

# Razvoj uređaja za ispitivanje instrumentacijskih cijevi na dnu reaktorske posude

---

Šikić, Bruno

Master's thesis / Diplomski rad

2014

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:869913>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Bruno Šikić**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Neven Pavković, dipl. ing.

Student:

Bruno Šikić

Zagreb, 2014.

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

Zahvaljujem se svome mentoru prof. Nevenu Pavkoviću na pruženoj pomoći i vodstvu tijekom izrade ovoga rada. Također bih se želio zahvaliti dr.sc. Danijelu Rohdeu na savjetima, neograničenoj pomoći i svom vremenu koje je odvojio za mene. Naposljetku, hvala mojim roditeljima Peri i Jadranki koji su mi omogućili da završim ovaj studij.

Bruno Šikić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



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

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

## SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD.....  | 1  |
| 2. Raščišćavanje zadatka .....  | 2  |
| 2.1. Tehnički upitnik .....   | 2  |
| 2.2. Definicija cilja.....  | 5  |
| 2.3. Konstrukcijski zahtjevi .....  | 6  |
| 2.4. Funkcijska dekompozicija.....  | 7  |
| 2.5. Morfološka matrica .....   | 8  |
| 3. Koncepti.....  | 9  |
| 3.1. Koncept 1 .....  | 9  |
| 3.2. Koncept 2 .....  | 11 |
| 3.3. Vrednovanje .....  | 12 |
| 4. Proračun.....  | 14 |
| 4.1. Proračun motora translacije .....  | 14 |
| 4.2. Proračun resolvera translacije .....   | 16 |
| 4.3. Proračun motora rotacije .....   | 17 |
| 4.4. Proračun resolvera rotacije.....   | 20 |
| 4.5. Proračun opruga .....  | 20 |
| 4.6. Proračun zupčanika .....   | 22 |
| 4.7. Proračun pneumatskog cilindra zaključavanja.....                                 | 25 |
| 4.8. Proračun svornjaka kotača .....  | 26 |
| 5. Prikaz pojedinih konstrukcijskih rješenja.....                                     | 28 |
| 5.1. Osiguranje uređaja od pomicanja.....   | 28 |
| 5.2. Pogon translacije .....  | 29 |
| 5.3. Prihvat sonde.....   | 30 |
| 5.4. Graničnik rotacije.....  | 30 |
| 5.5. Pogon rotacije .....   | 31 |
| 5.6. Eliminacija pogreške centriranja.....  | 31 |
| 5.7. Mehanizam JWM modula.....  | 32 |
| 6. Sljedivost u razvojnom projektu.....   | 33 |
| 6.1. Proširenje MDM-a .....   | 34 |
| 6.1.1. Prijedlog 1 .....  | 35 |
| 6.1.2. Prijedlog 2.....   | 35 |
| 6.1.3. Prijedlozi 3 i 4.....  | 35 |
| 6.2. Primjeri zapisa.....   | 36 |
| 6.2.1. Zahtjevi .....   | 36 |
| 6.2.2. Sljedivost dijelova informacija .....  | 38 |
| 6.2.3. Datoteke koje definiraju komponente .....                                      | 39 |
| 6.2.4. Dijagram funkcijske analize .....  | 40 |
| 6.2.5. Funkcije koje predstavljaju konstrukcijske probleme.....                       | 41 |
| 6.2.6. Komponente koje realiziraju zahtjeve i komponente koje realiziraju funkcije .. | 41 |
| 6.2.7. Struktura proizvoda.....   | 42 |
| 7. ZAKLJUČAK.....   | 44 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Dio funkcijske dekompozicije .....                           | 8  |
| Slika 2. Prikaz koncepta 1 .....                                      | 9  |
| Slika 3. Prikaz koncepta 2 .....                                      | 11 |
| Slika 4. Proračun opruge resolvera translacije .....                  | 21 |
| Slika 5. Proračun opruge resolvera rotacije .....                     | 21 |
| Slika 6. Proračun opruge klackalice .....                             | 22 |
| Slika 7. Proračun čelnika 1/2.....                                    | 22 |
| Slika 8. Proračun čelnika 2/2.....                                    | 23 |
| Slika 9. Proračun stožnika 1/2.....                                   | 23 |
| Slika 10. Proračun stožnika 2/2.....                                  | 24 |
| Slika 11. Prikaz zupčanika .....                                      | 24 |
| Slika 12. Prikaz svornjaka kotača .....                               | 26 |
| Slika 13. Prikaz osiguranja uređaja od pomicanja .....                | 28 |
| Slika 14. Prikaz pogona translacije .....                             | 29 |
| Slika 15. Prikaz prihvata sonde .....                                 | 30 |
| Slika 16. Prikaz graničnika rotacije.....                             | 30 |
| Slika 17. Prikaz pogona rotacije.....                                 | 31 |
| Slika 18. Prikaz elastične veze s okolinom .....                      | 31 |
| Slika 19. Prikaz mehanizma JWM modula .....                           | 32 |
| Slika 20. MDM za zapisivanje sljedivosti.....                         | 33 |
| Slika 21. Prijedlog proširenja MDM-a .....                            | 34 |
| Slika 22. Prikaz dijela čvorova liste zahtjeva.....                   | 36 |
| Slika 23. Ispunjenje zahtjeva 2.....                                  | 37 |
| Slika 24. Ispunjenje zahtjeva 12.....                                 | 38 |
| Slika 25. Prikaz jednostavne veze dokumenata .....                    | 38 |
| Slika 26. Prikaz komplicirane veze dokumenata .....                   | 39 |
| Slika 27. Prikaz poddomene: Datoteke koje definiraju komponente ..... | 40 |
| Slika 28. Primjer generiranog IBIS dijagrama .....                    | 41 |
| Slika 29. Zapis komponenta-zahtjev .....                              | 42 |
| Slika 30. Struktura proizvoda.....                                    | 43 |

---

**POPIS TABLICA**

|   |                                     |
|---|-------------------------------------|
| Tablica 1. Tehnički upitnik .....           | 2                                   |
| Tablica 2. Definicija cilja .....           | 5                                   |
| Tablica 3. Lista zahtjeva.....              | 6                                   |
| Tablica 4. Morfološka matrica .....         | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Tablica 5. Vrednovanje koncepata .....      | 13                                  |
| Tablica 6. Podaci za kuglično vreteno ..... | 14                                  |



## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

TAR-00-00-00\_00 Target Assy

## POPIS OZNAKA

| Oznaka            | Jedinica          | Opis  |
|-------------------|-------------------|---|
| a                 | mm                | Širina naslona svornjaka                      |
| $a_t$             | $\frac{mm}{s^2}$  | Potrebno ubrzanje sonde prilikom translacije  |
| b                 | mm                | Širina dodirne površine svornjaka i kotača    |
| $d_{kug}$         | mm                | Promjer središta kuglica kugličnog vretena    |
| $d_{svor}$        | mm                | Promjer svornjaka kotača                      |
| $F_{cil}$         | N                 | Sila pneumatskog cilindra                     |
| $F_v$             | N                 | Sila otpora ustaljene vožnje                  |
| $F_{rot}$         | N                 | Težina svih rotirajućih dijelova              |
| $g_i$             |                   | Težinski faktor kriterija vrednovanja         |
| h                 | mm                | Hod kugličnog vretena                         |
| $i_{reduktor}$    |                   | Prijenosni omjer reduktora motora translacije |
| $i_{reduktor1}$   |                   | Prijenosni odnos reduktora motora rotacije    |
| $i_{z1}$          |                   | Prijenosni odnos stožnika rotacije            |
| $i_{z2}$          |                   | Prijenosni odnos čelnika rotacije             |
| $J_{IDM}$         | $kgm^2$           | Moment otpora IDM modula                      |
| $J_{JWM}$         | $kgm^2$           | Moment otpora JWM modula                      |
| $J_{transl}$      | $kgm^2$           | Moment otpora translirajućih dijelova         |
| $J_{VR}$          | $\frac{kgm^2}{m}$ | Moment otpora vretena po metru vretena        |
| $K_i$             |                   | Ispunjenost kriterija vrednovanja             |
| $M_{EMrot}$       | Nm                | Potrebni moment motora rotacije               |
| $M_{EMtransl}$    | Nm                | Potrebni moment motora translacije            |
| $m_m$             | kg                | Masa matice                                   |
| $m_s$             | kg                | Masa IDM sonde                                |
| $m_u$             | kg                | Ukupna masa translirajućih dijelova           |
| $M_{ubrtransl}$   | Nm                | Moment ubrzanja translacije                   |
| $M_{ubrrot}$      | Nm                | Moment ubrzanja rotacije                      |
| $M_{ukpnotrot}$   | Nm                | Ukupni potrebni moment rotacije               |
| $M_{ukpnotransl}$ | Nm                | Ukupni potrebni moment translacije            |
| $M_{ustrot}$      | Nm                | Moment ustaljene vrtnje                       |
| $M_{usttransl}$   | Nm                | Moment ustaljene translacije                  |
| P                 | mm                | Uspon kugličnog vretena                       |

|                          |                                 |   |
|--------------------------|---------------------------------|---|
| $p_{\text{dop}}$         | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  | Dopušteni tlak na svornjaku                           |
| $P_{\text{EMrot}}$       | W                               | Snaga elektromotora rotacije                          |
| $P_{\text{EMtransl}}$    | W                               | Snaga elektromotora translacije                       |
| $p_{\text{unutarnji}}$   | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  | Pritisak na svornjaku na dodiru s kotačem             |
| $p_{\text{vanjski}}$     | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  | Pritisak na svornjaku na dodiru s nosačem             |
| $t_{\text{transl}}$      | s                               | Vrijeme ubrzanja translirajućih masa                  |
| $v_{\text{transl}}$      | $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$    | Potrebna brzina ispitivanja unutrašnjosti penetracije |
| w                        | $\frac{\text{N}}{\text{kN}}$    | Specifični otpori ustaljene vožnje                    |
| $\alpha_{\text{transl}}$ | $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ | Kutno ubrzanje vretena                                |
| $\alpha_{\text{rot}}$    | $\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ | Kutno ubrzanje rotirajućih dijelova                   |
| $\eta_{\text{brtva1}}$   |                                 | Gubici brtvljenja translacije                         |
| $\eta_{\text{brtva2}}$   |                                 | Gubici brtvljenja rotacije                            |
| $\eta_{\text{red1}}$     |                                 | Korisnost reduktora translacije                       |
| $\eta_{\text{red2}}$     |                                 | Korisnost reduktora rotacije                          |
| $\eta_{\text{VR}}$       |                                 | Korisnost kugličnog vretena                           |
| $\eta_{z1}$              |                                 | Korisnost para stožnika                               |
| $\eta_{z2}$              |                                 | Korisnost para čelnika                                |
| $\sigma_{\text{dop}}$    | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  | Dopušteno normalno naprezanje svornjaka               |
| $\sigma_{\text{f}}$      | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  | Naprezanje svornjaka uslijed momenta savijanja        |
| $\tau$                   | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  | Smično naprezanje svornjaka                           |
| $\tau_{\text{dop}}$      | $\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  | Dopušteno smično naprezanje svornjaka                 |

## **SAŽETAK**

Zadatak rada je projektirati i konstruirati uređaj za ispitivanje BMI penetracija na dnu reaktorske posude. Za potrebe raščišćavanja zadatka napravljen je tehnički upitnik iz kojega je proizašla lista zahtjeva. U fazi koncipiranja napravljena je funkcijska dekompozicija i morfološka matrica iz koje su generirana dva koncepta od kojih je nakon provedene evaluacije odabran jedan. Za sve kritične dijelove provedena je provjera s obzirom na mehaničku čvrstoću. Za kraj je izrađen 3D model cijelog uređaja u programu Autodesk Inventor 2014, kao i pripadajući sklopni crtež.

Ključne riječi: Manipulator, ispitivanje, BMI penetracija

## **SUMMARY**

Main task of this thesis is to design a device for inspection of BMI penetrations at the bottom of reactor vessel. For clearing the task specifications, technical questionnaire was used to get request list. In conceptual phase functional decomposition was done along with morphological matrix from which two concepts were generated. After concept evaluation only one was chosen. Strength check was done for all critical parts. Finally, 3D model of whole device was made in Autodesk Inventor 2014, along with main assembly drawing.

Key words: Manipulator, inspection, BMI penetration.

## 1. UVOD

Iz suradnje s industrijskim partnerom, tvrtkom Inetec, pokazala se potreba za razvojem uređaja za ispitivanje BMI penetracija na dnu reaktorske posude. Inetec je tvrtka koja razvija uređaje za ispitivanje raznih dijelova nuklearnih elektrana i jedan ovakav uređaj bi proširio njihovu ponudu i učvrstio poziciju na tržištu. Ispitivanje se sastoji od ispitivanja unutrašnjosti penetracije i ispitivanja J-tip zavora između penetracije i dna reaktorske posude. Parametri procesa ispitivanja su propisani od strane nadležnih institucija, te ih se treba striktno pridržavati. Cilj ispitivanja je pronaći eventualne pukotine u samoj BMI penetraciji ili otkriti eventualne probleme s J-tip zavarom, stoga se zahtjeva velika točnost u pogledu detektiranja pozicija takvih neželjenih pojava.

Glavno svojstvo uređaja je da pouzdano i prema propisanim pravilnicima provodi ispitivanje BMI penetracije. Pod pouzdanošću se misli na dugotrajnost svih komponenti, neosjetljivost uređaja na radnu okolinu, te preciznost u radu svih pokretnih dijelova. Kroz rad će se prikazati faze konstrukcije uređaja, od raščišćavanja zadatka preko tehničkog upitnika i liste zahtjeva, koncipiranja pomoću funkcijske dekompozicije i morfološke matrice, do odabira koncepta na temelju kojega su provedeni odgovarajući proračuni i izrađen 3D model i sklopni crtež cijelog uređaja.

## 2. RAŠČIŠĆAVANJE ZADATKA

U ovoj fazi prikupljaju se sve informacije o problemu koji pokušavamo riješiti. Za potrebe ove faze koristit će se tehnički upitnik kako bi se saznale sve potrebne informacije o konstrukciji uređaja i sastavila lista zahtjeva. Nakon toga će se izraditi funkcijska dekompozicija i pripadajuća morfološka matrica kako bi se generirali i ocijenili koncepti.

### 2.1. Tehnički upitnik

Cilj tehničkog upitnika je saznati što je moguće više informacija potrebnih za konstrukciju uređaja. Pitanja iz tehničkog upitnika predočena su inženjerima tvrtke Inetec.

**Tablica 1. Tehnički upitnik**

|  |
|--|
| <p><b>1. Osnovni cilj?</b></p> <p>Razvoj sustava za ispitivanje BMI penetracija nerazornim metodama</p>  |
| <p><b>2. Što je stvarni problem koji treba riješiti?</b></p> <p>Konstruirati uređaj koji će ispitivati J tip zavora između BMI penetracije i donjeg dijela reaktorske posude, te ispitivati unutrašnjost BMI penetracije.</p>  |
| <p><b>3. Na koji način se provode ispitivanja?</b></p> <p>Proces ispitivanja i prateći parametri propisani su „pravilnikom“</p>  |
| <p><b>4. Koje ispitne tehnike će se koristiti?</b></p> <p>Za ispitivanje s unutarnje strane BMI penetracije:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- UT TOFD paralelno s zavarom</li> <li>- UT TOFD okomito na zavar</li> <li>- 45° transverzalni val</li> <li>- ECT X (eng. wounded driver pic kup type), <math>\varnothing 2\text{ mm}</math>, raspon frekvencije 100-600 kHz</li> </ul> <p>Za ispitivanje J tip zavora:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ECT J zavora</li> <li>- Unaprijeđena VT metoda</li> </ul> |
| <p><b>5. Kako se proizvod koristi?</b></p> <p>Proizvodom upravlja operater sa sigurne udaljenosti zaštićen od radijacije. Operater mora imati uvid u rad uređaja i tijek ispitivanja.</p>  |

**6. Koje karakteristike/svojstva uređaj mora imati?**

Pouzdanost u radu. Preciznosti u pogledu praćenja pozicije ispitnih sonde u svakom trenutku. Zadovoljavanje svih propisa vezanih uz proces ispitivanja. Mogućnost jednostavnog transporta. Mogućnost vanjskog čišćenja uređaja nakon provedenog ispitivanja.

**7. Postoje li geometrijska ograničenja za uređaj?**

Uređaj mora biti kompaktan, pogodan za transport.

**8. Postoje li ograničenja u pogledu kinematike?**

Za prijenose snage i gibanja koristiti zupčanike ili klinaste remene s naglaskom na eliminaciju zračnosti.

