjetja Mega Metal

Izdelava programa

Na podlogi tehnične dokumentacije in 3D-modela programerski tim izdela program (sliki 47 in 48). V programu morajo biti jasno definirani:

- nulte točke;
- primerno orodje za obdelavo;
- vsi parametri obdelave, kot so pomiki in hitrosti;
- pravilno nastavljen trajektoriji orodja (zaradi preprečevanja naleta orodja na vpenjalne elemente);
- optimizacije in prilagoditve programa.



Slika 47: Izdelava programa – programsko okolje MasterCAM
Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 48: Določanje pravilne obdelave
Vir: Lastni vir

- **Nastavljanje orodja za obdelavo**

Na podlogi tehnične risbe in programa obdelave se nastavlja primerno orodje za nemoteno obdelavo. Orodje mora biti oštevilčeno in pripravljeno na vozičku za nemoteno uporabo. Zraven orodja mora biti listek z natančno vpisanimi meritvami orodja (dolžina in radij orodja). Pravilna izbira orodja je odvisna od materialnih lastnosti, kot je razvidno iz slik 49 in 50.



Slika 49: Orodje za obdelavo

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 50: Merilno orodje (ZOLLER) za umerjanje in podajanje dimenzij orodja

Vir: Viri podjetja Mega Meta

- **Pregledi in kontrole**

Vizualna kontrola omogoča preprečevanje neželene reklamacije in boljši pristop vodenja kakovosti. Vizualni pregled in vidne napake, kot so: razpoke, praske, korozija ali druge poškodbe kosa, se morajo identificirati in istočasno popraviti, kot je prikazano na sliki 51.



Slika 51: Vizualne kontrole

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Postavljanje kosa na stroj in pravilno vpenjanje**

Pri tem delu procesa moramo biti pozorni na to, da se kos pravilo dvigne, naloži na stroj in pravilno odloži. Vpenjalni elementi se postavljajo na način, da zagotovijo fiksnost, ponovljivost in varnost pri procesu obdelave operaterja in stroja (slika 57). Vpenjalni elementi ne smejo biti nastavljeni na površine, ki se obdelujejo. Pred procesom postavljanja vpenjala je obvezno pogledati tehnično risbo.

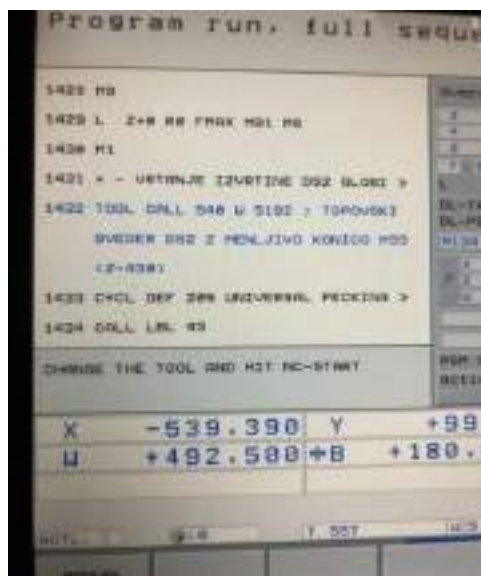


Slika 52: Pravilno vpenjanje in postavljanje vpenjala

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Operator**

Preden začne z obdelavo, mora operator zelo dobro razumeti načrt, vse kritične točke, ki lahko vplivajo na kakovost končnega izdelka. Mora se spoznati z vsemi lastnostmi materiala, ki ga obdeluje. Potrebna sta pravilna uporaba merilnega orodja in popolno razumevanje CNC-programa (slika 53).



Slika 53: CNC-program

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Obdelava**

Obdelava reduktorja je zapleten proces. Sestavljen je iz grobega rezkanja, vrtanja lukenj, globinskega vrtanja, vtiskovanja navoja in na koncu fine obdelave. Hrapavost obdelanih površin mora biti visoke kakovosti. Pri obdelavi se uporabljajo različna orodja, kot so: svedri, hitrorezne frezne glave, navadne frezne glave in čepna grezila, kot je razvidno iz slik 54, 55, 56, 57, 58, 59.



Slika 54: Rezkanje – zgornje ohišje reduktorja

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 55: Obdelava zgornjega ohišja in ohišja za ležaj 35 KB 03

Vir: Viri podjetja Mega Metal

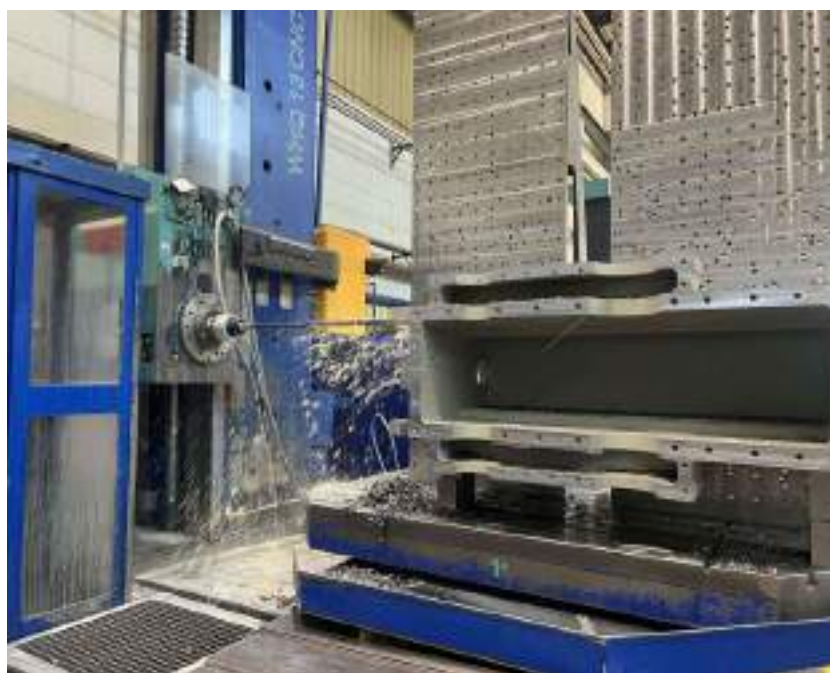


Slika 56: Obdelava spodnjega ohišja reduktorja
Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 57: Vrtanje lukenj za navoje M24
Vir: Viri podjetja Mega Metal

Sliki 58 in 59 prikazujeta globinsko vrtanje lukenj za filtracijo olja ($L = 1200\text{ mm}$)



Slika 58: Faza globinskega vrtanja s svedrom D35 mm

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 59: Vrtanje lukenj za filtracijo in čiščenje olja med obratovanjem reduktorja D35 mm

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Montaža spodnjega in zgornjega ohišja**

Po končani grobi obdelavi zgornjega in spodnjega ohišja ju je treba sestaviti za daljšo, končno obdelavo. Povezava med ohišji je izvedena z vijačno spojko (slike 60, 61 in 62).



Slika 60: Postavljanje palic za montažo zgornjega in spodnjega ohišja

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 61: Preverjanje stabilnosti palic in navoja M36

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 62: Sestavljeni reduktor

Vir: Viri podjetja Mega Metal

Končna (fina) obdelava reduktorja – predstavlja proces obdelave, v kateri kos obdelujemo na končne mere načrta. Postopek poteka na naslednji način:

- centriranje;
- preverjanje potrebnega dodatka za obdelavo;
- določanje referenčnih točk;
- uporaba merilnega orodja;
- končna obdelava;
- zapisovanje rezultatov obdelave;
- KPI-ji pri obdelavi.