Brzina sonde u aksijalnom smjeru: 0-50 mm/s ?

Brzina rotacije sonde: 0-60 °/s?

Minimalna sloboda rotacije:  $\pm 200^\circ$

Minimalna translacija: 700 mm + cal.std.

**9. Postoje li određeni zahtjevi za točnosti?**

Točnost pozicioniranja sonde u aksijalnom smjeru:  $\pm 0,25$  mm

Točnost rotacije sonde:  $\pm 0,5^\circ$  mm

**10. Postoje li ograničenja u pogledu uporabe energije?**

Za sve vrste pogona potrebno je koristiti istosmjerne električne motore sa četkicama (eng. DC brushed) i pneumatske cilindre. Maksimalni broj motora određen je postojećom upravljačkom kutijom „Orca manipulator control OMC-131“ tvrtke Inetec (na raspolaganju je troosni kontroler). Maksimalni broj cilindara određen je postojećom pneumatskom kutijom Orca pneumatic control OPC-34B tvrtke Inetec (na raspolaganju je pet cilindara)

**11. Postoje li ograničenja u pogledu materijala?**

Sve komponente izrađene od nehrđajućih materijala. Sve komponente bez prisustva halogenih elemenata i klorida.

**12. Koji su primarni zahtjevi za sigurnost?**

Operater se ne smije nalaziti u opasnoj radnoj okolini uređaja.

**13. Zahtjevi za ergonomijom?**

Uređajem upravlja operater sa sigurne udaljenosti putem računala. Operater mora imati uvid u radni prostor uređaja i proces ispitivanja putem kamera postavljenih na ključnim mjestima. Dodatna rasvjeta za bolju vidljivost nije sastavni dio uređaja. Masa uređaja (manipulatora)



bez podsklopa za dizanje/spuštanje ne bi smjela biti veća od 20kg.

**14. Postoje li ograničenja za proizvodnjom?**

Ograničenja kapaciteta i resursa vanjskih izvođača radova. Izbjegavati tehnologije izrade koje su namjenjene za velikoserijsku i/ili masovnu proizvodnju. Mogućnosti nabave i rok isporuke komponenata.

**15. Postoje li ograničenja u pogledu sklapanja?**

Uređaj mora biti jednostavan za sklapanje, po mogućnosti modularnog karaktera.

**16. Uporaba uređaja?**

Uređaj će se koristiti u radioaktivnom okruženju pod vodom temperature 40°C na dubini od 20 metara. Korištene komponente moraju zadovoljiti uvjete rada pod vodom pri tlaku većem od 2 bara (max. 3bar). Elektroničke i električne komponente i spojevi moraju biti prikladno zaštićeni.

**17. Zahtjevi za održavanjem?**

Uređaj mora biti konstruiran da je prikladan za ispiranje mlazom vode (sredstva za čišćenje) pod tlakom nakon svake uporabe. Mora biti osiguran jednostavan pregled, održavanje i izmjena potrošnih komponenti.

**18. Postoje li određeni propisi/zahtjevi kojih se treba pridržavati?**

Potrebno je voditi računa o FME i ALARA zahtjevima.

**19. Postoje li rokovi?**

25.11.2014.

**20. Postoje li konstrukcijska ograničenja ili želje?**

Uređaj se u reaktorsku posudu spušta putem kрана i postojećeg LHT podsklopa. Potrebno je koristiti ispitne sonde tvrtke Inetec. Predvidjeti nosače za odlaganje uređaja na nosivu konstrukciju radi jednostavnijeg rukovanja i pohranjivanja.

**21. Postoje li specifični parametri bitni za konstrukciju uređaja?****Geometrija BMI penetracijske cijevi:**

Unutarnji promjer: 9,53 mm

Vanjski promjer: 38,25mm

Minimalna visina BMI penetracija do dna posude: 216,75 mm

Maksimalna visina BMI penetracije do dna posude: 283,79 mm

Prosječna visina BMI penetracije do presjeka s posudom (J zavara): 304,8 mm

**Geometrija ispitne sonde:**

Ukupna dužina sklopa glave sonde od vrha do spojke: 132mm

Minimalni promjer:  $\varnothing 7,5mm$

Maksimalni promjer:  $\varnothing 9,8mm$

Opružno opterećeni vrhovi sonde zakrivljeni su na promjer  $\varnothing 9,5mm$

**Radna okolina:**

Radna dubina 20m

Borirana voda temeperature do 40°C

## 2.2. Definicija cilja

U Tablica 2 sadržana je definicija cilja za razvoj uređaja koja proizlazi iz tehničkog upitnika i liste zahtjeva.

**Tablica 2. Definicija cilja**

| DEFINICIJA CILJA  | Naziv projekta:       | Datum: |
|---|-----------------------|--------|
| ZA RAZVOJ PROIZVODA   | Prema naslovu zadatka |        |
| <b>Opis proizvoda:</b>  |                       |        |
| Razvoj uređaja za ispitivanje instrumentacijskih cijevi na dnu reaktorske posude  |                       |        |
| <b>Primarno tržište:</b>  |                       |        |
| Pružanje usluga ispitivanja BMI penetracija u nuklearnim elektranama diljem svijeta.  |                       |        |
| <b>Koje karakteristike se podrazumijevaju:</b>  |                       |        |
| Mogućnost ispitivanja BMI penetracija prema propisanim pravilnicima/normama. Visoka pouzdanost u radu i preciznost. Upravlјivost uređajem sa sigurne udaljenosti. Zadovolјavanje svih normi za rad/korištenje u nuklearnim elektranama. Udovolјavanje svim kriterijima iz liste zahtjeva (Tablica 3). |                       |        |
| <b>Pravci kreativnog razvoja:</b>   |                       |        |
| Razvoj mehanizma za praćenje konture J tipa zavara, mehanizma za fiksiranje uređaja za BMI i mehanizma za pokretanje sonde za ispitivanje unutarnjeg dijela BMI penetracije.  |                       |        |

**Limiti projekta:**

Završetak razvojnog procesa 25.11.2014. godine. Sva ograničenja zapisana u listi zahtjeva (Tablica 3) koja su proizašla iz tehničkog upitnika (Tablica 1).

**2.3. Konstrukcijski zahtjevi**

Pojam konstrukcijskih zahtjeva podrazumijeva jednoznačne i precizne formulacije uvjeta izrađene tehničkim rječnikom konstruktora. Zahtjevi se dokumentiraju u listi zahtjeva prikazanoj u, a proizašli su iz tehničkog upitnika, potreba korisnika, specifičnosti uređaja, konstrukcijske prakse, te važećih normi i pravilnika. U nastavku je prikazan popis svih proizašlih zahtjeva (Tablica 3).

**Tablica 3. Lista zahtjeva**

|     |   |
|-----|---|
| 1.  | Maksimalna masa uređaja 20kg  |
| 2.  | Brzina sonde u aksijalnom smjeru: 0-50mm/s                                |
| 3.  | Brzina rotacije sonde: 0-60°/s  |
| 4.  | Ostvariti $\pm 200^\circ$ rotacije sonde                                  |
| 5.  | Minimalna translacija sonde 700 mm + duljina kalibracijskog bloka         |
| 6.  | Ostvariti točnost pozicioniranja sonde u aksijalnom smjeru: $\pm 0,25$ mm |
| 7.  | Ostvariti točnost rotacije sonde $\pm 0,5^\circ$ mm                       |
| 8.  | Za prijenos snage i gibanja koristiti zupčanike ili klinasto remenje      |
| 9.  | Za pogone koristiti elektromotore ili pneumatske cilindre                 |
| 10. | Maksimalni broj elektromotora: 2  |
| 11. | Maksimalni broj pneumatskih cilindara: 5                                  |
| 12. | Za praćenje položaja prilikom rotacije koristiti resolve                  |
| 13. | Za ispitivanje cijevi koristiti postojeću sondu tvrtke Inetec             |
| 14. | Otpornost na koroziju   |
| 15. | Uporaba komponenti bez prisustva halogenih elemenata i klorida            |
| 16. | Videonadzor radnog područja i procesa ispitivanja                         |
| 17. | Osigurati za rad pod vodom na dubini od 20 metara, pri 40°C               |
| 18. | Uređaj učvrstiti na cijev vanjskog promjera 38,25mm                       |

|     |   |
|-----|---|
| 19. | Uređaj u reaktorsku posudu spuštati postojećim LHT uređajem |
| 20. | Zaštititi sve kablove od oštećenja                          |
| 21. | Upravljanje uređajem vršiti izvan zone opasnog zračenja     |
| 22. | Za ispitivanje koristiti tehnike pod točkom 4 Tablica 1     |
| 23. | Uskladiti s FME i ALARA zahtjevima                          |
| 24. | Projekt dovršiti do 25.11.2014.                             |

## 2.4. Funkcijska dekompozicija

Funkcijska dekompozicija sastavni je dio faze koncipiranja, početne faze razvoja proizvoda. Za početak je potrebno definirati što je funkcija, a prema [1] funkcija je:

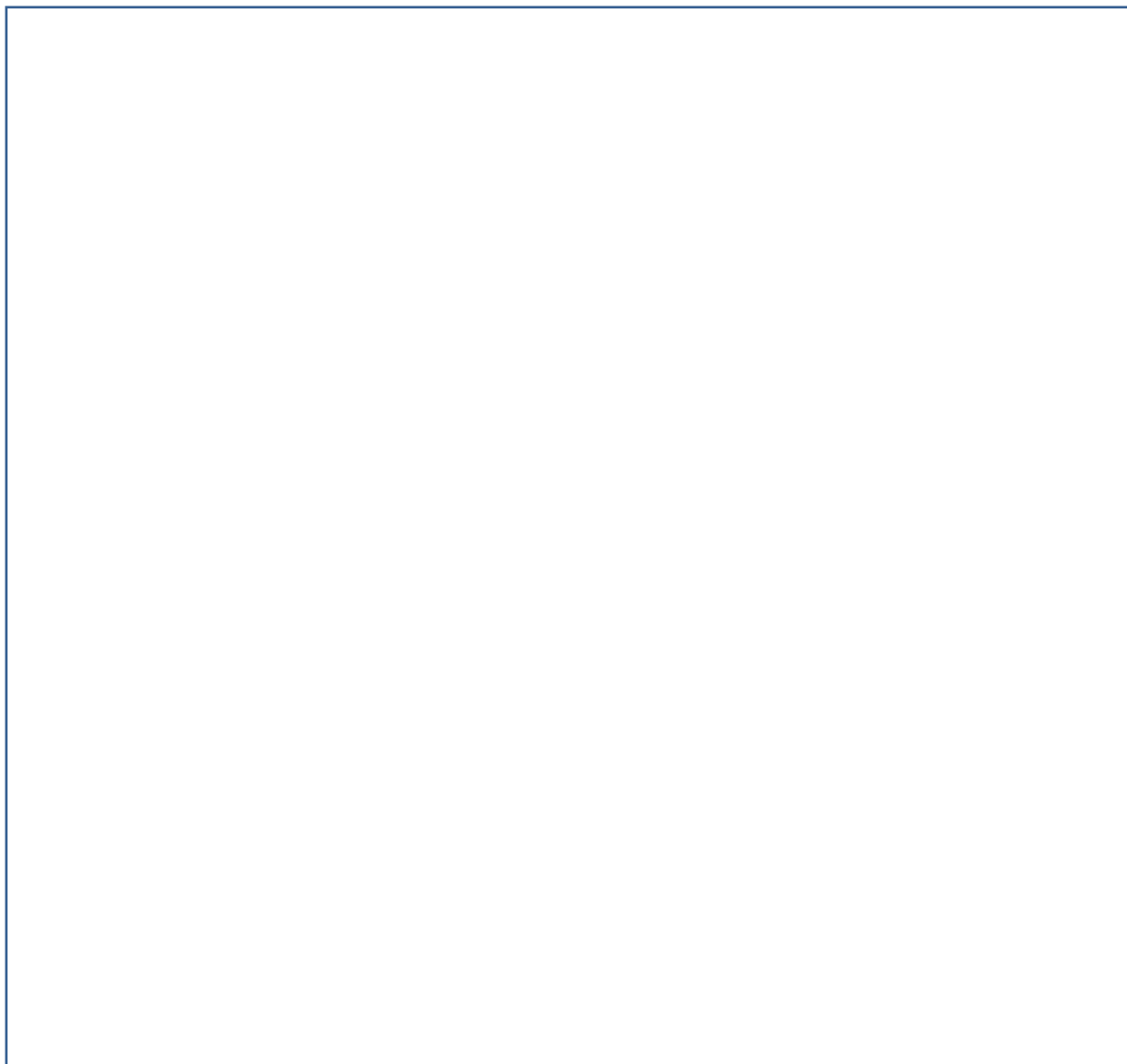
- Apstraktna formulacija zadataka koji se moraju ispuniti pri razvoju proizvoda neovisno o fizičkoj realizaciji rješenja koja će se iskoristiti da bi se ostvario željeni rezultat.
- Jasna definicija o relaciji između „ulaza“ koji proizvod dobivana od okoline i očekivanog „izlaza“ koji isporučuju okolini bez obzira na svoj fizički oblik

Naravno, postoje mnoge formulacije pojma funkcije, ali svi se slažu oko toga da formulacija funkcije mora biti apstraktna, opće formulirana s obzirom na moguća rješenja funkcije.

Funkcijska dekompozicija se prvenstveno koristi kako bi se [1]:

- Razvojni tim koncentrirao na „što“ treba realizirati, a ne „kako“
- Lakše organizirao razvojni tim, zadatci i procesi
- Definirale granice konačnog rješenja
- Poboljšala kreativnost dekompozicijom složenog problema u parcijalne i manje složene probleme
- Apstrahirao razvojni zadatak na visokom nivou
- Osiguralo generiranje više mogućih rješenja za parcijalni problem
- Definirala osnova za primjenu „istodobnog“ inženjerstva

Slika 1 prikazuje dio funkcijske dekompozicije na najvišoj razini. Rastavljanjem funkcija (1) Manipulator u radnom položaju osigurati, (2) J tip zavare ispitati i (3) Unutrašnjost penetracije ispitati na pripadajuće podfunkcije dodatno su se razradili segmenti koji su prepoznati kao ključni za funkcioniranje uređaja. Cjeloviti prikaz funkcijske dekompozicije na najvišoj razini, kao i prikaz razrade funkcija (1),(2) i (3) nalazi se u Prilogu 3.



**Slika 1. Dio funkcijske dekompozicije**

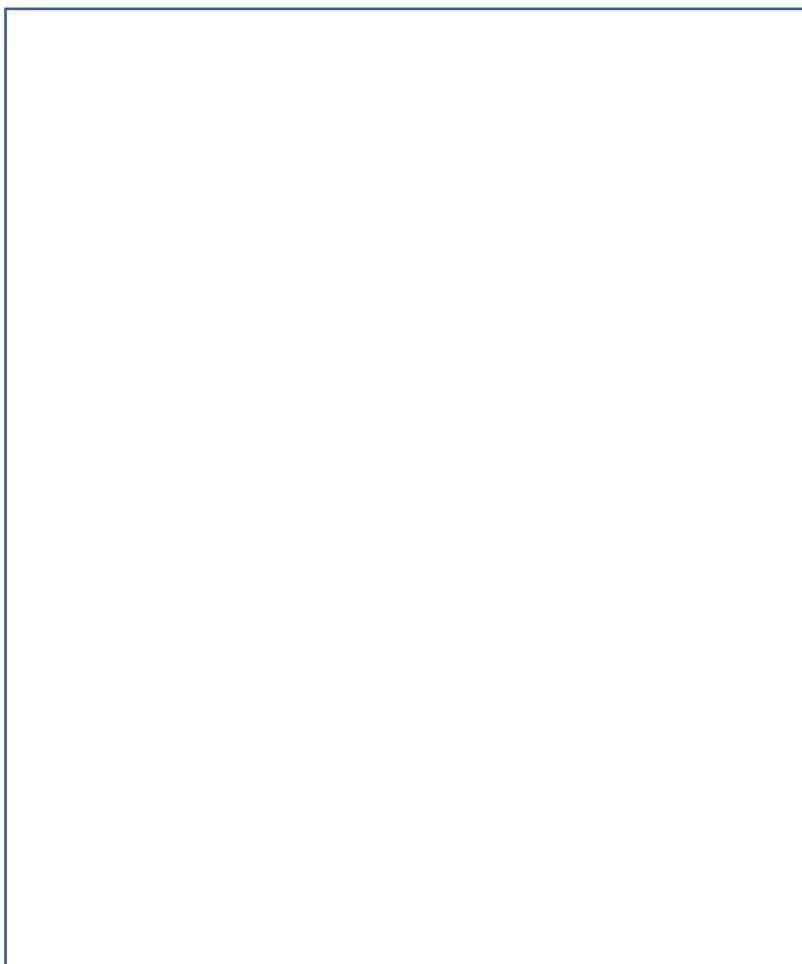
## **2.5. Morfološka matrica**

Jedna od direktnih metoda za traženje mogućih rješenja funkcija je uporaba morfološke matrice. Sve funkcije proizašle iz funkcijske dekompozicije (Prilog 3) zapisuju se u morfološku matricu (**Error! Reference source not found.**), te se za svaku od njih pronalazi što je moguće više rješenja. Odabirom različitih rješenja pojedinih parcijalnih funkcija generiraju se koncepti koji se kasnije vrednuju. Prilikom odabira rješenja parcijalnih funkcija potrebno je voditi računa o tome da tako generirani koncept zadovoljava barem osnovne zahtjeve postavljene pred uređaj, jer u suprotnome koncept je u startu pogrešan, te kao takav nepodoban za daljnje vrednovanje.