V tej fazi morajo biti strojni režimi ustrezno določeni po simulaciji v MasterCamu. Debelina rezanja se mora prilagoditi, ampak ne sme biti večja od 0,05 mm zaradi kakovosti obdelane površine in natančnosti izvajanja postopka končne mehanske obdelave (sliki 63 in 64).



Slika 63: Fina oziroma končna obdelava reduktorja (luknje za mazanje in oljni kanali)

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 64: Uporaba orodja za obdelavo oljnih kanalov za ležaje

Vir: Viri podjetja Mega Metal

- **Pravilno odlaganje kosa s stroja na odlagalno mesto**

Po zaključeni obdelavi se kos spiha, vidno ostri robovi se spolirajo. Če kos gre na daljšo obdelavo, je treba izpolniti evidenco zaporednih operacij. Naredimo baze oziroma izhodišča za centriranje kosa za obdelavo drugega vpetja, nato kos odložimo na odlagalno mesto (sliki 65 in 66). S tem je postopek obdelave reduktorja na stroju WHQ 13/3 zaključen.



Slika 65: Pravilno odlaganje kosa na les zaradi preprečevanja poškodbe obdelanih površin

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 66: Čiščenje kovinskih odpadkov

Vir: Viri podjetja Mega Metal

5.6 Optimizacija postopka mehanske obdelave

V začetnem razvoju obdelave ohišja reduktorja smo uporabljali standardna orodja. Obdelavo oziroma rezkanje smo začeli z navadno frezno glavo Ø160 x 90°. Rezkanje je potekalo v dveh smereh po osi X (X+ in X-). Poskušali smo pri enem vpenjanju obdelati čim več strani reduktorja in odvzeti čim več materiala. Na ta način smo pridobili čas, ampak je prišlo do velikih obremenitev, ki so vplivale na dimenzije kosa. Po popuščanju iz vpenjalnih glav je prišlo do deformacij oblike. Pri taki obdelavi je prišlo do ogromno vibracij, hrupa, lomljenja rezilnega orodja, zmanjšanih pogojev za hitrejšo in kakovostnejšo obdelavo. Obdelavo smo ločili na tri dele: grobo, polfino in fino. Začeli smo s spremembo programa in rezilnega orodja. Določene geometrije orodja niso odgovarjale in so povzročale dodatne težave. Namesto Ø160 x 90° smo začeli uporabljati Ø160 x 45°. Pri uporabi frezne glave Ø160 x 45° smo pridobili večje odrezovalne hitrosti, večje odrezovalne špane, zmanjšane vibracije in boljšo kakovost obdelanih površin. Zmanjšali smo čas obdelave. Pri obdelavi smo uporabljali istosmerno rezkanje, s katerim smo obremenili še kos proti mizi stroja. Pri tem smo pridobili boljšo fiksnost in stabilnost za hitrejšo obdelavo (slike 67, 68, 69, 70).

Pri procesu vrtanja smo uporabljali topovske svedre, ki lahko prenašajo večje obremenitve in odrezalne hitrosti. Ampak pri procesu globinskega vrtenja je prišlo do tveganja krhkosti ploščic na samem orodju. Posledice so uničeno orodje, katastrofalna obdelava, ostanek orodja v luknji in nezmožnost popravila. Potem smo se odločili za predvrtanje s topovcem na zaželeno globino, ki ne predstavlja tveganja za kos in postopek obdelave. Odločili smo se za uporabo spiralnega HSS-svedra. Dobra stvar je, da smo s predvrtenjem pridobili 2-krat hitrejši postopek vrtanja in pravilno vodenje naslednjega orodja skozi luknjo. V programskem ciklu smo določili, da na vsakih 4 mm globine HSS-sveder Ø33 pride ven, da se sčisti, in na ta način preprečili lomljenje orodja ter pospešili kakovost obdelave (sliki 71 in 72).

Pri izdelavi navoja smo uporabljali orodja, ki delujejo brez odvzemanja materiala – to so vtiskovalni navojni svedri. Na ta način smo zmanjšali dodatno obremenitev silnic materiala, pridobili boljše mehanske lastnosti navoja, daljšo življenjsko dobo in zmanjšali čas obdelave.

V končni fazi uporabljamo fino frezno glavo, ki uporablja ploščice z manjšim radijem. Pri uporabi fine frezne glave je stična površina manjša in obdelava ustreza zahtevam. Tveganje pri nastanku hrupa in vibracij je izključeno.



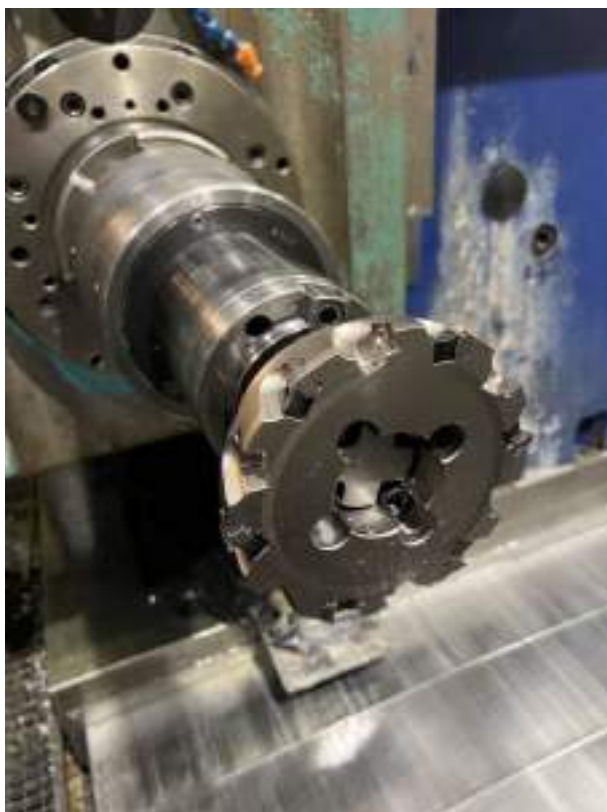
Slika 67: Groba frezna glava D160 x 45°

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 68: Nastanek neustrezne obdelave

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 69: Fina glava D160 X 90°

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 70: Razlika in vidno boljša kakovost z uporabo fine glave

Vir: Viri podjetje Mega Metal



Slika 71: Predvrtanje vodilnih lukenj s topovskim svedrom

Vir: Viri podjetja Mega Metal



Slika 72: Globinsko vrtanje lukenj za montažo spodnjega in zgornjega ohišja D37 mm x 600 mm

Vir: Viri podjetja Mega Metal

5.7 Merilni protokol

Merilni protokol za reduktor v procesu mehanske obdelave

Namen in cilj merjenja

Namen merilnega protokola je zagotoviti, da so deli reduktorja v procesu mehanske obdelave obdelani v skladu z zahtevami dimenzij, oblik in površinske kakovosti, ki so specifično določene v tehničnih risbah in specifikacijah. S tem se zagotovi pravilno delovanje reduktorja po zaključeni obdelavi, zlasti glede natančnosti montaže in zanesljivosti delovanja.

Obseg merilnega protokola

Merilni protokol zajema naslednje ključne korake v procesu mehanske obdelave reduktorja:

- pregled in kontrola vhodnih materialov;
- merjenje osnovnih dimenzij pred in po obdelavi;
- kontrola toleranc za vsako posamezno delovno operacijo;
- merjenje površinske kakovosti;
- kontrola končne obdelave in usklajenosti s tehničnimi risbami;
- spremljanje in beleženje odstopanj ter ukrepi za odpravo napak.