### 3. KONCEPTI

Prema predloženim rješenjima prikazanim u **Error! Reference source not found.** predložena su dva koncepta. Svaki od dva predložena koncepta zadovoljava sve uvjete navedene u listi zahtjeva. Glavna razlika između predloženih koncepata očitava se u izvedbi glavnih funkcija uređaja, a to su: prihvat i osiguranje uređaja prilikom ispitivanja, ispitivanje unutrašnjosti cijevi i ispitivanje J-tip zavara.

#### 3.1. Koncept 1

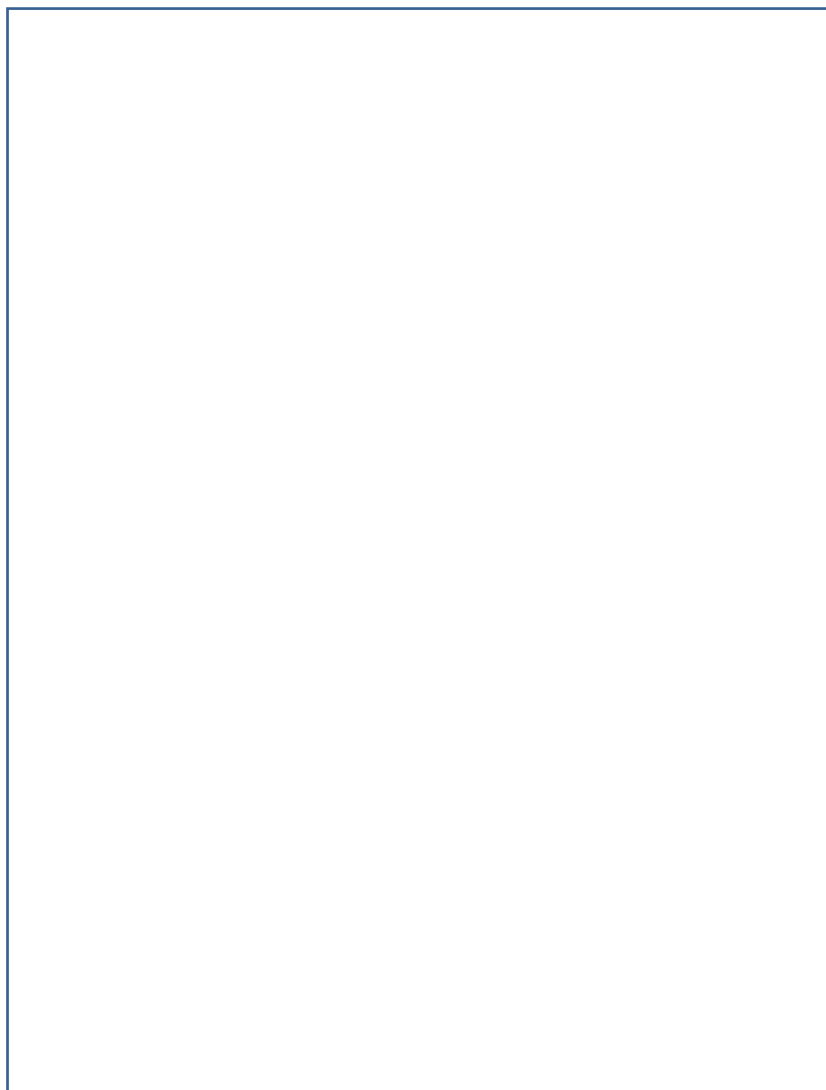


**Slika 2. Prikaz koncepta 1**

Karakterističnost koncepta 1 očituje se u načinu osiguranja uređaja prilikom ispitivanja i izvedbi JWM modula. Osiguranje uređaja na BMI penetraciju ostvaruje se djelovanjem pneumatskog cilindra (1) koji preko polužnog mehanizma (2) ostvaruje pritisnu silu između

kotačića i stjenke BMI penetracije (Presjek A-A na Slika 2). Cijeli podsklop za osiguranje uređaja prilikom ispitivanja povezan je s IDM modulom (3). Uporaba kotačića omogućava rotaciju s pojavom minimalnog trenja, što smanjuje potrebnu snagu motora rotacije uslijed ukupnih gubitaka trenja. JWM modul (4), čija je funkcija ispitivanje J-tip zavora, također je povezan s IDM modulom. Potrebno je osigurati silu pritiska takvog smjera da ona djeluje što bliže zavoru koji se ispituje kako bi se osigurala ispravnost postupka ispitivanja. Ta sila se ostvaruje kombiniranim djelovanjem elektromotora koji preko vretena ostvaruje silu u vertikalnom smjeru i pneumatskog cilindra (5) koji ostvaruje silu u radijalnom smjeru. Podešavanje pravca djelovanja rezultantne sile, kako bi pravac prolazio kroz sam zavar koji se ispituje, omogućeno je podešavanjem kuta pod kojim pneumatski cilindar djeluje. Također, smjer i vrijednost rezultantne sile regulira se kombinacijom iznosa pojedinih sila. Translacija sonde odvija se preko vretena (6) koje je pokretano elektromotorom s odgovarajućim prijenosom kako bi se ostvarili potrebni kinematski parametri za pravilno ispitivanje. Ispravljanje eventualnih nepravilnosti prilikom centriranja uređaja iznad BMI penetracije omogućava elastična veza (7) preko tlačnih opruga. Sila u oprugama podešava se pritezanjem ili otezanjem vijaka. Za praćenje položaja sonde prilikom rotacije i translacije koriste se dvostruki resolveri koje motori pogone preko zupčanika.

### 3.2. Koncept 2



**Slika 3. Prikaz koncepta 2**

Glavna razlika koncepta 2 u odnosu na koncept 1 vidljiva je u izvedbi podsklopa za osiguranje uređaja prilikom ispitivanja i JWM podsklopa zaduženog za ispitivanje zavara. Sila pritiska za osiguranje uređaja ostvaruje se djelovanjem pneumatskog cilindra (1) koji preko polužnog mehanizma (2) pritišće kotačić na vanjsku stjenku BMI penetracije. Kao i kod koncepta 1 i ovdje se uporabom kotačića trenje svodi na minimum. Kod polužnog mehanizma se koristi i tlačna opruga (3) koja osigurava vraćanje poluge u prvobitni položaj nakon prestanka djelovanja pneumatskog cilindra. Time smo omogućili dovoljan manevarski prostor prilikom centriranja uređaja na BMI penetraciju. Bitna razlika kod izvedbe JWM modula je u uporabi dva pneumatska cilindra za ostvarenje sile pritiska, za razliku od kombinacije elektromotora i pneumatskog cilindra. Također, radi zaštite ispitne sonde prilikom



pozicioniranja uređaja, sonda se nalazi u uzdignutom položaju i na radnu dubinu ju dovodi pneumatski cilindar (4) tek kada je uređaj osiguran od pomicanja. Na taj način je spriječeno eventualno oštećenje sonde koje bi moglo nastati neželjenim udarcem o stjenku posude ili o susjednu penetraciju. Uporabom kliznih ležaja s kuglicama (5) osigurava se pravilno vođenje u vertikalnom smjeru s trenjem svedenim na minimum. Predviđeni izgled pogonskih sklopova za translaciju i rotaciju, kao i sama izvedba translacije sonde i elastične veze, isti su kao i kod koncepta 1.

### 3.3. Vrednovanje

Vrednovanje varijanti rješenja za cilj ima odabir najboljeg rješenja. Vrednovanje se može provoditi prema različitim kategorijama, primjerice tehničko vrednovanje i ekonomsko vrednovanje. S obzirom na specifičnost razvijanog uređaja provesti će se samo tehničko vrednovanje varijanti. Kako bi se vrednovanje moglo provesti potrebno je odrediti kriterije koji proizlaze iz najvažnijih zahtjeva i želja iz liste zahtjeva. S obzirom da oba koncepta načelno zadovoljavaju sve uvjete postavljene u listi zahtjeva, vrednovanje će se provesti prema subjektivnim kriterijima postavljenima pred uređaj. Kriteriji se vrednuju brojačno u rasponu od jedan do pet gdje jedan označava najlošije ispunjenje kriterija, a pet najpotpunije ispunjenje kriterija. S obzirom da je neodgovorno tvrditi da su svi kriteriji jednakovrijedni, svakome od njih će biti pridružen težinski faktor  $g_i$ , gdje  $i$  označava redni broj kriterija. Razumljivo je da ukupan zbroj težinskih faktora svih kriterija ne smije prelaziti jedan. Predloženi kriteriji su kako slijedi:

1. Jednostavnost konstrukcije

Subjektivna procjena stupnja složenosti konstrukcije uređaja. Pridruženi težinski faktor iznosi  $g_1=0,15$ .

2. Ukupan broj pogonskih jedinica

Za očekivati je da manji broj pogonskih jedinica (elektromotora i pneumatskih cilindara) direktno znači jednostavniju konstrukciju uređaja i jednostavnije upravljanje. Kako bi se ovaj kriterij mogao bodovati od jedan do pet postavit će se teoretski minimalni broj pogonskih jedinica u iznosu od četiri (po jedna pogonska jedinica za rotaciju, translaciju, zaključavanje i ostvarenje sile kod JWM modula). Za svaku pogonsku jedinicu više od teoretski minimalne konceptu će se oduzimati jedan bod. Pridruženi težinski faktor iznosi  $g_2=0,2$ .

### 3. Pouzdanost osiguranja uređaja prilikom ispitivanja

Ovim kriterijem se vrednuje konstrukcija mehanizma koji osigurava uređaj od pomicanja prilikom ispitivanja. Pridruženi težinski faktor iznosi  $g_3=0,3$ .

### 4. Zaštićenost sondi

Sonde, kao jedna od najskupljih komponenti uređaja moraju biti zaštićene sve do trenutka kada započinje samo ispitivanje. Eventualna mogućnost oštećenja sonde prilikom spuštanja uređaja na dubinu ispitivanja ili prilikom preciznog pozicioniranja iznad BMI penetracije značilo bi ne samo financijsku štetu uslijed oštećenja nego i prestanak ispitivanje prije nego li je ono uopće počelo. Pridruženi težinski faktor iznosi  $g_4=0,35$ .

Kriteriji se vrednuju broičano u rasponu od 1 do 5 gdje 1 označava najlošije ispunjenje kriterija, a 5 najpotpunije ispunjenje kriterija. Ukupna ocjena izražena je kao prosjek svih dobivenih ocjena.

**Tablica 4. Vrednovanje koncepata**

| Kriterij   | Koncept 1                       |                                 | Koncept 2                       |                                 |
|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|  | Ispunjenost kriterija ( $K_i$ ) | Težinska ocjena ( $K_i * g_i$ ) | Ispunjenost kriterija ( $K_i$ ) | Težinska ocjena ( $K_i * g_i$ ) |
| Jednostavnost konstrukcije                         | 3                               | 0,45                            | 3                               | 0,45                            |
| Ukupan broj pogonskih jedinica                     | 4                               | 0,8                             | 2                               | 0,4                             |
| Pouzdanost osiguranja uređaja prilikom ispitivanja | 2                               | 0,6                             | 5                               | 1,5                             |
| Zaštita sondi                                      | 3                               | 1,05                            | 5                               | 1,75                            |
| Ukupna ocjena                                      |                                 | 2,9                             |                                 | 4,1                             |

Prema prikazanim rezultatima vrednovanja u Tablica 4 vidljivo je da je koncept 2 povoljnije rješenje, posebice jer ima kvalitetnija rješenja za ključne kriterije vrednovanja kojima je pridodan veći težinski faktor. Stoga se koncept 2 uzima za daljnju razradu i detaljiranje kako bi se dobio konačan proizvod.

## 4. PRORAČUN

U fazi detaljiranja sukladno razvoju uređaja provedeni su odgovarajući proračuni za sve pogonske jedinice, kao i strojne dijelove koji preuzimaju značajnije sile i momente.

### 4.1. Proračun motora translacije

Zadani podaci, proizašli iz liste zahtjeva su:

Brzina ispitivanja

$$v = 100 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (1)$$

Potrebno ubrzanje

$$a = 500 \frac{\text{mm}}{\text{s}^2} \quad (2)$$

Iz (1) i (2) slijedi vrijeme ubrzanja

$$t = 0,2\text{s} \quad (3)$$

Također, zadana je masa sonde  $m = 2\text{kg}$ , kao i točnost pozicioniranja. Točnost pozicioniranja od  $\pm 0,25\text{mm}$  daje razred točnosti C7 prema [4]. Iz konstrukcije uređaja dobivamo iznos hoda vretena od  $h = 1000\text{mm}$ . Prema razredu točnosti C7 i potrebnom hodu vretena, odabrano je vreteno s kuglicama, po uzoru na proizvođača Misumi:

**Tablica 5. Podaci za kuglično vreteno**

| Karakteristika                    | Vrijednost                                |
|-----------------------------------|---|
| Korak vretena, P                  | 10 mm                                     |
| Masa matice, $m_m$                | 0,41 kg                                   |
| Masa vretena, $m_v$               | $1,27 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$         |
| Moment tromosti vretena, $J_{vr}$ | $0,00039 \frac{\text{kgcm}^2}{\text{mm}}$ |
| Promjer središta kuglica, d       | 15,8mm                                    |
| Korisnost vretena                 | 0,9                                       |

Potreban broj okretaja vretena da bi se ostvarila zadana brzina ispitivanja proizlazi iz brzine ispitivanja i koraka vretena:

$$n_{transl} = \frac{v}{P} = 600 \frac{\text{okr}}{\text{min}} \quad (4)$$

Da bismo odredili potreban moment elektromotora za pogon translacije potrebno je izračunati moment ubrzanja i moment ustaljene vožnje. Moment tromosti vretena je zadan od strane proizvođača, stoga je potrebno izračunati moment tromosti dijelova koji se transliraju. Prema [1] moment tromosti iznosi:

$$J_{transl} = (m_{matice} + m_{sonde}) \cdot \left( \frac{P_h}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot 10^{-6} = 6,11 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2. \quad (5)$$

Kutno ubrzanje dobijemo iz (3) i (4):

$$\omega_{transl} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{transl}}{t \cdot 60} = 314 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}. \quad (6)$$

Naposljetku, moment ubrzanja, prema [1] iznosi:

$$M_{ubr} = (J_{vr} + J_{transl}) \cdot \omega_{transl} \cdot 10^3 = 14,16 \text{ Nmm}. \quad (7)$$

Moment ustaljene vrtnje računamo prema [5]

$$M_{ustaljeno} = \frac{m_{ukupno} \cdot g \cdot P_h}{2 \cdot \pi \cdot \eta_{vretena}} = 41,83 \text{ Nmm} \quad (8)$$

Zbrajanjem (7) i (8) dolazimo do ukupno potrebnog momenta za ostvarenje propisane brzine ispitivanja i željenog ubrzanja:

$$M_{ukupno} = M_{ubr} + M_{ustaljeno} = 77,77 \text{ Nmm} \quad (9)$$

S obzirom da se od vretena do motora koristi par stožnika potrebno je uračunati njihovu korisnost i prijenosni omjer kako bi se dobila potrebna snaga elektromotora. Također treba voditi računa i o svim gubicima, posebno o gubicima trenja na mjestima brtvljenja koji su se iskustveno pokazali značajnima.

Imajući u vidu spomenuto, ukupni potrebni moment i snaga elektromotora prema [2] iznosi:

$$M_{EM} = \frac{M_{ukupno}}{i_{zupčanika} \cdot \eta_{zupčanika} \cdot i_{reduktor} \cdot \eta_{reduktor} \cdot \eta_{gubitaka}} = 12,25 \text{ Nmm}$$

Gdje je:

$$\begin{aligned} i_{zupčanika} &= 1 \\ \eta_{zupčanika} &= 0,7 \\ i_{reduktor} &= 16 \\ \eta_{reduktor} &= 0,81 \text{ prema podacima proizvođača} \\ \eta_{gubitaka} &= 0,7 \text{ -pretpostavka} \end{aligned} \quad (10)$$

Za izračun potrebne snage elektromotora moramo izračunati potreban broj okretaja:

$$n_{EM} = n_{transl} \cdot i_{zupčanik} \cdot i_{reduktor} = 9600 \frac{\text{okr}}{\text{min}} \quad (11)$$

$$P_{EM} = \frac{M_{EM} \cdot 10^{-3} \cdot \pi \cdot n_{EM}}{30} = 12,1 \text{ W} \quad (12)$$

Odabran je motor proizvođača Maxon nazivnih vrijednosti:

$$\begin{aligned} P_{EM} &= 24 \text{ W} \\ M_{EM} &= 15,4 \text{ mNm} \\ n_{EM} &= 10800 \frac{\text{okr}}{\text{min}} \end{aligned}$$

Motor dolazi u kombinaciji s reduktorom prijenosnog omjera  $i=16$ . Potpuni izvadak s karakteristikama motora i reduktura nalazi se u prilogu 4.

#### 4.2. Proračun resolvera translacije

Resolveri su uređaji koji se koriste za mjerenje trenutne pozicije, bilo da se radi o translaciji ili rotaciji. Resolveri se koriste u paru spojeni serijski s time da je definirano da reduktor na drugom resolveru mora imati prijenosni omjer 32:1. Spomenuti podaci proizlaze iz već postojećeg softverskog koda tvrtke Inetec koji je napisan za taj prijenosni odnos. Također, resolveri se mogu koristiti i samostalno, ali inženjerska praksa u tvrtki Inetec je da se koriste dvostruki resolveri zbog dovoljne točnosti mjerenja pozicije. Za puni pomak vretena prilikom jednog ispitivanja idealno je da drugi resolver u seriji napravi 0,98 okretaja, ali su i manje vrijednosti prihvatljive jer je jedino ograničenje da ne napravi više od punog okreta.

Broj okretaja drugog resolvera dobijemo iz izlaznog broja okretaja motor-reduktora i prijenosnih omjera reduktora spojenih na resolvee kako slijedi:

$$n_{radno} = n_{transl} \cdot \frac{t_{radno}}{60} = 159 \text{ okretaja}$$

Gdje je:

$t_{radno}$  – vrijeme rada motora translacije za jedno ispitivanje

$n_{radno}$  – broj okretaja koje motor napravi za jedno ispitivanje

(13)

$$n_{resolver} = \frac{n_{radno}}{i_{reduktora1} \cdot i_{reduktora2}} = 0,85$$

Gdje je:

$$i_{reduktora1} = 6$$

$$i_{reduktora2} = 32$$

Za jedno ispitivanje resolver napravi 0,85 okreta što je zadovoljavajuća preciznost. Ukoliko bi se inzistiralo na većoj preciznosti, ona bi se postigla podešavanjem prijenosnog odnosa zupčanika koji pogoni sklop resolvera.

### 4.3. Proračun motora rotacije

Motor rotacije je zadužen za rotaciju IDM i JWM modula prilikom procesa ispitivanja. Za odabir motora potrebno je izračunati potrebne momente za ubrzanje masa i ustaljenu rotaciju svih dijelova. Zbog pojednostavljenja proračuna, oba modula su zamišljena kao valjak s idealno raspoređenom masom.

Težina svih rotirajućih dijelova:

$$F_{rot} = (m_{IDM} + m_{JWM}) \cdot 9,81 = 392,4N \quad (14)$$

Moment ustaljene vrtnje kao i svi pripadajući izračuni računaju se prema [5].

Otpori ustaljene vrtnje:

$$w = \frac{1000}{0,5D_{ležaja}} \cdot (\mu_{ležaja} \cdot 0,5d_{ležaja} + e) = 44,26 \frac{\text{N}}{\text{kN}}$$

Gdje je:

$$D_{ležaja} - \text{vanjski promjer odabranog ležaja} \quad (15)$$

$$d_{ležaja} - \text{unutarnji promjer odabranog ležaja}$$

$$e = 0,5 \text{ mm prema [6]}$$

$$\mu_{ležaja} - \text{trenje u ležaju prema SKF-u}$$

Sila otpora ustaljene vrtnje:

$$F_v = \frac{w}{1000} \cdot m_{ukupno} \cdot 9,81 = 17,36 \text{ N} \quad (16)$$

Konačno, moment ustaljene vrtnje iznosi:

$$M_{ustRot} = \frac{F_v \cdot r_{rotacije}}{\eta_{ležaja}} = 3,2 \text{ Nm} \quad (17)$$

Za moment ubrzanja rotirajućih masa potrebni su nam momenti otpora IDM i JWM modula. Os IDM modula se poklapa s osi rotacije, dok je os JWM modula od nje pomaknuta za 150mm te je kod izračuna potrebno to uzeti u obzir.

Prema [1] momenti otpora su:

$$J_{IDM} = \frac{m_{IDM}}{2} \cdot r_{IDM}^2 = 0,216 \text{ kgm}^2 \quad (18)$$

$$J_{JWM} = \frac{m_{JWM}}{2} \cdot r_{JWM}^2 + m_{JWM} \cdot l_{odmak}^2 = 0,275 \text{ kgm}^2$$

Za moment ubrzanja preostaje izračunati još jedino kutno ubrzanje koje dobivamo iz zadanih parametara ispitivanja:

$$\alpha_{rot} = \frac{\omega_{rot}}{t_{ubrzanja}} = 8,722 \text{ s}^{-2} \quad (19)$$

Naposljetku slijedi da je moment ubrzanja:

$$M_{ubrRot} = (J_{IDM} + J_{JWM}) \cdot \alpha_{rot} = 4,2826 \text{ Nm} \quad (20)$$

Do ukupnog momenta dolazimo zbrajanjem (17) i (20) te uzimanjem u obzir pretpostavljenih otpora na brtvama i željenog faktora sigurnosti:

$$M_{ukupnoRot} = \frac{M_{ustRot} + M_{ubrRot}}{\eta_{otpora}} \cdot 1,3 = 12,14 \text{ Nm} \quad (21)$$

Konstrukcija sklopa rotacije je takva da motor-reduktor pokreće dva para zupčanika, te se na taj način ostvaruje potrebna rotacija. Stoga za izračun potrebnog momenta motora potrebno je u obzir uzeti prijenosne odnose i korisnosti tih zupčanika:

$$i_{z1} = 8$$

$$\eta_{z1} = 0,9$$

$$i_{z2} = 2$$

$$\eta_{z2} = 0,9$$

Potreban moment elektromotora, uz odabir reduktora u sklopu s prijenosnim omjerom 21:1 i korisnošću 0,64 iznosi:

$$M_{EMrot} = \frac{M_{ukupnoRot}}{i_1 \cdot \eta_1 \cdot i_2 \cdot \eta_2 \cdot i_{redRot} \cdot \eta_{redRot}} = 53,72 \text{ Nmm} \quad (22)$$

Potreban broj okretaja elektromotora proizlazi iz broja okretaja potrebnih za pravilno ispitivanje i svih prijenosnih omjera do motora, te iznosi:

$$n_{EMrot} = \frac{n_{ispitRot}}{i_1 \cdot i_2 \cdot i_{redRot}} = 5601 \frac{\text{okr}}{\text{min}} \quad (23)$$

Naposljetku dolazimo do potrebne snage elektromotora:

$$P_{EMrot} = \frac{M_{EMrot} \cdot \pi \cdot n_{EMrot}}{30} = 31,5 \text{ W} \quad (24)$$

Prema dobivenim podacima odabran je sklop motor-reduktor proizvođača Maxon sa sljedećim karakteristikama:

$$P_{EM} = 90 \text{ W}$$

$$M_{EM} = 99,4 \text{ Nmm}$$

$$n_{EM} = 6530 \frac{\text{okr}}{\text{min}}$$



#### 4.4. Proračun resolvera rotacije

Sklop dva serijski spojena resolvera pokretan je preko para stožnika, na taj način da prvi reduktor sklopa resolvera radi isti broj okretaja kao i izlazno vratilo sklopa motor-reduktor. Za potrebe ispitivanja potrebno je omogućiti 200° rotacije, što iznosi 1,11 okretaja. Uzevši u obzir prijenosne odnose zupčanika dobivamo da se prvi reduktor u sklopu resolvera okrene:

$$n_{\text{RedRes1}} = 0,556 \cdot i_{z1} \cdot i_{z2} = 17,78 \text{okr} \quad (25)$$

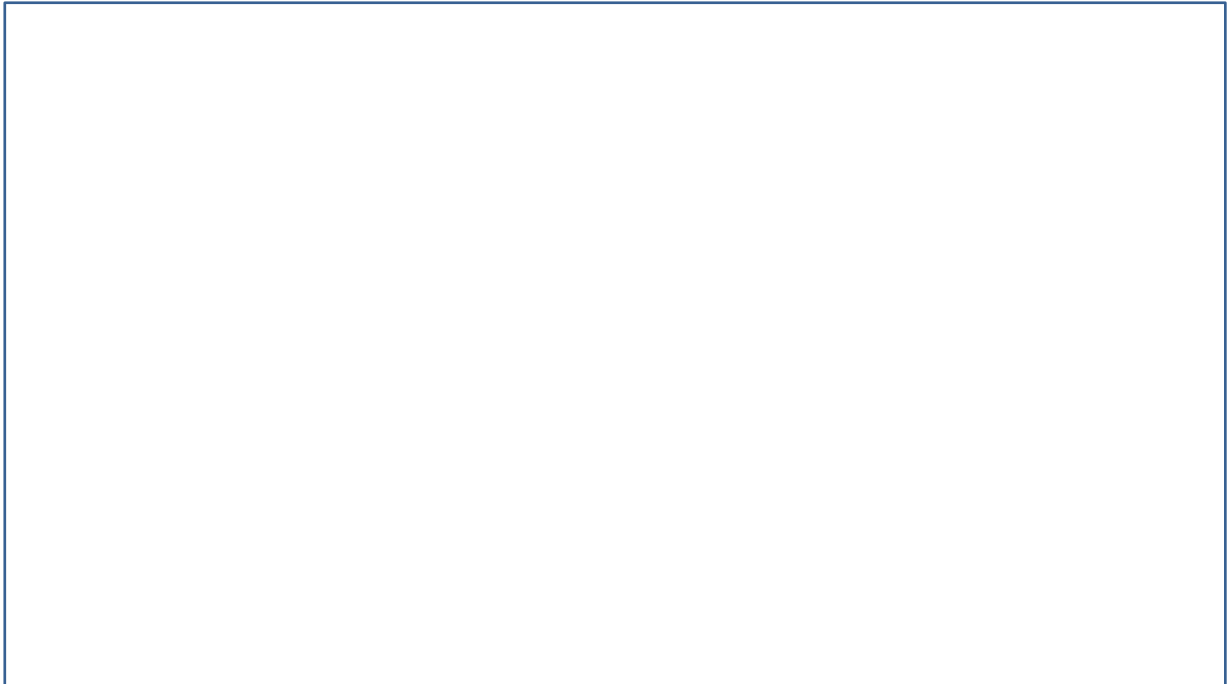
Imajući u vidu da drugi resolver u seriji mora biti sparen s reduktorom prijenosnog omjera 32:1 potrebno je odabrati takav multiplikator koji će 17,78 okretaja dovoljno povećati da se drugi resolver nakon redukcije ne okrene više od jednom. Odabire se multiplikator 1:1,5 s kojim dobivamo broj okretaja drugog resolvera:

$$n_{\text{ResRot}} = \frac{17,78}{32 \cdot \frac{1}{1,5}} = 0,833 \text{okr} \quad (26)$$

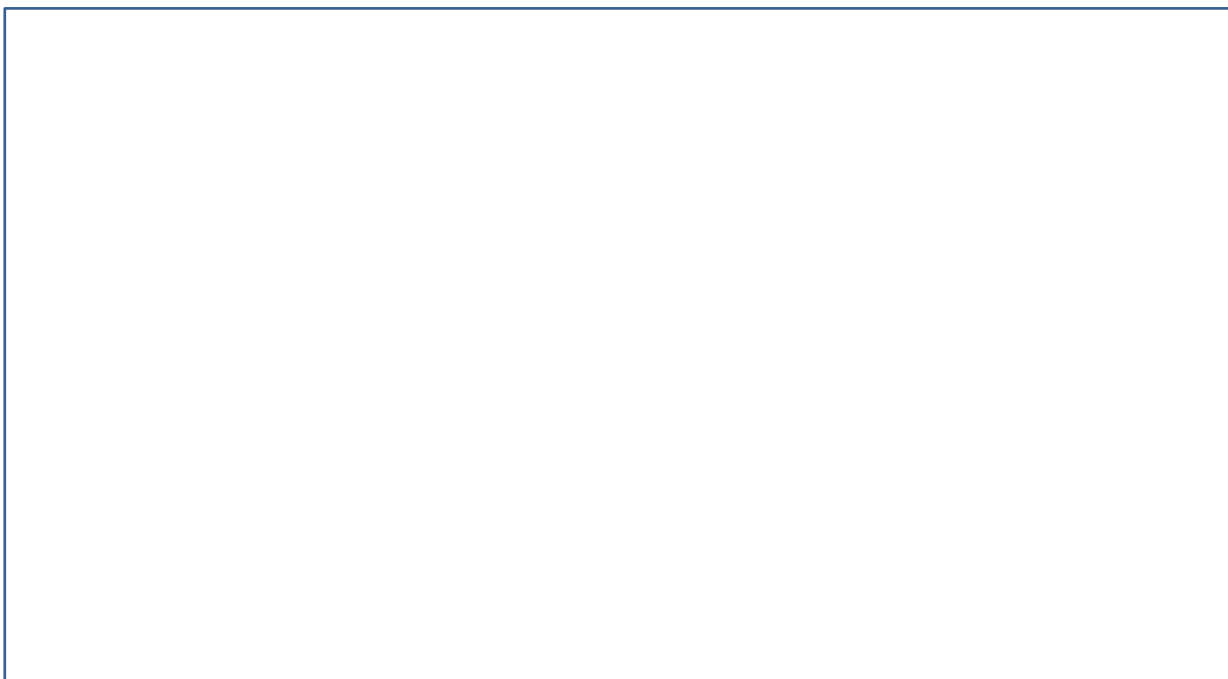
#### 4.5. Proračun opruga

Proračun svih opruga izveo se pomoću programa Autodesk Inventor 2014. Prikaz proračuna dan je slikom iz spomenutog programa za svaku oprugu pojedinačno. Sve opruge su dimenzionirane na način da su se za određene željene dimenzije opruge, proizašle iz konstrukcije, pokušale dobiti odgovarajuće sile u oprugama kombinacijom parametara: promjer žice, unutarnji promjer opruge, slobodna duljina opruge, broj aktivnih zavojnica

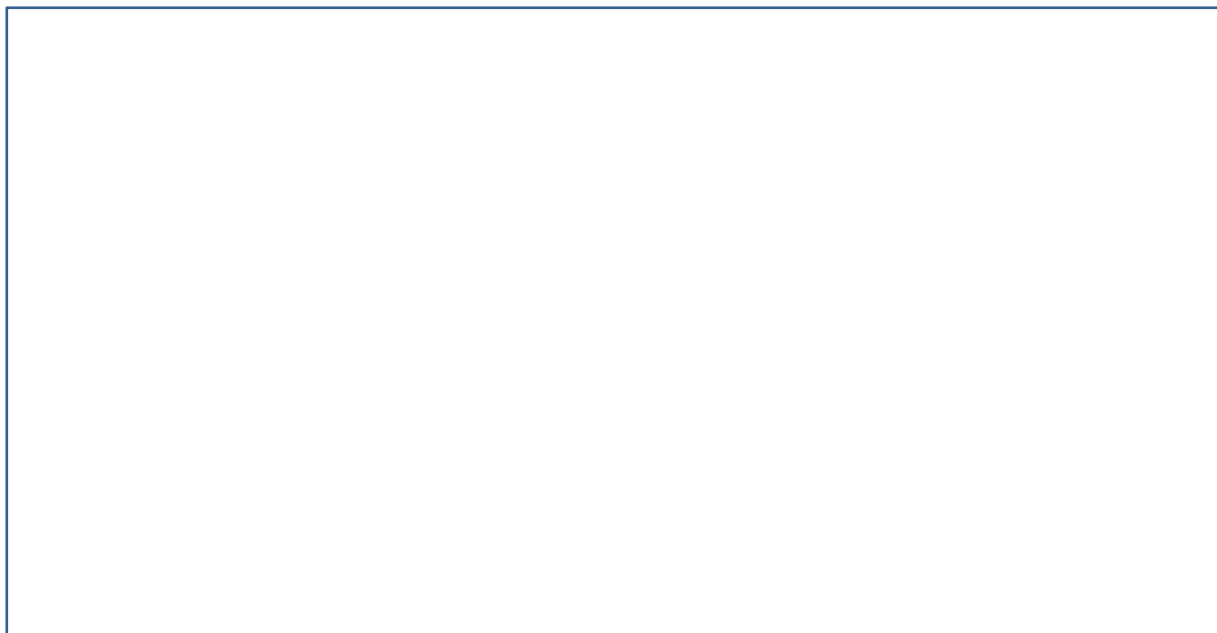
Na svim slikama pod kategorijom eng. „loads“ prikazane su redom: sila pri minimalnom opterećenju, sila pri maksimalnom opterećenju, sila pri radnom opterećenju. Pod kategorijom eng. „dimensions“ nalaze se redom: promjer žice opruge, unutarnji promjer opruge, te duljina opruge u neopterećenom stanju.