Merilni postopki

Vhodni material

Pred začetkom obdelave se izvede merjenje osnovnih dimenzij vhodnega materiala (npr. premer, dolžina, debelina stene). To vključuje uporabo ustreznih merilnih instrumentov, kot so:

- klasifikatorji in šablone za preverjanje dimenzij;
- ravnila za preverjanje ravnosti;
- mikrometri (slika 73).



Slika 73: Merilna orodja (mikrometri)

Vir: Viri podjetja Mega Metal

Kontrola toleranc

Za vsako posamezno dimenzijo reduktorja so določene specifične tolerance, ki jih je treba preveriti in upoštevati med obdelavo. Tolerance vključujejo:

- linearne tolerance (npr. dolžina, širina, premer);
- tolerance za geometrijske značilnosti (pravokotnost, kot, nagib).

Tolerance za površinsko kakovost (grobost površine, poškodbe). Te tolerance se preverijo z ustreznimi merilnimi instrumenti, kot so:

- ravninski merilci za preverjanje ravnine in odstopanj;
- profilometri za določanje površinske hrapavosti;
- geometrične šablone za preverjanje geometrijskih oblik.

3.4. Preverjanje površinske kakovosti

Površinska kakovost je ključnega pomena za delovanje reduktorja, še posebej pri stiku delov, kot so zobniki ali ležaji. Merjenja površinske hrapavosti vključujejo:

- meritve Ra (aritmetične srednje hrapavosti) s profilometri;
- kontrolo poškodb na površinah s svetlobnim mikroskopom (slika 74).



Slika 74: Merilni stroj Elkomat uporabljamo za merjenje površinske kakovosti obdelane površine (hrapavost)

Vir: Viri podjetja Mega Metal

Zaključna merjenja

Po končani obdelavi vseh komponent se izvede končna kontrola dimenzij, oblike in površinske kakovosti. Ob tem se preveri usklajenost s tehničnimi risbami in specifikacijami (sliki 75 in 76). Če so bila opravila opravljena znotraj predpisanih toleranc, se del označi kot pripravljen za montažo.



Slika 75: Konča faza merjenja
Vir: Viri podjetja Mega Metal

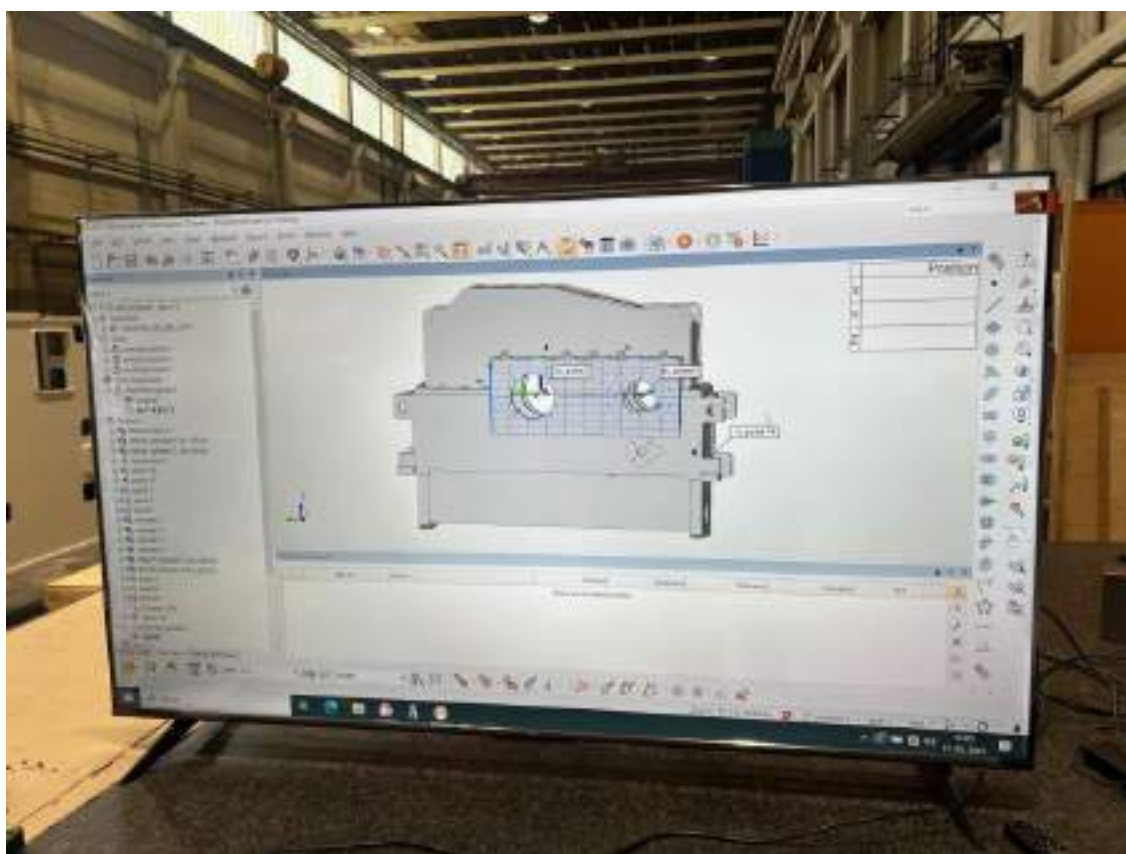


Slika 76: Merjenje dimenzij lukenj in soosnosti med dvema luknjama (merilni robot)

Dokumentacija in zapisovanje rezultatov

Za vsak merilni postopek je treba pripraviti ustrezno dokumentacijo. To vključuje:

- zapisovanje izmerjenih vrednosti;
- primerjavo izmerjenih vrednosti z dovoljenimi tolerancami;
- zapisovanje morebitnih odstopanj in korektivnih ukrepov;
- podpisovanje kontrolnih obrazcev s strani odgovornega operaterja;
- vse merilne rezultate, ki jih je treba arhivirati za kasnejše sledenje in obvladovanje kakovosti ter za morebitne reklamacije ali potrebe po dodatnih pregledih. Kot je razvidno iz slike 77, je pravilno dokumentiranje rezultata pomembno za ustrezno evidenco in izboljšanje vodenja sistema kakovosti po ISO 9001:2025.



Slika 77: Program za ustrezno analizo in zapisovanje merilnih rezultatov

5. Odstopanja in ukrepi

Če se pri meritvah ugotovijo odstopanja od sprejemljivih toleranc, je treba takoj izvesti ukrepe, ki lahko vključujejo:

- korekcijo nastavitve CNC-stroja;
- zamenjavo orodja, če je prišlo do obrabe;
- ponovno preverjanje materiala ali napak v procesu obdelave;
- ponovno izvajanje meritev za zagotovitev pravilnosti popravljene obdelave;
- v končni fazi se merilni protokol podpiše in pusti zraven kosa pri izvozu za stranko.

V tabeli 7 je prikazan končni merilni protokol, podpisan s strani nadzornika kakovosti.