**Slika 4. Proračun opruge resolvera translacije**



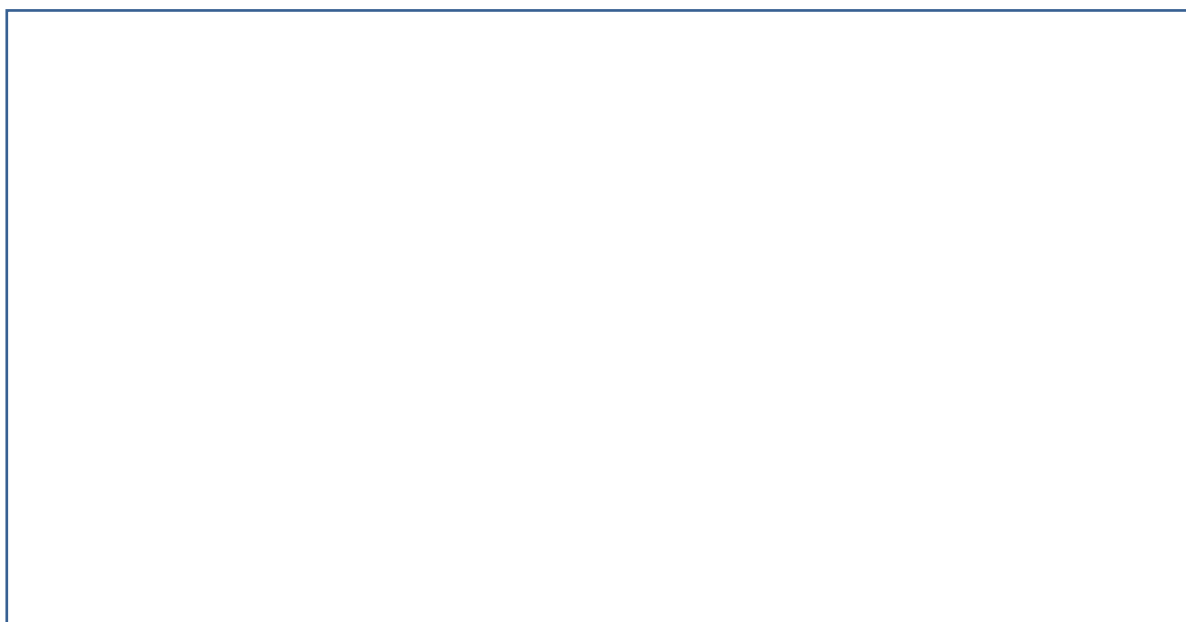
**Slika 5. Proračun opruge resolvera rotacije**



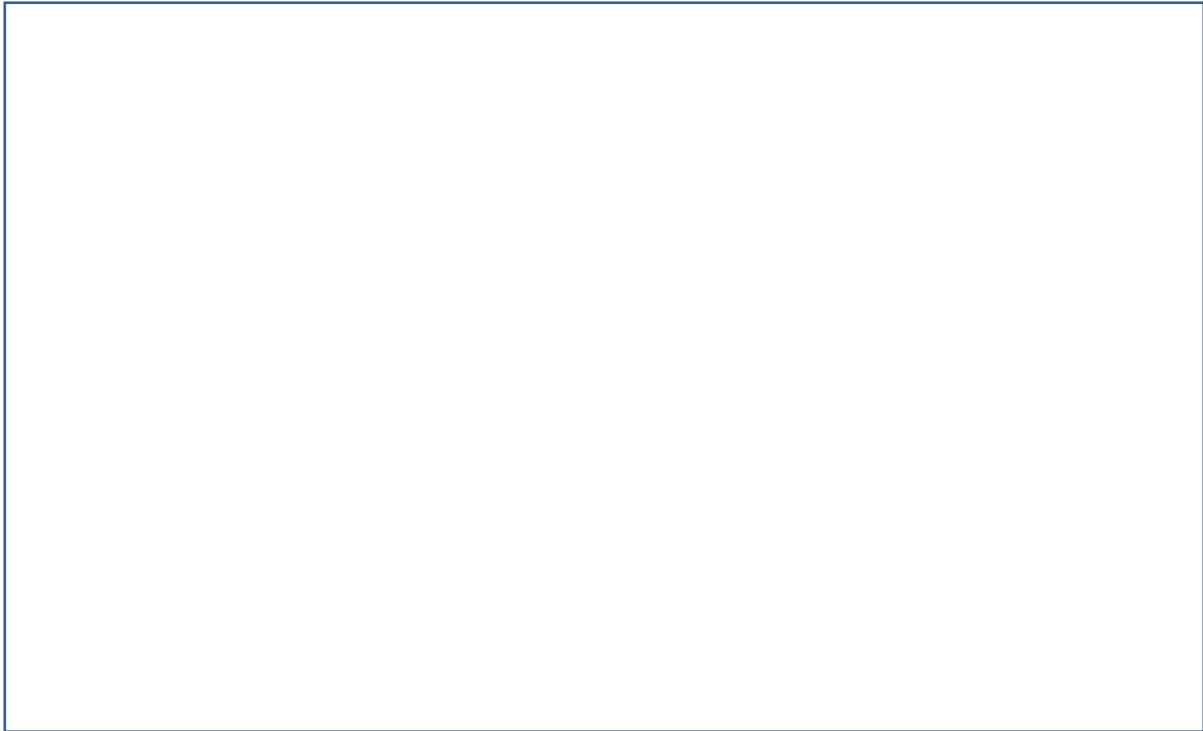
**Slika 6. Proračun opruge klackalice**

#### **4.6. Proračun zupčanika**

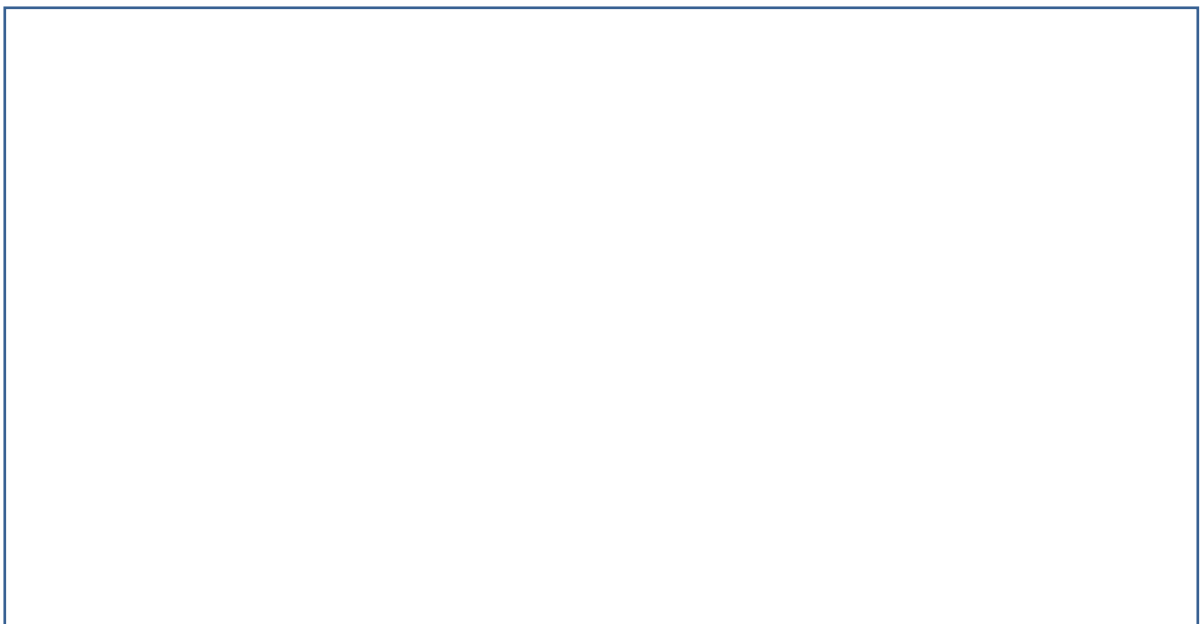
Zupčanički parovi su također proračunati upotrebom Autodesk Inventora prema normi ISO6336:1996. Poseban proračun stožnika translacije nije proveden jer se radi o kupovnim zupčanicima za koje proizvođač propisuje dopuštene radne parametre. Proračun čelnika i stožnika rotacije prikazan je na sljedećim slikama.



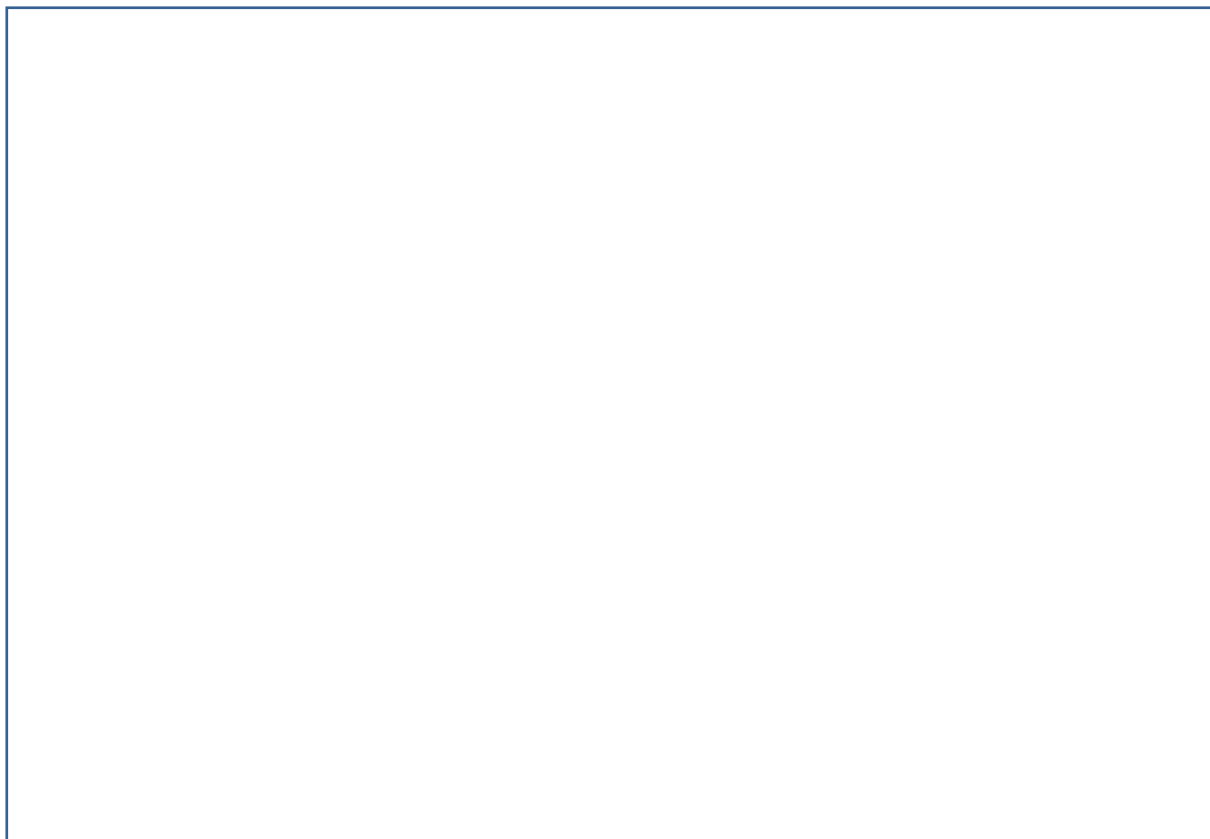
**Slika 7. Proračun čelnika 1/2**



**Slika 8. Proračun čelnika 2/2**



**Slika 9. Proračun stožnika 1/2**



**Slika 10. Proračun stožnika 2/2**

Na svakoj prvoj slici iz para (1/2) nalaze se geometrijske veličine poput modula, broja zubi, širine zupčanika i prijenosnog omjera. Druga slika iz para (2/2) prikazuje provjeru čvrstoće zupčanika s obzirom na uvjete opterećenja koji se nalazi pod kategorijom eng. „loads“.



**Slika 11. Prikaz zupčanika**

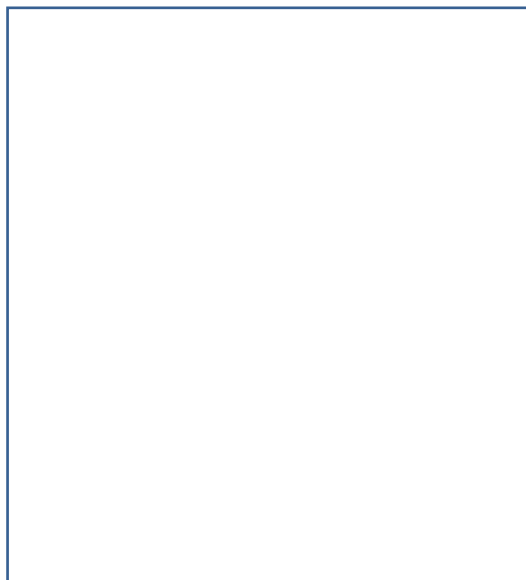
Slika 11 prikazuje smještaja zupčanika za koje je prikazan prethodni proračun. Snaga motora se preko manjeg stožnika (1) prenosi na veći stožnik (2), te se provodi redukcija brzine vrtnje. Na istom vratilu kao i veći stožnik nalazi se manji čelnik (3) iz para čelnika. On pokreće čelnik s unutarnjim ozubljenjem (4) koji je spojen na konstrukciju koja rotira.

#### **4.7. Proračun pneumatskog cilindra zaključavanja**

Prilikom proračuna pneumatskih cilindara za zaključavanje uzeto je više faktora u obzir. Veličina pneumatskih cilindara prvenstveno je diktirana željom da se minimizira pomicanje ukoliko se pojavi djelovanje sile pri samom vrhu uređaja. S obzirom da se uređaj spušta na dubinu od 20m radi se o velikom povećanju sile jer usporedbom kraka djelovanaj sile cilindra i 20m dubine dolazimo do povećanja sile od 200 puta, što znači da ukoliko se pri vrhu LHT modula koji služi za spuštanje pojavi sila u iznosu od 10N pneumatski cilindri moraju to kompenzirati sa silom u iznosu od 2000N. U odnosu na tu silu, sila potrebna za držanje mase uređaja je praktički zanemariva. Pneumatski cilindar preko poluge ostvaruje silu pritiska na BMI penetraciju. Iz konstrukcijskih razloga kut kosine poluge iznosi  $45^\circ$ . Također postoji potreba za oprugom koja će spomenutu polugu vraćati u početni položaj nakon prestanka rada pneumatskog cilindra, kako bi se omogućilo pozicioniranje uređaja. Krak djelovanja sile iz cilindra iznosi 200mm, krak sile opruge iznosi 50mm, dok krak kotačića koji pritišću BMI penetraciju iznosi također 50mm. S obzirom da uređaj radi ispod 20m vode, u obzir se treba uzeti i vanjski tlak od 2bara koji smanjuje nazivnu silu cilindra. Imajući sve navedeno u vidu nakon provedenog proračuna odabran je aluminijski pneumatski cilindar proizvođača Festo, nazivne sile 3016N. Tri takva cilindra ravnomjerno su raspoređena po obodu IDM modula kako bi se osigurala ravnomjerna sila pritiska na BMI penetraciju.