Tabela 7: Merilni protokol reduktorja

QP 141 000						
	Številka naročila		Inšpekcijski certifikat		Tip zobnika:	Naročnik
	Material		Izdelano po standardu. DIN EN 10204 - 3.1 Montaža ohišja Housing Assembly		Številka strani:	
Skupina za montažo ohišja			Številka načrta: 31351251/0A		Serijska številka	
Nr.						
E						
E	900,00					
F	✓				[C7]	
F	0,01/100				[D7]	
F	— 0,02/100				[D7]	
F	0,1/1000 CZ H				4x	
G	1350,00					

K	Ø 22 H12		⊥		⊥		
L	Ø 32 H12		⊥		⊥		
KL	⊙ Ø 0,1 K-L						

Nr.		
M		☐ Vrstni red OK
N		☐ Vrstni red OK
O		☐ Vrstni red OK
P		☐ Vrstni red OK
Q		☐ Vrstni red OK

1.1.58 100% vizualni pregled, vse manjše luknje so porate in navojni

AT = zunaj tolerance

Q = dokumentacija narejena po poti izpisa načrta, na katerem je označena vsaka luknja/navoj, podpis in datum tehnologa kakovosti

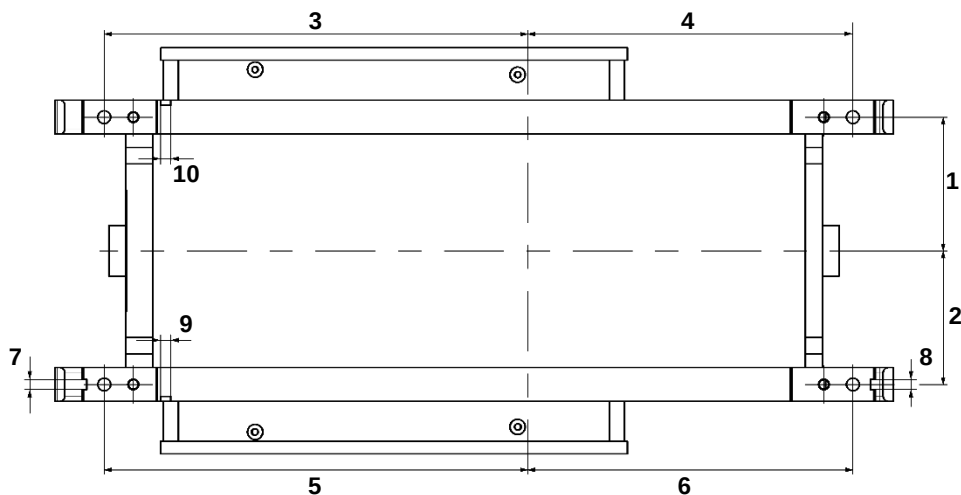
Dokumentacija po poti načrta, na katerem je izrezana vsaka odprtina/navoj, podpis in datum kontrolorja

Dodatne informacije

Proizvodnja			Merilni tehnolog	Žig podjetja
Kontrolor	Datum	Operator		

	Številka naročila	Inšpekcijski certifikat Izdelano po standardu. DIN EN 10204 - 3.1 Montaža ohišja Housing Assembly	Vrsta zobnika	Naročnik
	Material		Številka strani:	
Skupina za montažo ohišja		Številka načrta: 31351251/0A	Serijska številka	

Skizze / Sketch:



Nr.	Nazivna mera	1.1.59 Toleranca	1.1.60 Dejanska velikost	1.1.61	1.1.62 Nazivna mera	1.1.63 Toleranca	1.1.64 Dejanska velikost	AT
1	1.1.65 124,00	+0,25 -0,25	1.1.66	1.1.67	1.1.68 850,00	+0,25 -0,25	1.1.69	

2	1.1.70 124,00	+0,25 -0,25	1.1.71	1.1.72	1.1.73 950,00	+0,25 -0,25	1.1.74	
3	1.1.75 950,00	+0,25 -0,25	1.1.76	1.1.77	1.1.78 85000	+0,25 -0,25	1.1.79	
7	1.1.80 30 H7	+0,021 0,0	1.1.81	1.1.82	1.1.83 30 H7	+0,021 0,0	1.1.84	
8	1.1.85 30 H7	+0,021 0,0	1.1.86	1.1.87	1.1.88 30 H7	+0,021 0,0	1.1.89	

Nr.	1.1.90 Oznaka	1.1.92 Nazivna velikost	1.1.93 Toleranca	1.1.94 Dejanska velokost	1.1.95
	1.1.91				
11			OK		
12					
13					
14		⊕			
15			OK		
16					
17					
18		⊕			

Podjetje			Merilni tehnolog	
Dobavitelj	Datum	Operater		

				Žig podjetja
--	--	--	--	--------------

Viri: Viri podjetja Mega Metal

6 VZDRŽEVANJE IN ŽIVLJENJSKA DOBA

6.1 Strategija vzdrževanja reduktorjev

V ladjedelništvu, kjer so reduktorji ključni za prenos moči z motorja na propelerje in druge kritične sisteme, je učinkovito vzdrževanje nujno za zagotavljanje zanesljivega delovanja ladje, podaljšanje življenjske dobe opreme in preprečevanje nepredvidenih okvar, ki lahko povzročijo drage poškodbe in daljše izpade.

Strategija vzdrževanja reduktorjev v ladjedelništvu mora biti celovita, preventivna in proaktivna. Kot je prikazano na sliki 78, so vzdrževanje in preizkusi delovanja reduktorja ključnega pomena za dolgotrajnost izdelka.



Slika 78: Sistemi vzdrževanja

Vir: Vir podjetja Mega Metal

Preventivno vzdrževanje

Preventivno vzdrževanje je najučinkovitejši pristop za zagotavljanje dolgoživosti in zanesljivosti reduktorjev. Ta pristop vključuje redne pregleda, čiščenje in servisiranje sistemov, da se preprečijo večje okvare. Glavni elementi preventivnega vzdrževanja so:

Redni pregledi in diagnostika:

- pregled in testiranje olja (stanje, nivo, prisotnost onesnaževalcev ali kovinskih delcev, ki bi lahko kazali na obrabo notranjih delov);
- vizualni pregledi naprave za morebitna puščanja, poškodbe ali nepravilnosti v delovanju;
- merjenje temperature reduktorja med delovanjem (previsoka temperatura je lahko znak težav s hlajenjem ali notranjim trenjem);
- preverjanje tesnjenj in spojev za morebitne puščanje;
- preverjanje vibracij z uporabo vibroanalize za odkrivanje nepravilnosti, kot sta neravnovesje ali obraba zobnikov.

Zamenjava olja in filtrov. Redno menjavanje olja v reduktorju je ključno za preprečevanje prekomerne obrabe in zagotavljanje pravilnega hlajenja. Menjava olja naj bo opravljena skladno s priporočili proizvajalca, običajno po določenem številu delovnih ur ali na letni ravni. Prav tako sta priporočljiva redno čiščenje in zamenjava filtrov.

Preverjanje delovanja hladilnih sistemov. Redni pregledi hladilnega sistema so nujni, saj prekomerno segrevanje lahko vodi do okvar. Redni pregledi hladilnega medija, črpalk in cevovodov so ključni za preprečevanje napak.

Napredno in proaktivno vzdrževanje

Napredno vzdrževanje vključuje uporabo naprednih tehnik za odkrivanje in preprečevanje okvar, še preden pride do resnih težav. To vključuje:

- **vibroanalizo in diagnostične sisteme:** redni pregledi vibracijskega profila reduktorja omogočajo zgodnje odkrivanje nepravilnosti. Analiza vibracij lahko pomaga pri prepoznavanju težav z zobniki, ležaji ali drugimi komponentami, ki se lahko razvijejo v resnejše težave, če jih ne obravnavamo pravočasno;
- **temperaturno in oljno analizo:** redno spremljanje temperature in lastnosti olja v reduktorjih omogoča odkrivanje težav, kot so pregrevanje ali kontaminacija olja. Na podlagi teh podatkov lahko predvidimo potrebo po zamenjavi olja, menjavi tesnil ali pregledu notranjih delov.

Popravilo in zamenjava komponent

Pomanjkljivosti pri proizvodnji ali napake pri delovanju: ko se pri pregledu in analizi pojavijo napake, je pomembno hitro ukrepati in popraviti ali zamenjati poškodovane komponente, preden se težava poslabša. Pogoste težave vključujejo obrabo zobnikov, poškodbe tesnil, uhajanje olja ali nepravilnosti pri hlajenju.

Servisiranje in popravilo pri okvarah

Če pride do okvare, je treba hitro ugotoviti vzrok in sprejeti potrebne ukrepe za popravilo. V primeru poškodb zobnikov, ležajev ali drugih notranjih komponent je treba opraviti popolno demontažo, pregled in zamenjavo delov.

Nadzor in usklajevanje s proizvajalci in dobavitelji

Sodelovanje s proizvajalci in dobavitelji reduktorjev je ključno za zagotavljanje kakovostnega vzdrževanja. To vključuje:

- prejemanje tehničnih informacij, posodobitev o novih praksah vzdrževanja, nadgradnjah sistema in morebitnih opozorilih o okvarah;
- zagotavljanje dostopa do originalnih nadomestnih delov in specifičnih servisnih navodil, da se ohranijo zmogljivost in dolgotrajnost reduktorjev;
- usmerjanje k iskanju morebitnih težav z dizajnom reduktorjev in odpravljanju teh napak v prihodnjih proizvodnjah.

Izobraževanje in usposabljanje osebja

Usposobljeni tehnični kader je ključ do uspešnega izvajanja strategije vzdrževanja. To vključuje:

- redno izobraževanje in usposabljanje za najnovejše tehnike vzdrževanja, diagnostiko in popravila;
- razumevanje pomembnosti pravočasnega ukrepanja in prepoznavanja zgodnjih znakov okvar;
- znanje o postopkih za varno in učinkovito uporabo reduktorjev ter izvajanje pravilnega vzdrževanja. (Novak, 2018)

6.2 Ocenjevanje življenjske dobe in analiza obrabe

Analiza obrabe reduktorjev

Obraba reduktorjev se začne z začetno fazo, ko pride do stika med zobniki, ležaji in drugimi gibajočimi se deli. V tem procesu lahko nastanejo različni tipi obrabe, ki vplivajo na delovanje in življenjsko dobo reduktorja. Glavni tipi obrabe so:

- **Obraba zobnikov.** Zobniki v reduktorju so podvrženi obrabi na upogibanje in površinski pritisk.
- **Pitting (pikanje).** Površinska poškodba zobnika, ki se pojavi zaradi prekomernih napetosti in vibracij med prenosom moči;
- **Obraba zaradi trenja.** Dolgotrajno delovanje pri visokih temperaturnih pogojih ali ob pomanjkanju ustreznega mazanja lahko povzroči postopno obrabo zobnikov;
- **Prekomerna obraba zobnikov zaradi nepravilne geometrije.** Napake pri izdelavi ali montaži zobnikov lahko povzročijo neravnotežje in nepravilno porazdelitev obremenitve;
- **Obraba ležajev.** Ležaji v reduktorju so natančni in morajo vzdrževati stalno mazanje, da bi preprečili prekomerno obrabo. Najpogostejši vzroki za obrabo ležajev vključujejo:
 - prekomerno segrevanje, ki povzroči izgubo mazivnih lastnosti;
 - slabo kakovost olja ali kontaminacijo z onesnaževali;
 - prekomerne obremenitvene udare, ki se lahko pojavijo med izrednimi pogoji obratovanja,
- **Obraba tesnil.** Tesnila preprečujejo uhajanje olja iz reduktorja in zaščitijo notranje komponente pred umazanijo in vodo. Obraba tesnil je lahko posledica:
 - staranja materiala tesnila;
 - povečanih obremenitev ali nenadnih temperaturnih sprememb;
 - nezadostnega vzdrževanja, ki omogoči, da se tesnila obrabijo ali poškodujejo.

Dejavniki, ki vplivajo na obrabo in življenjsko dobo reduktorja

Na obrabo in življenjsko dobo reduktorja v ladjedelništvu vpliva več dejavnikov. Glavni dejavniki so:

- **Obremenitve in delovni pogoji.** Reduktorji v ladjedelništvu so pogosto izpostavljeni visokim obremenitvam, neprekinjenemu delovanju in ekstremnim delovnim pogojem (morska voda, sol, spremembe temperature). Visoke obremenitve in dolgotrajno obratovanje brez dovolj dolgih premorov za hlajenje lahko pripeljejo do hitre obrabe notranjih komponent.
- **Kakovost in vrsta maziv.** Kakovost olja in maziv ter ustrezno mazanje notranjih komponent reduktorja sta ključnega pomena za zmanjšanje trenja in preprečevanje obrabe. Zastarela ali kontaminirana maziva lahko povzročijo prekomerno trenje, ki pospeši obrabo zobnikov, ležajev in tesnil.
- **Natančnost montaže in izdelave.** Napake pri izdelavi reduktorja ali nepravilna montaža lahko povzročijo neravnovesje, povečano obrabo ali poškodbe komponent, kar skrajša življenjsko dobo reduktorja. Preverjanje in zagotavljanje natančne montaže in ustreznih toleranc sta ključnega pomena.
- **Izvajanje vzdrževanja.** Redno in pravočasno vzdrževanje, vključno z menjavo olja, preverjanjem tesnil in čiščenjem notranjih delov, lahko bistveno podaljša življenjsko dobo reduktorja. Nepravilno vzdrževanje, kot sta zanemarjanje hladilnih sistemov ali neustrezno mazanje, povečuje tveganje za okvare.
- **Ocenjevanje življenjske dobe reduktorja**

Za pravilno oceno življenjske dobe reduktorja je treba spremljati ključne parametre in izvajati napredne diagnostične tehnike. Glavni pristopi za ocenjevanje življenjske dobe vključujejo:

- **Spremljanje in analizo olja.** Redna analiza olja omogoča prepoznavanje znakov obrabe, kot so kovinski delci ali onesnaževala, ki bi lahko kazali na obrabo zobnikov ali ležajev. S to analizo lahko ocenimo, ali je treba zamenjati olje ali opraviti dodatna popravila. (Petrović, 2017)

6.3 Predlogi za podaljšanje življenjske dobe

Za podaljšanje življenjske dobe reduktorja v ladjedelništvu je ključnega pomena izvajanje preventivnega vzdrževanja, rednih pregledov in uporabe ustreznih materialov in tehnologij.

Redno vzdrževanje in pregled sestavnih delov:

- **Preventivni pregledi.** Uvedite redne preglede reduktorja, da bi odkrili morebitne težave, kot so obraba zobnikov, puščanje olja ali segrevanje. Pregledi naj vključujejo tudi preverjanje tesnil, zobnikov in drsnih ležajev.
- **Čiščenje in mazanje.** Redno čiščenje reduktorja in zamenjava olja sta ključna za ohranjanje njegovega optimalnega delovanja. Preverite stanje olja, da preprečite prekomerno obrabo zaradi slabe kakovosti maziva.

Uporaba naprednih materialov

- **Kovinske prevleke in zaščita proti koroziji.** Reduktorje je priporočljivo zaščititi z materialnimi prevlekami, ki zmanjšujejo korozijo in obrabo, še posebej pri izpostavljenosti morski vodi in vlagi.