#### 4.8. Proračun svornjaka kotača

Svornjak kotača kojim pneumatski cilindar djeluje na kosinu poluge opterećen je znatnom silom od 3016N zbog čega je potrebno izvršiti provjeru čvrstoće.



Slika 12. Prikaz svornjaka kotača

Provjera čvrstoće provedena je prema [2] gdje stoji da je potrebno provjeriti svornjak na savijanje, kao i dopuštene tlakove na svornjaku i osloncu. Slika 12 prikazuje svornjak kotača koji je opterećen silom pneumatskog cilindra, te duljine  $a$  i  $b$  korištene u proračunu. Odabrani promjer svornjaka (1)  $d=12\text{mm}$ , duljina pojedine strane naslona  $a=10\text{mm}$ , dok je duljina površine svornjaka opterećene tlakom  $b=22\text{mm}$  (površina dodira svornjaka (1) i kotača (2)). Prema [2] slijede naprezanja:

$$\begin{aligned}
 p_{\text{vanjski}} &= \frac{F_{\text{cilindra}}}{2 \cdot a \cdot d} = 12,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\
 p_{\text{unutarnji}} &= \frac{F_{\text{cilindra}}}{b \cdot d} = 11,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\
 \sigma_f &= \frac{0,5F_{\text{cilindra}} \cdot 0,5a}{0,1d^3} = 44,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \\
 \tau &= \frac{F_{\text{cilindra}}}{2 \cdot \frac{d^2 \cdot 2\pi}{4}} = 13,48 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}
 \end{aligned} \tag{27}$$

Prema [2] dopuštene vrijednosti za svornjak izrađen od materijala Č0545 su:

$$P_{dop} = 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{dop} = 125 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau_{dop} = 72 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Vidljivo je da svornjak zadovoljava postavljene uvjete čvrstoće.

Iste dimenzije su odabrane i za svornjak kotača koji naliježe na vrh BMI penetracije.



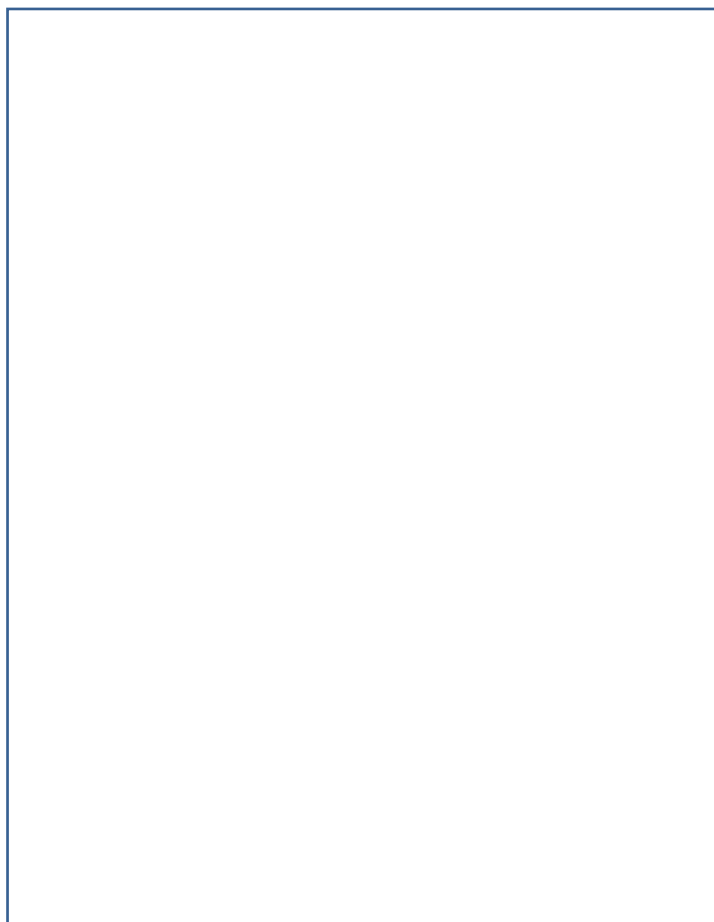
## 5. PRIKAZ POJEDINIH KONSTRUKCIJSKIH RJEŠENJA

Nakon faze detaljiranja dobiven je konačni oblik uređaja. U sljedećim odjeljcima biti će prikazana rješenja ključna za funkcioniranje uređaja, kao i njihov kratak opis. Koristit će se izometrijski prikaz modela iz programa Autodesk Inventor 2014.

### 5.1. Osiguranje uređaja od pomicanja

Krajnja izvedba mehanizma za osiguranje uređaja od pomicanja je skoro u potpunosti jednaka odabranom konceptom rješenju. Jedina razlika je u korištenju vlačnih umjesto tlačnih opruga.

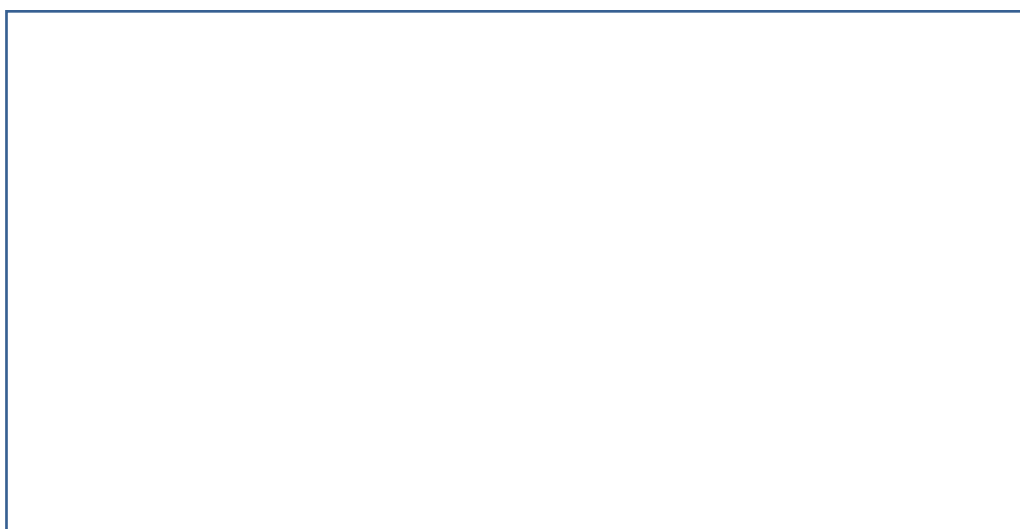
Pneumatski cilindar (1) preko kotača (3) djeluje na klackalicu (4) određenom silom. Kotač se nalazi na nosaču (2) koji je navojem spojen na motku pneumatskog cilindra. Klackalica ostvaruje polužno djelovanje okretanjem oko svornjaka na nosaču (5) koji je vijcima pričvršćen na ostatak konstrukcije. Sila pritiska se na BMI penetraciju (8) ostvaruje preko kotača 2 (7). Po obodu uređaja nalaze se 3 identična mehanizma prikazana na Slika 13, čijim se istovremenim djelovanjem sprječava pomicanje uređaja prilikom ispitivanja.



**Slika 13. Prikaz osiguranja uređaja od pomicanja**

## 5.2. Pogon translacije

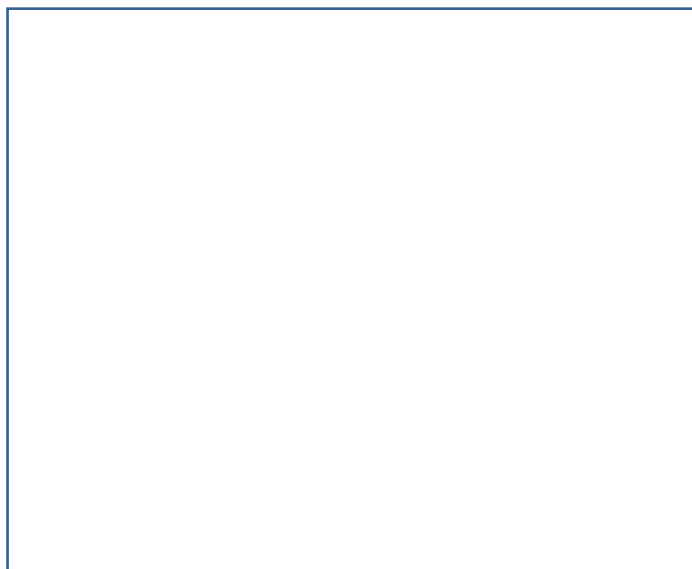
Prilikom konstrukcijske razrade pogona translacije pokazalo se da nema potrebe za redukcijom broja okretaja elektromotora korištenjem zupčanika kao što je to bilo predviđeno u konceptu. Sklop elektromotor-reduktor (1) preko para stožnika (2) i (6) pokreće kuglično vreteno (nije vidljivo na Slika 14) preko kojega se obavlja translacija sonde. Stožnik (6) preko stožnika istih dimenzija kao (2) pokreće vratilo sklopa resolvera (3) kako bi se pratila pozicija sonde. Opruga (4) osigurava aksijalnu silu kojom se eliminira zračnost između para stožnika. Sklop motor-reduktor, kao i sklop resolvera vijcima su pričvršćeni na nosač (6) koji preuzima sile i momente te ih prenosi na glavno kućište. Na Slika 14 vidljiv je i sklop eng. „Limit Switcha“ koji je zadužen za detekciju krajnjeg položaja translacije.



**Slika 14. Prikaz pogona translacije**

### 5.3. Prihvat sonde

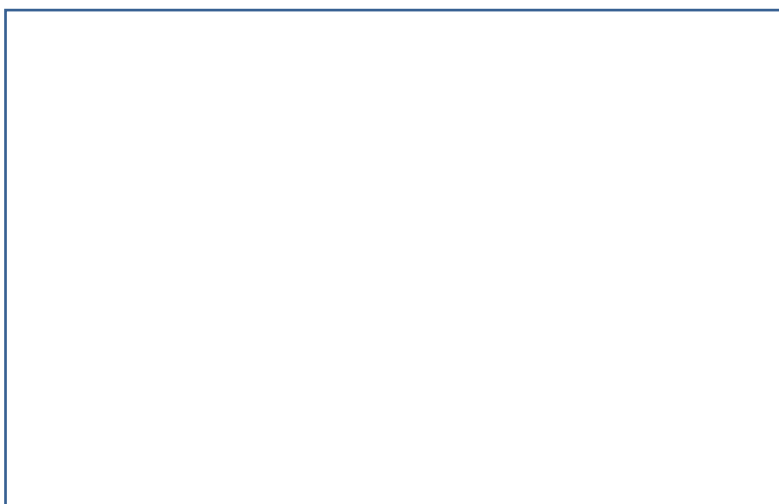
Kuglično vreteno (1) pokreće maticu (2) na kojoj se nalazi nosač sonde (3). Ispitna sonda (6) se na nosač pritišće komponentom (7) pritezanjem vijaka. Na komponenti (7) se nalazi i fleksibilni nosač kabela sonde (8). Pravilno vođenje matice osigurava se korištenje dvije cilindrične šipke od nehrđajućeg čelika koje prolaze kroz kuglične vodilice (5) proizvođača Misumi.



**Slika 15. Prikaz prihvata sonde**

### 5.4. Graničnik rotacije

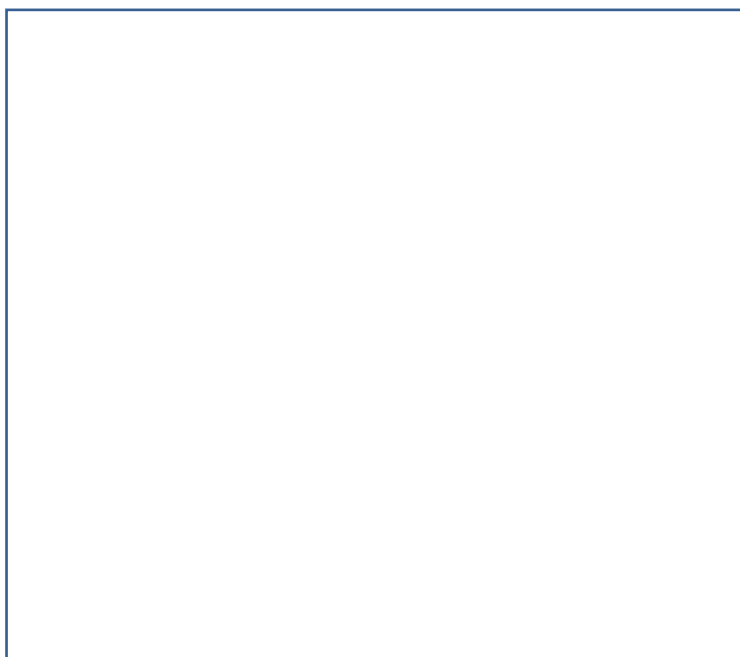
Na zupčaniku (3) nalazi se vijak koji udara u klizač (1) i rotira ga sve dok klizač ne udari u čelični nosač (2), te na taj način zaustavi rotaciju. Netom prije toga aktivira se eng. „Limit Switch“ (4) koji daje signal da je dostignuta krajnja pozicija rotacije.



**Slika 16. Prikaz graničnika rotacije**

### 5.5. Pogon rotacije

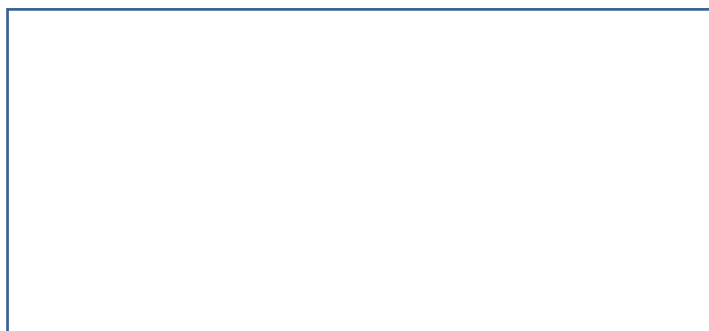
Kao i kod pogona translacije, pogon rotacije položen je horizontalno kako bi se smanjio volumen koji zauzima u kućištu. Sklop motor-reduktor (1) preko stožnika (2) pokretao je stožnik (3). Na istom vratilu sa stožnikom (3) nalazio se i čelnik (poz. 3, Slika 11) koji je pokretao zupčanik s unutarnjim ozubljenjem (4) koji je obavljao rotaciju dijelova. Stožnik (3) pokretao je stožnik (7) koji se nalazio na vratilu sklopa resolvera (5). Kao i kod translacije, opruga (6) djelovala je silom u aksijalnom smjeru (u odnosu na vratilo) kako bi se poništila zračnost između stožnika (3) i (7). Prijenosni odnos stožnika je 2:1, a čelnika 8:1.



**Slika 17. Prikaz pogona rotacije**

### 5.6. Eliminacija pogreške centriranja

Prirubnica (1) spaja cijeli uređaj s LHT modulom. Na ploči (2) nalazi se 6 vijaka (3) čijim se pritezanjem regulira sila u oprugama (4). Na taj način se osigurava elastična veza uređaja s okolinom i dopuštaju određena odstupanja prilikom centriranja.



**Slika 18. Prikaz elastične veze s okolinom**

## 5.7. Mehanizam JWM modula

Rješenje mehanizma JWM modula prikazanog na Slika 19 se ni po čemu ne razlikuje od onoga u konceptualnoj fazi. Pneumatski cilindar (1) ostvaruje silu u vertikalnom smjeru i spušta ostatak mehanizma na potrebnu dubinu. Pravilno vođenje ostvaruje se korištenjem kugličnih vodilica (8) u kombinaciji s okruglim šipkama od nehrđajućeg čelika (7). Nosač (2) povezuje cijeli mehanizam s ostatkom uređaja i prenosi sve nastale sile i momente. Na nosaču (3) nalazi se drugi pneumatski cilindar (4) koji je tako povezan da mu je omogućena rotacija oko jedne osi. Na taj način se osigurava da nema poprečnih sila na motku pneumatskog cilindra jer je omogućeno njegovo slobodno okretanje. Ista veza (6) nalazi se i između pneumatskog cilindra (4) i nosača JWM sonde (nije prikazano na Slika 19).