Upravljanje temperature:

- **Kakovostno hlajenje.** Previsoka temperatura lahko skrajša življenjsko dobo reduktorja. Uporabite učinkovite sisteme za hlajenje (npr. hladilne naprave ali ventilatorje), da zmanjšate toplotne obremenitve.
- **Redno spremljanje temperature.** Vgrajevanje temperaturnih senzorjev, ki omogočajo spremljanje delovnih temperatur, je koristno za zgodnje zaznavanje pregrevanja.

Izboljšanje operativnega okolja

- **Nadzor nad obremenitvijo.** Pomembno je, da reduktorji ne delujejo pod pretirano obremenitvijo. Spremljanje in optimizacija obratovalnih parametrov, kot sta hitrost in navor, lahko preprečita prezgodnjo obrabo.
- **Vibracije in hrup.** Zmanjšanje vibracij z natančno montažo in uravnoteženjem komponent lahko podaljša življenjsko dobo. Prekomerne vibracije in hrup pogosto kažejo na težave z notranjimi komponentami.

Uporaba naprednih tehnologij za diagnostiko:

- **Vgrajeni senzorji in spremljanje stanj.** Implementacija tehnologij, kot so senzorji za merjenje vibracij, temperature in tlaka, omogoča natančno spremljanje stanja reduktorja v realnem času.
- **Analiza olja.** Redno testiranje mazalnega olja na prisotnost kovinskih delcev lahko pomaga pri zgodnjem odkrivanju obrabe komponent.

Izobraževanje in usposabljanje osebja:

- **Usposabljanje tehnikov.** Tehnično osebje naj bo redno usposobljeno za prepoznavanje zgodnjih znakov obrabe in drugih težav, ki lahko vplivajo na reduktorje. Dobra praksa je tudi izvajanje simulacij za hitro prepoznavanje in reševanje težav. (Kovač, 2019)

6.4 Predlogi za izboljšanje vzdrževanja

Za izboljšanje vzdrževanja reduktorja v ladjedelništvu, kjer so pogoji zahtevni, je ključno, da se vzdrževanje osredotoči na preprečevanje napak, podaljšanje življenjske dobe komponent in zagotavljanje nemotenega delovanja v težkih pogojih.

Izdelava in izvajanje preventivnega vzdrževanja:

- **Uvedba rednih pregledov in nalog.** Določite natančen program preventivnega vzdrževanja, ki vključuje periodične preglede in zamenjavo ključnih komponent (mazalna olja, tesnila, zobniki, ležaji itd.). Preverjanje vsaj vsakih 3–6 mesecev je priporočljivo, odvisno od intenzivnosti obratovanja.
- **Učinkovita dokumentacija.** Vzpostavite centraliziran sistem za beleženje vseh vzdrževalnih nalog, analiz in popravil, da boste lažje sledili stanju vsakega reduktorja in zgodovini vzdrževanja.

Optimizacija mazanja in hlajenja:

- **Zmanjšanje obrabe s stalnim nadzorom olja.** Razvijte program za redno spremljanje stanja mazalnega olja, kjer se izvaja analiza olja (testiranje na kovinske delce, viskoznost, prisotnost kontaminantov). Na podlagi teh analiz izvedite pravočasno menjavo olja in čiščenje notranjih delov.
- **Uporaba naprednih maziv.** Razmislite o uporabi naprednih sintetičnih maziv, ki omogočajo boljše hlajenje, manjšo obrabo in daljšo življenjsko dobo.

- **Redno preverjanje in čiščenje hladilnih sistemov.** Preverite učinkovitost hladilnih sistemov, kot so hladilniki olja, ter jih redno čistite, da preprečite pregrevanje in zmanjšate tveganje za poškodbe.

Uporaba napredne tehnologije za spremljanje stanja:

- **Vgrajevanje senzorjev za spremljanje stanja.** Namestite senzorske sisteme za spremljanje ključnih parametrov, kot so temperatura, tlak, vibracije in navor. Tako boste v realnem času zaznali nepravilnosti, ki bi lahko vodile do težav.
- **Sistemi za prediktivno vzdrževanje (PM).** Implementirajte programske rešitve za prediktivno vzdrževanje, ki s pomočjo analiz podatkov napovedujejo potrebo po zamenjavi komponent ali popravilih. To omogoča pravočasno ukrepanje še pred napako.
- **Analiza vibracij.** Namestite naprave za merjenje vibracij, saj nenormalni vzorci vibracij lahko kažejo na težave z ležaji, zobniki ali drugimi komponentami reduktorja.

Izobraževanje in usposabljanje osebja:

- **Tehnična usposobljenost in izobraževanje.** Poskrbite, da bodo tehnični delavci redno usposobljeni za izvajanje naprednih diagnostičnih postopkov in uporabe naprednih orodij za spremljanje stanja. Prav tako naj bodo obveščeni o najboljših praksah za popravila in vzdrževanje.
- **Simulacije napak in usposabljanje na terenu.** Redno izvajajte simulacije napak in težav v delovnem okolju ter omogočite usposabljanje za hitro obvladovanje težav.

Redno čiščenje in zaščita pred korozijo:

Preprečevanje kopičenja onesnaževal. Zmanjšanje onesnaževal (vode, prahu, soli) in redno čiščenje zunanjih delov reduktorja pomaga zmanjšati nevarnost poškodb zaradi korozije in umazanije.

Uporaba protikorozijskih premazov. Delite usmeritev za redno preverjanje in nanesite protikorozijske premaze na dele, ki so izpostavljeni morski vodi ali vlagi, da preprečite nastanek rje.

Izboljšanje obratovalnih pogojev:

- **Spremljanje in optimizacija obremenitve.** Redno spremljate obremenitev reduktorja in preprečite dolgotrajno delovanje pri prekomernih obremenitvah. Znižanje obremenitve pri daljših obratovanjih zmanjšuje obrabo in podaljšuje življenjsko dobo.
- **Preprečevanje napak pri montaži.** Poskrbite, da bodo vsi deli pravilno montirani in usklajeni, saj napačna montaža povzroči prezgodnjo obrabo ali poškodbe.

Razvijanje učinkovite strategije za zamenjavo komponent:

- **Proaktivna zamenjava obrabljenih komponent.** Uvedite sistem, ki omogoča zgodnje odkrivanje obrabljenih komponent in njihovo zamenjavo pred nastankom večjih težav.
- **Skladiščenje rezervnih delov.** Uredite dobro založeno skladišče rezervnih delov, da se hitro zamenjajo poškodovane komponente brez dolgotrajnih zastojev.

Učinkovita komunikacija in timsko sodelovanje

- **Povečajte usklajenost med oddelki.** Z usklajenimi komunikacijskimi protokoli in rednimi sestanki med oddelki (tehnični, operativni, logistični) zagotovite, da se vsi vzdrževalni postopki izvajajo v skladu s standardi in v predvidenem času. (Horvat, 2020)

7 EKONOMSKA UPRAVIČENOST PROJEKTA

V podjetju smo oddali ponudbo za razvoj projekta konstrukcijske zasnove reduktorja. Ponudba je podana na način, da so se upoštevale vse faze izdelave do končnega izdelka: konstrukcijska zasnova, razrezi, sestavljanje, varjenje, programiranje, orodje, izdelava navoja ročno, mehanska obdelava in merilna kontrola. V tabeli 8 je prikazana začetna ponudba.

Tabela 8: Začetna ponudba

Index. ID 22-001	Kupec JATA	Številka načrta 1201	Neto teža zvarjenja 600 kg	Max dimenzije	Ponudba EUR
Opis faze dela	Ure	Čas izdelave	Norma	Izboljšave	
Konstrukcijska	40	40			500
Razrez	16	16			70
Sastava	30	30			80
Varjenje	30	30			100
Barvanje	2	2			40
Programiranje	8	8			200
Vpenjanje	1	1			10
Mehanska obdelava	40	40			300
Izdelava navojev	1	1			30
Robkanje	1	1			10
Montaža	12	12			200
Merilna kon.	8	8			300
SKUPAJ	189	189			42.970

V fazi izdelave smo ugotovili, da presegamo podane ure. Načeloma delamo minus, ker pride do izpada in proces zahteva nujne izboljšave. Stranko smo poskušali vprašati za upoštevanje večjega števila ur, ampak se ta ne strinja z novo ponudbo. Glede na faze in postopek smo rešitev našli pri optimizaciji CNC-obdelave ohišja in pri sestavi z uporabo priprav, ki podajajo boljšo ponovljivost. V tabeli 9 je prikazan izpad pri izdelavi reduktorja.

Tabela 9: Ugotavljanje verodostojnosti ponudbe in izpada podanih ur

Index. ID 22-001	Kupec JATA	Št. načrta 1201	Neto teža 600 kg	Max dimenzije	Ponudba EUR
Opis faze dela	Ure	Čas izdelave	Norma	Ure prej optimizacije	
Konstrukcijska	40	40		40	500
Razrez	16	16		16	70
Sastava	30	30		36	80
Varjenje	30	30		30	100
Barvanje	2	2		2	40
Programiranje	8	8		8	200
Vpenjanje	1	1		1	10
Mehanska obdelava	40	40		48	300
Izdelava navoja	1	1		1	30
Robkanje	1	1		1	10
Montaža	12	12		12	200
Merilna kontrola	8	8		8	300
SKUPAJ	189	189			42.970

Vir: Lastni vir

V daljši fazi razvoja smo poskušali poiskati, kje bi se dalo izboljšati proces in na katere načine bi poskušali zmanjšati število uporabljenih ur. Skozi optimizacijo postopka CNC-obdelave, konstantno spremljanje in uporabo drugačnega pristopa ter tudi tehnologije in orodja, s katerim smo obdelovali ident, je bil čas obdelave na CNC-stroju zmanjšan. Ident je bil prodan po isti ceni, ampak smo število podanih ur stranki v podjetju interno zmanjšali. Postavili smo normirani čas po postopku optimizacije, uporabili nove priprave, s katerim smo dobili ponovljivost, in zmanjšali čas pripravljanja in tudi vpenjanja. V tabeli 10 sta prikazana uspešnost pri procesu optimizacije in normirani čas izdelave.

Tabela 10: Končna listna in rezultati po končnem procesu optimizacije postopka

Index. ID 22-001	Kupec JATA	Št. načrta 1201	Neto teža 600 kg	Max dimenzije	Ponudba EUR
Opis faze dela	Ure	Čas izdelave	Optimizirano	Norma	
Konstruksijska	40	40			500
Razrez mat.	16	16			70
Sestava	30	30	10	20	80
Varjenje	30	30			100
Barvanje	2	2			40
Programiranje	8	8			200
Vpenjanje	1	1			10
Mehanska obdelava	40	40	10	30	300
Izdelava navoja	1	1			30
Robkanje	1	1			10
Montaža	12	12			200
Merilna kontrola	8	8			300
SKUPAJ	189	189			42.970

Viri: Lastni vir

Stranka je za izdelavo prototipa sama zagotovila material, ki ni vključen v ceno razvoja. Tudi tu smo prihranili določena denarna sredstva. Za celotno kakovost reduktorja in pravilno uporabljen material brez odpada smo odgovorni mi kot podjetje. Če bo stranka zadovoljna, bomo pridobili serijo 50 kosov na letnem nivoju in pogodbe za naslednjih 10 let. Glede na dolgoročnost pogodbe in možnosti pridobivanja serijske izdelave bo verjetno proces v prihodnosti zahteval večje optimizacije in še kakovostnejši pristop s strani celega podjetja.

7.1 Vgradnja reduktorja in preizkus delovanja

Za postopke vgradnje in preizkus delovanja reduktorja v samem obratovanju ladje je stranka zagotovila lastne monterje. Po posredovanju končnega izdelka stranki smo kot podjetje morali zagotoviti ustrezno obdelavo in izpolnjenje vseh zahtev načrta. Od stranke smo pridobili informacijo, da reduktor dela zelo dobro in da niso imeli težave pri vgradnji in samem obratovanju izdelka. Drugače bi izdelek poslali nazaj na popravilo, v smislu v reklamacije, ter bi na ta način popravili napake in izdelek poslali nazaj.

8 TRAJNOST

Enostopenjski reduktor s poševnimi zobmi je ena izmed pogostejše uporabljenih izvedb v industriji, kjer so pomembni zanesljivost, tiho delovanje in prenos večjih obremenitev pri zmernih hitrostih. Poševni zobniki omogočajo enakomernejši prenos sil kot čelni zobniki, saj pride do postopnega naleganja zob, kar zmanjšuje udarne obremenitve, vibracije in obrabo.

Trajnost reduktorja je v veliki meri odvisna od več dejavnikov. Najpomembnejši med njimi so kakovost materialov, natančnost obdelave zobnikov, mazalni sistem, obremenitveni režim in delovni pogoji. Zaradi večje kontaktne površine med zobmi, poševni zobniki omogočajo višjo nosilnost in s tem daljšo življenjsko dobo ob enakih obratovalnih pogojih v primerjavi s čelnimi zobniki.

Pri pravilno dimenzioniranem in vzdrževanem reduktorju, ki obratuje v normalnih industrijskih pogojih (ustrezna temperatura, vlaga, mazanje), je življenjska doba lahko tudi do 60.000–100.000 delovnih ur. V neugodnih pogojih, kot so visoka temperatura, kontaminacija maziva, pogosti zagoni/ustavitve cikla in preobremenitve, pa se ta doba lahko bistveno skrajša.

Dodatni prednosti enostopenjskih reduktorjev sta manjše število komponent in preprostost vzdrževanja, kar omogoča boljšo kontrolo nad obrabo in pravočasno zamenjavo obrabljenih delov. Pri poševnih zobnikih je treba posebno pozornost nameniti tudi aksialnim silam, ki nastajajo zaradi poševne postavitve zob in lahko vplivajo na obrabo ležajev, če niso ustrezno podprti.

Zaradi kombinacije tihega delovanja, visoke nosilnosti in enostavne zasnove so enostopenjski reduktorji s poševnimi zobmi primerna izbira za številne industrijske aplikacije, kjer sta zahtevani visoka stopnja zanesljivosti in dolga življenjska doba. Pri procesu konstruiranja je bil glavni poudarek na izbiri materiala, sistemu vzdrževanja in uporabi pravega maziva. Pri zadnjem operativnem procesu izdelave smo kot podjetje celi reduktor dali na antikorozijsko zaščito (ISO 19598 ZnNi60). Vse stične in obdelane površine smo premazali za dodatno zaščito pred izvozom. Vse dejavnike sem kot konstrukter moral upoštevati, da bi dobil trajnosten in operativno ustrezen izdelek.

9 SKLEP

Diskusija rezultatov

- **H1: Ustrezno izbrani materiali in pravilno dimenzioniranje komponent reduktorja bodo zmanjšali obrabo in podaljšali življenjsko dobo reduktorja.**

Ta trditev drži, ker so raziskave in inženirske prakse pokazale, da uporaba materialov z ustreznimi lastnostmi, kot so visoka trdnost na udarce, odpornost proti obrabi in nizki koeficient trenja, pripomore k boljšim zmogljivostim in daljši življenjski dobi reduktorjev.

Pravilno dimenzioniranje komponent reduktorja, kot so zobniki, gred in ležaji, je bistveno za zagotovitev pravilnega prenosa moči in preprečevanje prenapetosti ali prekomerne obrabe komponent. Nepravilno dimenzioniranje lahko privede do povečanega trenja, pregrevanja, hitre obrabe in posledičnega zmanjšanja življenjske dobe reduktorja.

- **H2: Optimizacija prestavnega razmerja in uporaba ustreznih zobnikov bosta izboljšali učinkovitost prenosa moči v ladji.**

Optimizacija prestavnega razmerja je pomembna in drži za zagotavljanje optimalnega prenosa moči v ladjarskih pogonskih sistemih. Prestavno razmerje določa, kako hitro se bo vrtilna hitrost (RPM) motorja prenesla na propeler ali drugo pogonsko napravo. Nepravilno izbrano razmerje lahko povzroči neučinkovit prenos moči, povečano porabo goriva, pregrevanje in povečano obrabo komponent.

Optimizacija pomeni izbiro idealnega razmerja, ki omogoča, da motor deluje v svojem optimalnem območju učinkovitosti, medtem ko zagotavlja potrebno hitrost in navor za ladjo. Preveč visoko ali prenizko prestavno razmerje lahko povzroči povečano obremenitev motorja, kar zmanjša njegovo dolgoživost in splošno učinkovitost sistema. S pravilno izbiro razmerja sem zmanjšal porabo energije in goriva.

- **H3: Vgradnja primerne maziva in primerna izbira tesnilnih elementov bosta bistveno zmanjšala trenje in posledično hrup ter vibracije v reduktorju.** Mazivo, ki ima ustrezno viskoznost, odpornost proti oksidaciji in dobro toplotno prevodnost, bo zagotovilo učinkovito hlajenje in zmanjšalo segrevanje komponent. Zmanjšanje trenja zmanjša tudi količino nastalih vibracij, saj se zmanjšajo udarni učinki, ki se pojavljajo pri nepravilnem delovanju komponent, povezanih z večjim trenjem.

Vse to posledično pripomore k večji energetski učinkovitosti, daljši življenjski dobi sistema in zmanjšanju hrupa, ki ga lahko povzroči trenje.

Tesnila, narejena iz visokokakovostnih materialov, kot so fluoropolimerni materiali ali elastomeri z visoko odpornostjo proti obrabi, lahko učinkovito preprečijo uhajanje maziva, kar povečuje stabilnost sistema in zmanjšuje potrebo po pogostem vzdrževanju. Pravilna izbira tesnil zagotavlja tudi, da so komponente zaščitene pred zunanjimi vplivi, ki bi lahko poslabšali delovanje reduktorja.

- **H4:** Trajnost v zasnovi reduktorjev v ladjedelništvu prispeva k večji učinkovitosti, daljši življenjski dobi in manjšemu okoljskemu vplivu

Pomembnost trajnosti v sodobni industriji: trajnost je postala ključni dejavnik v industrijskih procesih, saj vse več podjetij in proizvajalcev prepoznava potrebo po zmanjšanju okoljskega odtisa in dolgotrajni uporabi virov. Trajnost pomeni ne le ekološko odgovornost, temveč tudi ekonomsko in socialno stabilnost. Z vključevanjem trajnostnih praks v načrtovanje in delovanje sistemov, kot so reduktorji, lahko podjetja dosežejo višjo energetsko učinkovitost, manjše stroške in manjše vplive na okolje.

V primeru reduktorjev to pomeni izbiro materialov, proizvodnih procesov in komponent, ki so bolj trajnostni, s poudarkom na izboljšanju energetske učinkovitosti z dolgotrajnostjo materialov, ki zmanjšajo potrebo po pogostem vzdrževanju in zamenjavi.

Reduktorji kot strojni elementi so uporabljeni v vsaki sferi strojništva. Ladjedelništvo, avtomobilska industrija, industrija težkih strojev za površinske izkope in splošno strojništvo zahtevajo poseben pristop glede konstrukcijske zasnove in sistema vzdrževanja. Ustvarjajo velik prihranek podane energije pri ekspanziji in večjo življenjsko dobo pogonskih strojev. Konstrukcijska zasnova reduktorja v ladjedelništvu je ključnega pomena za zagotavljanje učinkovitosti, zanesljivosti in dolge življenjske dobe ladij. Reduktorji kot ključni sestavni deli mehanskih prenosov moči omogočajo prilagoditev hitrosti in navora med različnimi deli pogonskega sistema, s čimer se zagotavlja optimalno delovanje plovila. Pri njihovi zasnovi je treba upoštevati številne dejavnike, kot so obremenitve, okoljski vpliv, prostorska omejitev na ladji in zahtevana vzdržljivost. Dobre konstrukcijske rešitve vključujejo izbiro ustreznih materialov, optimizacijo oblik komponent in zagotavljanje možnosti preprostega vzdrževanja. Z napredkom tehnologije in uporabe naprednih simulacijskih orodij so možnosti za izboljšanje zasnove reduktorjev vse večje, kar omogoča učinkovitejše in trajnostne rešitve v ladjedelništvu.

10 LITERATURA

- Bučar, F. (2012). *Rojstvo države*. Ljubljana: Didakta.
- Hangzhou Yiding Transmission Machinery Co., L. (2021, Julij 31). *Funkcija in načelo delovanja reduktorja*. Retrieved from Hangzhou Yiding Transmission Machinery Co., LTD: <http://si.ydgearbox.com/info/the-function-and-working-principle-of-gear-red-62141488.html>
- Horvat, L. (2020). *Sodobne meetode vzdrževanja v industriji*. Celje: Tehnična fakulteta, Univerza v Celju.
- Jovanović, M. A. (2003). *Strojni materijali*. Kragujevac: Univerza v Kragujevcu.
- Jurić, I. (2001). *Elementi strojarstva 1*. Zagreb: Fakulteta strojarstva i brodogradnje.
- Jurić, I. (2005). *ELEMENTI STROJEVA 2*. Zagreb: Fakulteta strojarstva i brodogradnje.
- Kovač, J. (2019). *Optimizacija življenske dobe strojnih komponent*. Ljubljana: Slovenska družba za strojništvo.
- Krajnc, D. (2015). *Mazila in tesnila v strojništvu*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani.
- Krajnc, D. (2016). *Dušenje vibracij in zmanjševanje vibracij in hrupa v mehanskih sistemih*. Ljubljana: Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani.
- Novak, M. (2018). *Vzdrževanje strojev in naprav*. Maribor: Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru.
- Petrović, A. J. (2017). *Analiza obrabe in ocenjevanje življenske dobe mehanskih komponent*. Beograd: Tehnička založba Srbije.
- Slovenije, E. z. (2019, November 26). *Harmonizirani standardi z dne 26. 11. 2019*. Retrieved from Elektrotehniška zveza Slovenije: <https://www.ezs-zveza.si/2019/11/harmonizirani-standardi-z-dne-26-11-2019/>
- Šojat, D. (2006). *Osnove konstruiranja strojnih elementov (2. izd.)*. Zagreb: Univerza v Zagrebu.