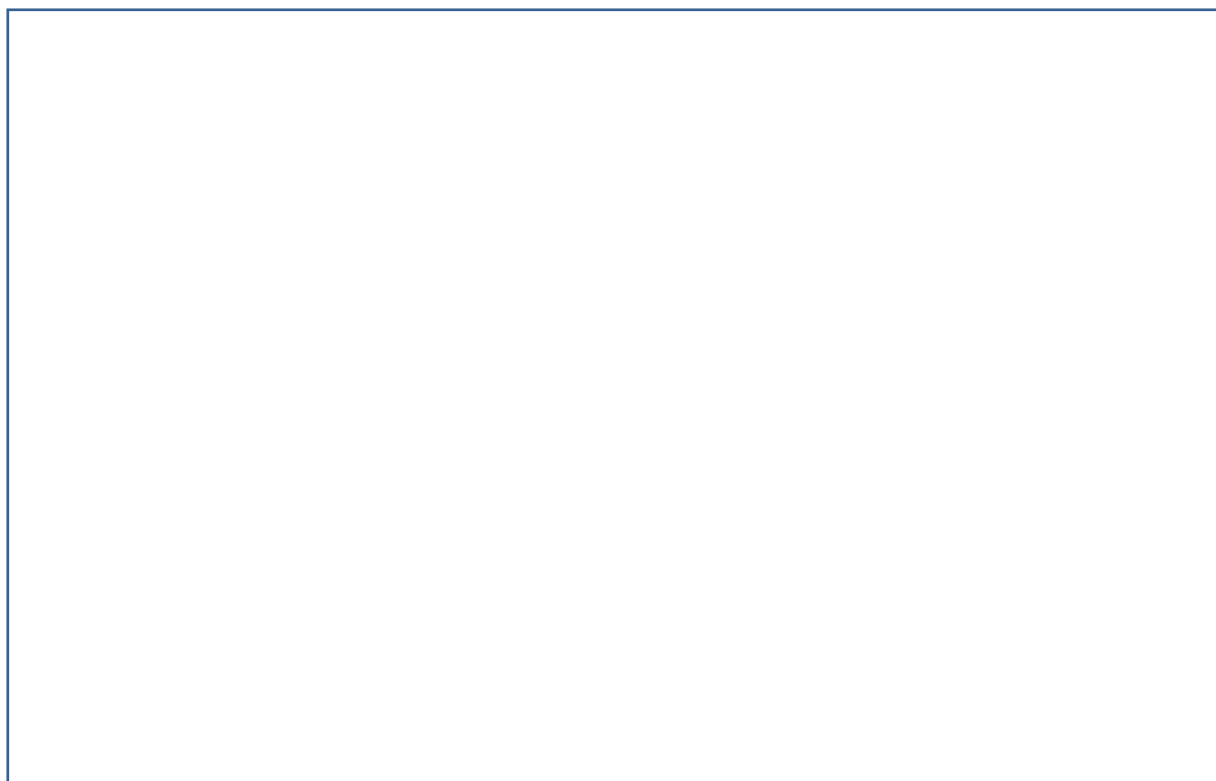
Kao što je već spomenuto, za ispitivanje je idealno da rezultanta sile pritiska prolazi kroz vrh ispitne sonde i J-tip zavara. Fino podešavanje smjera rezultante moguće je preko spoja pneumatskog cilindra (4) i nosača (3) na način da se između te dvije komponente postave limovi određene debljine kako bi se promijenio smjer sile pneumatskog cilindra.



**Slika 19. Prikaz mehanizma JWM modula**

## 6. SLJEDIVOST U RAZVOJNOM PROJEKTU

Pored konstruiranja uređaja posvećena je pozornost i uspostavljanju relacija sljedivosti unutar i između dokumenata i pojmova vezanih uz projekt, posebno na zapisivanje tijekom odlučivanja. Pri tome su se koristili programski alati razvijeni na Katedri za Konstruiranje i razvoj proizvoda Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Sljedivost bi trebala omogućiti razumijevanje svih semantičkih veza koje nastaju kroz životni vijek proizvoda. Postojanje takvog zapisa omogućilo bi inženjerima, ali i pripadnicima drugih struka, bolji uvid u proizvod i mogućnost lakšeg razumijevanja tijekom odlučivanja koje je dovelo do konačnog izgleda određenog proizvoda. Samim time, omogućava se lakše korištenje dostupnih informacija za buduće projekte. Efikasna vizualizacija i manipulacija velikim mrežama relacija je primarni uvjet za uspješnu implementaciju sljedivosti u industrijskoj praksi [7]. Razvoj uređaja za ispitivanje instrumentacijskih cijevi na dnu reaktorske posude je ujedno i studija slučaja (eng. case study) kroz koju se želi doći do uvida u valjanost metode predložene u [7]. Okosnica predložene metode je upotreba MDM-a (eng. Multiple Domain Matrix, Slika 20).



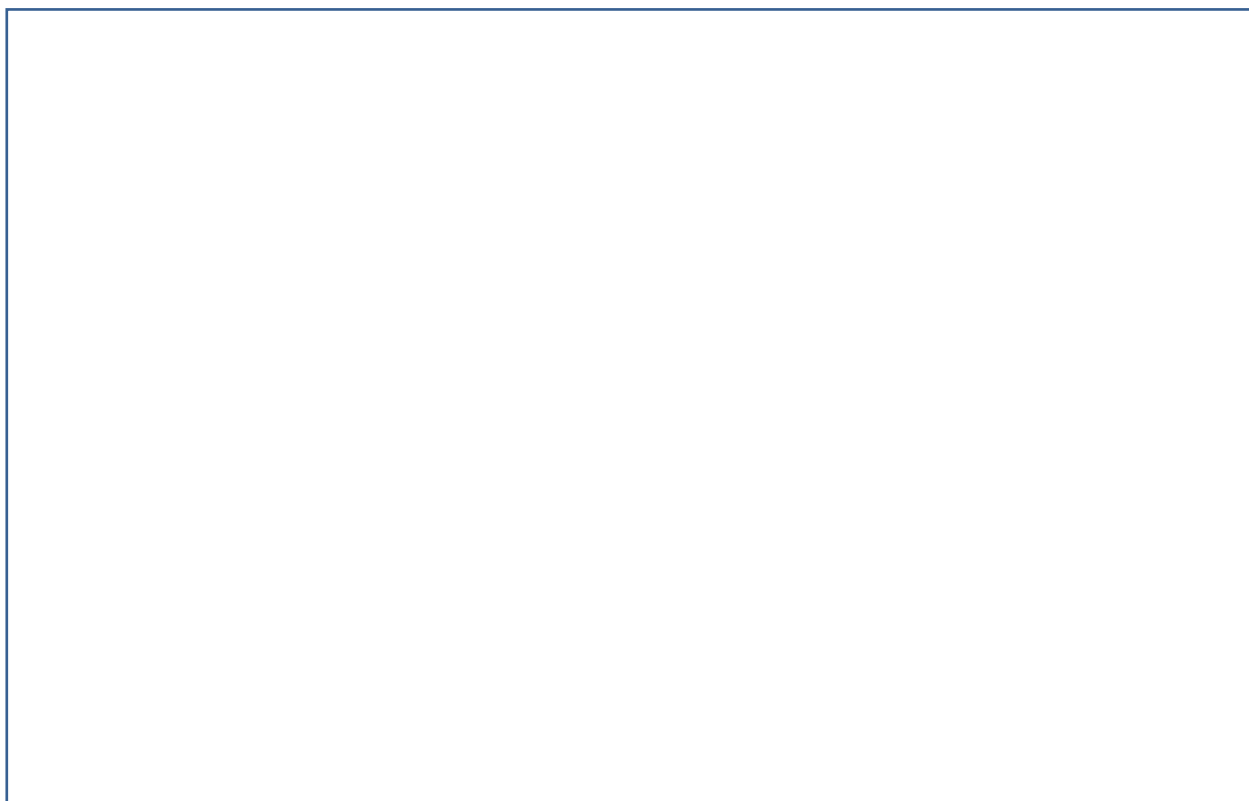
**Slika 20. MDM za zapisivanje sljedivosti**

Za potrebe ovog rada prikazana matrica (Slika 20) izrađena je u programskom alatu DesignVUE. Svakoj od prikazanih poddomena MDM-a moguće je pristupiti klikom miša što korisnika odvodi na prikaz sadržaja odabrane poddomene. Također, uz DesignVUE, koristio se programski alat TraceExplorer razvijen na Katedri za Konstruiranje i razvoj proizvoda.

Postavljeni cilj iza studije slučaja je da se kroz realan razvojni projekt predloži najpovoljniji oblik zapisa u pojedinoj poddomeni, te MDM proširi s određenim kategorijama ili poddomenama ukoliko to razvojni projekt zahtjeva. Kroz sljedeća poglavlja prikazat će se predloženi oblici zapisa pojedinih kategorija, kao i dodatne poddomene za kojima se javila potreba u razvojnem projektu.

### **6.1. Proširenje MDM-a**

U razvojnem projektu se javila potreba za dodatnim poddomenama MDM-a jer se željeni podaci nisu mogli adekvatno smjestiti u predložene domene. Potrebne su četiri nove kategorije s kojima se osigurava adekvatna raspodjela generiranih informacija u razvojnem projektu (prijedlozi 1-4, Slika 21). Kada je riječ o sljedivosti, osim zapisivanja znanja, bitna je i njegova kvalifikacija, odnosno dodijeliti ga u pripadajuću poddomenu.



**Slika 21. Prijedlog proširenja MDM-a**

### **6.1.1. Prijedlog 1**

Ova poddomena se pokazala kao najvažnija kategorija koja nije predložena od strane [7]. U njoj se nalaze zapisi kako određeni zahtjevi utječu na odabir određenih komponenti. U konkretnom slučaju želja voditelja projekta je bila da se za pneumatsku tehniku koriste proizvodi tvrtke Festo, a za elektromotore i pripadajuću priključnu tehniku asortiman tvrtke Maxon. Te „želje“ se prikazuju u listi zahtjeva, bilo da dolaze od voditelja projekta, vlasnika kompanije ili naručitelja i kao takve imaju utjecaj na krajnji izgled proizvoda. Nepostojanje predložene kategorije može stvarati probleme prilikom revizije projekta, gdje bi bio otežan pristup razlozima koji stoje iza točno tih odabira.

### **6.1.2. Prijedlog 2**

U ovom prijedlogu se radi o potrebi za kategorijom kojom zahtjevi iziskuju određene ljude. Konkretno se može dogoditi da zbog specifičnosti projekta postoji potreba za time da točno određeni stručnjaci budu sastavni dio razvojnog tima iz mnogo različitih razloga koji se također mogu navesti kako bi se dobila sveukupna slika. Na ovaj način se može zapisati razlog zbog kojeg je primjerice netko prebačen s jednog projekta na drugi, argumentirati razloge i potkrijepiti odlukom vodstva u obliku dokumenta ili neke druge uredbe.

Također, upotreba određenih proizvodnih tehnologija može direktno značiti potrebu za suradnjom sa specifičnim kooperantima ili dobavljačima. Sve to uključuje se u ovu predloženu poddomenu. Način zapisa je još uvijek predmet razmatranja.

### **6.1.3. Prijedlozi 3 i 4**

Potreba za ove dvije poddomene je svakako manja nego za prethodne dvije. Prijedlog 3 obuhvaća ljude odgovorne za ispunjenje zahtjeva, dok analogno tome, prijedlog 4 obuhvaća ljude odgovorne za ispunjenje funkcija. Ukoliko se malo bolje promotri Slika 20 uočava se da su prijedlozi 3 i 4 zapravo objedinjeni u poddomeni „Ljudi odgovorni za komponente“. Jer komponente su te koje ispunjavaju zahtjeve i funkcije i samim time ljudi odgovorni za te komponente su odgovorni i za ispunjavanje zahtjeva i funkcija povezanih s njima. Prijedlog 3 je, gledajući sektor industrije, prihvatljiviji iz razloga što ta poddomena može obuhvaćati ljude zadužene za ispunjenje određenih zahtjeva ili za provjeru ispunjenja određenih zahtjeva, čime se dolazi do ljudi odgovornih za provedbu ispitivanja proizvoda. U svakom slučaju oba prijedloga su s teoretske strane prihvatljiva.



## 6.2. Primjeri zapisa

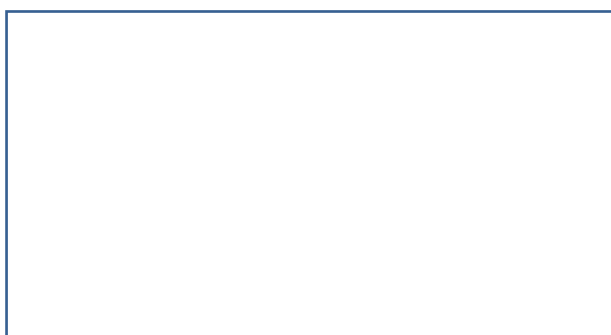
Tijekom ovog razvojnog projekta generirale su se informacije kojima su popunjene sljedeće poddomene matrice sa Slika 20:

- Zahtjevi
- Sljedivost dijelova informacija
- Datoteke koje definiraju komponente
- Dijagram funkcijske analize
- Funkcije koje predstavljaju konstrukcijske probleme
- Komponente koje realiziraju zahtjeve
- Komponente koje realiziraju funkcije
- Struktura proizvoda

Ostale poddomene su izostavljene ili zato što nije bilo informacija njihovog tipa ili iz razloga što se za potrebe ovog razvoja mogu zanemariti.

### 6.2.1. Zahtjevi

U ovoj glavnoj kategoriji svi zahtjevi proizašli iz liste zahtjeva (Tablica 3) prikazani su kao zaseban čvor (Slika 22). Klikom miša na pojedini čvor može se pristupiti detaljima povezanima s njime.

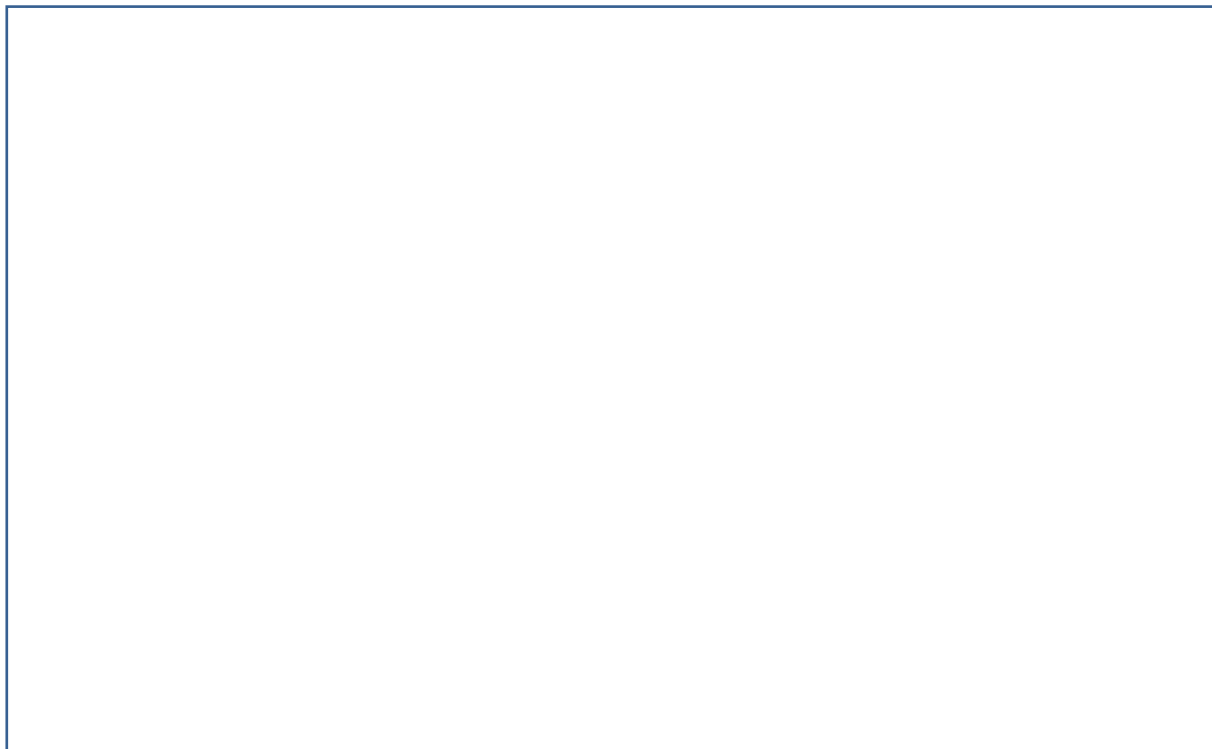


**Slika 22. Prikaz dijela čvorova liste zahtjeva**

Ako je potrebno saznati na koji je način ispunjen zahtjev 2 „Brzina sonde u aksijalnom smjeru: 0-50mm/s“ dovoljno je kliknuti na čvor i time otvoriti njegove detalje. Slika 23 prikazuje upravo te detalje gdje se vidi:

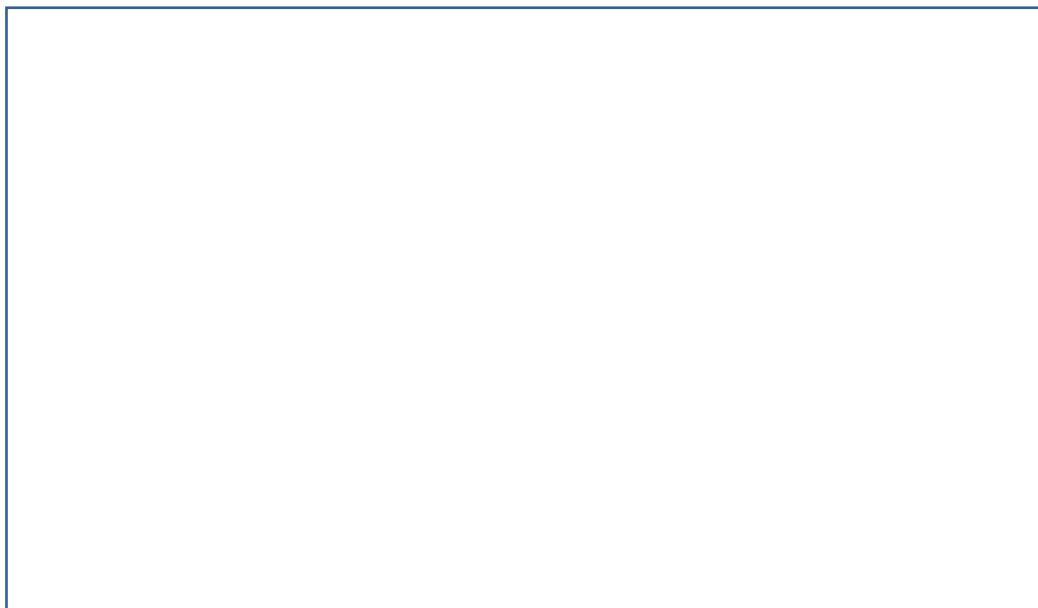
- Prikaz dijela CAD modela koji uključuje elektromotor s reduktorom, par stožnika, vreteno s kuglicama i nosač sonde
- Tekstualni opis pojedine slike

- Dijagram iz kataloga motora koji pokazuje da je motor pogodan za željene radne parametre
- Poveznicu na datoteku s proračunom motora i poveznicu na katalog motora i reduktora



### **Slika 23. Ispunjenje zahtjeva 2**

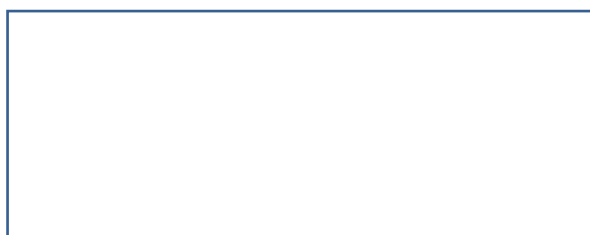
Ovakvom vizualizacijom je osiguran brz i jednostavan način dolaska do željenih informacija. Ovo je izuzetno pogodno kada konstruktor na novom projektu želi iskoristiti već postojeća rješenja. Nadalje, na čvor ovog zahtjeva zasigurno bi se vezali rezultati ispitivanja ukoliko bi se ona provodila, kako bi se osigurao uvid i u performanse gotovog proizvoda. Slika 24 prikazuje još jedan primjer na kojem je prikazano ispunjenje zahtjeva broj 12. Ovdje se može uočiti tekstualna napomena koja objašnjava zašto je odabran određeni prijenosni odnos reduktora.



**Slika 24. Ispunjenje zahtjeva 12**

### **6.2.2. Sljedivost dijelova informacija**

Za ovu poddomenu se koristio programski alat TraceExplorer detaljno opisan u [7] i [8]. Glavna namjena ove poddomene je zapisati i prikazati međuovisnost pojedinih dokumenata. Jednostavan primjer je ukoliko postoji CAD dokument i njemu odgovarajuća datoteka s zapisanim proračunom, katalog, rezultat provedenog ispitivanja, IBIS dijagram ili bilo koji oblik vezanog dokumenta. Slika 25 grafički prikazuje jednu jednostavnu vezu kreiranu unutar TraceExplorer sustava. Riječ je o CAD dokumentu sklopa cilindra i njemu pripadajućem katalogu u obliku PDF datoteke.



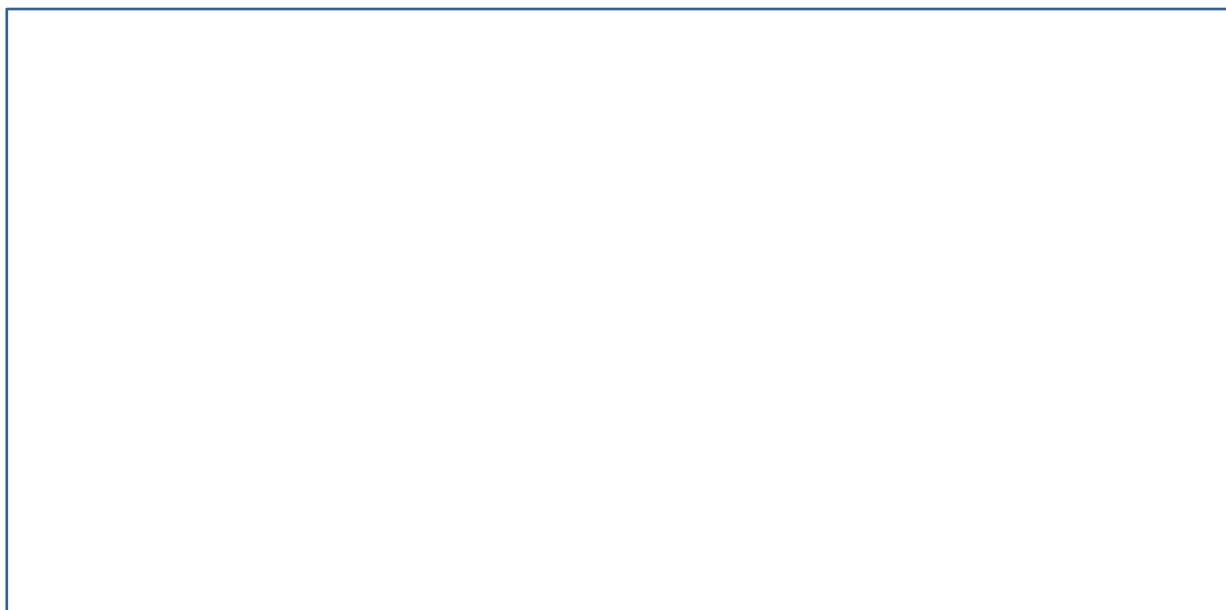
**Slika 25. Prikaz jednostavne veze dokumenata**

Prikaz je jasan, lako čitljiv i ne postoji problem sa zagušenjem zbog prevelikog broja veza. Ukoliko se poveća broj vezanih dokumenata na CAD dokument, prikaz će i dalje ostati jasan jer će se veze granati koncentrično iz CAD dokumenta.

Problem je što ovakav prikaz, gdje CAD dokument sklopa nije povezan s višim razinama strukture proizvoda, ne daje puni uvid u međusobnu povezanost svih dokumenata. Slika 26 prikazuje mrežu dokumenata na kojoj je crvenim kružićem označen CAD dokument glavnog sklopa iz kojega se dalje granaju ostali CAD dokumenti poštujući strukturu proizvoda. Jedino

je CAD dokument podsklopa označen plavim kružićem u potpunosti povezan sa svim CAD datotekama pripadajućih komponenti, dok sve ostale CAD datoteke predstavljaju pojedine podsklopove i ne granaju se na nižu razinu. I u tako nepotpuno prikazanoj strukturi vidljivo je da prikaz postaje nepregledan i teško shvatljiv s povećanjem broja elemenata ili jednostavno s povećanjem kompleksnosti proizvoda koja za sobom automatski povlači veći broj komponenti i sklopova na koje su vezani razni dokumenti.

Da bi se izbjegla nepreglednost i gomilanje neželjenih datoteka iz prikaza potrebno je izmijeniti način na koji aplikacija TraceExplorer generira dijagrame. Prvenstveno je potrebno uvesti različite vrste veza između komponenata kako bi se omogućilo filtriranje sadržaja koji se želi prikazati. Tako bi se omogućilo da se na dijagramu prikaže CAD dokument komponente na najnižoj razini i samo one komponente s viših razina s kojima je taj dokument povezan, izbjegavajući susjedne čvorove koji nisu u direktnoj vezi s promatranom komponentom, čime se pojednostavljuje dijagramski prikaz. Vrste veza i mogući oblici filtriranja nisu bili detaljnije razmatrani i biti će predmet daljnjeg istraživanja.



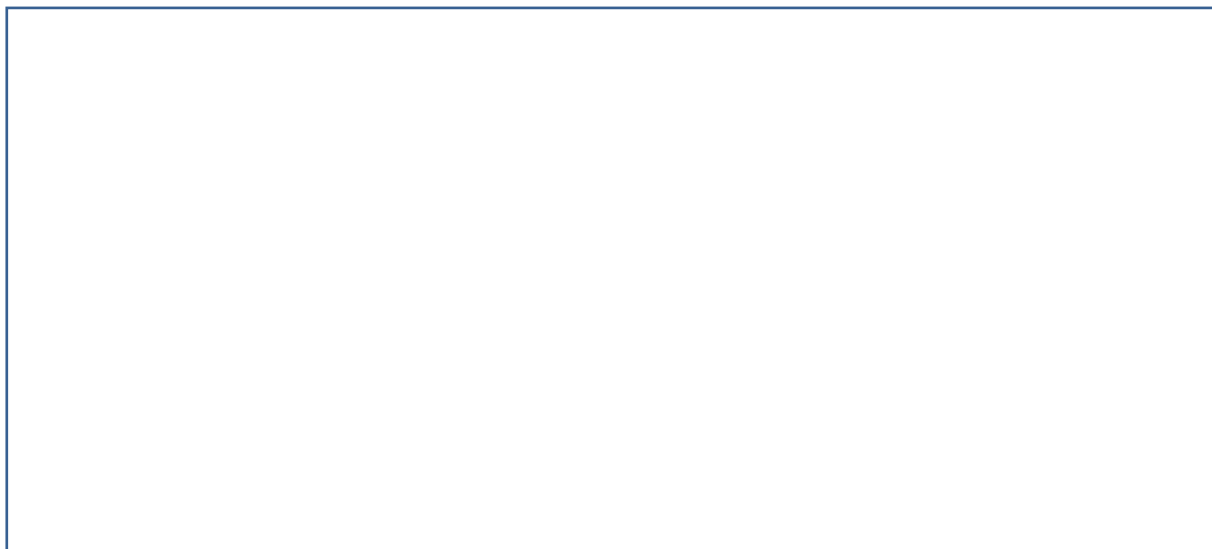
**Slika 26. Prikaz komplicirane veze dokumenata**

### **6.2.3. Datoteke koje definiraju komponente**

Ova poddomena je usko povezana s prethodno opisanom cjelinom, jer se prvenstveno radi o povezivanju komponenti s odgovarajućim datotekama, što je primarna funkcija TraceExplorera. Stoga se za sljedeću verziju MDM-a, uz već spomenuta 4 prijedloga,

predlaže i razmatranje objedinjavanje cijelog prvog reda unutar TraceExplorer programskog alata.

Slika 27 prikazuje zapis ove poddomene. Prvenstveno se radi o standardnim strojarskim dijelovima poput opruga ili elektromotora, uz koje su vezane datoteke s njihovim proračunima ili izvadak iz kataloga koji definira određene uvjete priključenja. Nije nužno da informacije budu prikazane grafički kao što je to u konkretnom slučaju. Ostavlja se mogućnost da veza datoteke-komponenta budu prikazane matrično, te da se tek odabirom određene komponente otvara detaljniji grafički prikaz poput onoga na Slika 27. Na taj način bi se na prvoj razini poddomene osigurala preglednost koju grafički prikaz gubi s povećanjem broja komponenti ukoliko se one prikazuju istovremeno.



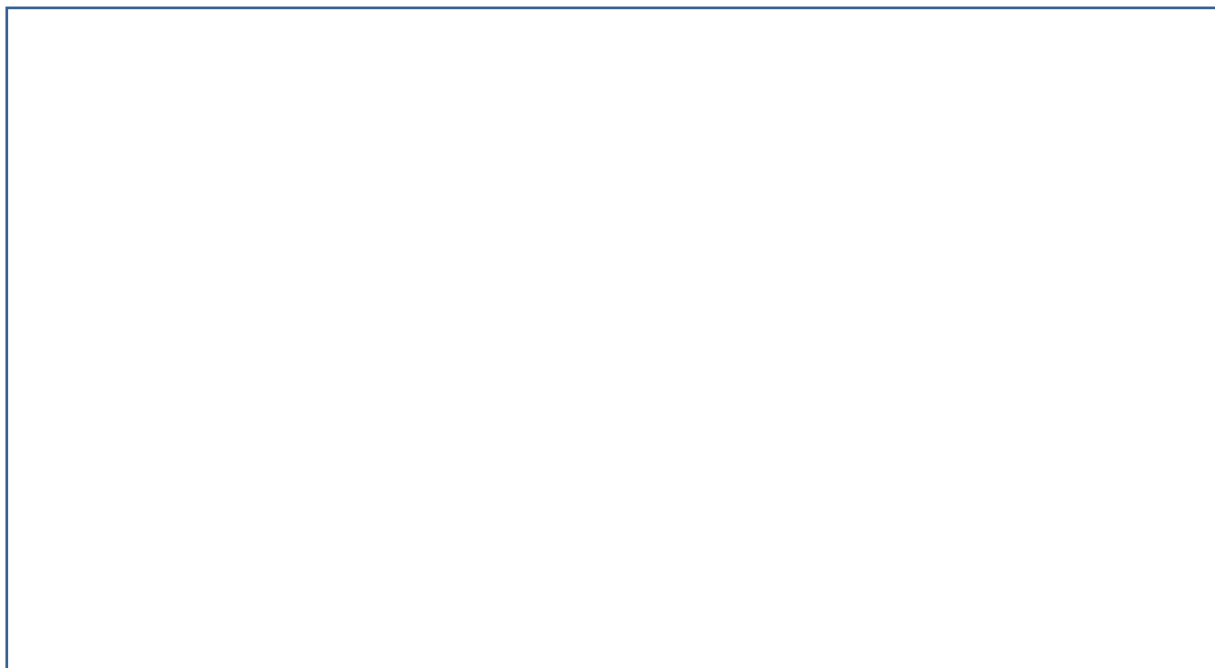
**Slika 27. Prikaz poddomene: Datoteke koje definiraju komponente**

#### **6.2.4. *Dijagram funkcijske analize***

Ovo područje još uvijek zahtjeva određena teoretska razmatranja u pogledu oblika zapisa podataka. Za ovaj projekt izrađena je funkcijska dekompozicija, koja je ujedno korištena kao oblik zapisa za poddomenu „dijagram funkcijske analize“. Određeni autori funkcijsku analizu raščlanjuju na oblik koji pokazuje međusobnu povezanost komponenti proizvoda u samom sklopu, dok drugi oblik pokazuje njihovo međusobno djelovanje prilikom uporabe. Zaključak koji proizlazi iz provedene analize navodi na to da oblik zapisa ove poddomene uvelike ovisi o potrebama i željama sudionika razvojnog projekta.

### **6.2.5. Funkcije koje predstavljaju konstrukcijske probleme**

Oblik zapisa ove poddomene je za potrebe ovog projekta bio isti kao i kod zapisa zahtjeva, svaka problematična funkcija predstavlja jedan čvor u grafičkom prikazu. Oko oblika zapisa ove poddomene na najvišoj razini moguće je voditi dodatne rasprave, ali za zapis problematike vezane uz određenu funkciju najboljima su se pokazali IBIS (eng. Issue-Based Information System) dijagrami. Slika 28 prikazuje jedan takav dijagram koji je nastao iz rasprave oko rješenja funkcije: „Uređaj od pomicanja prilikom ispitivanja osigurati.“



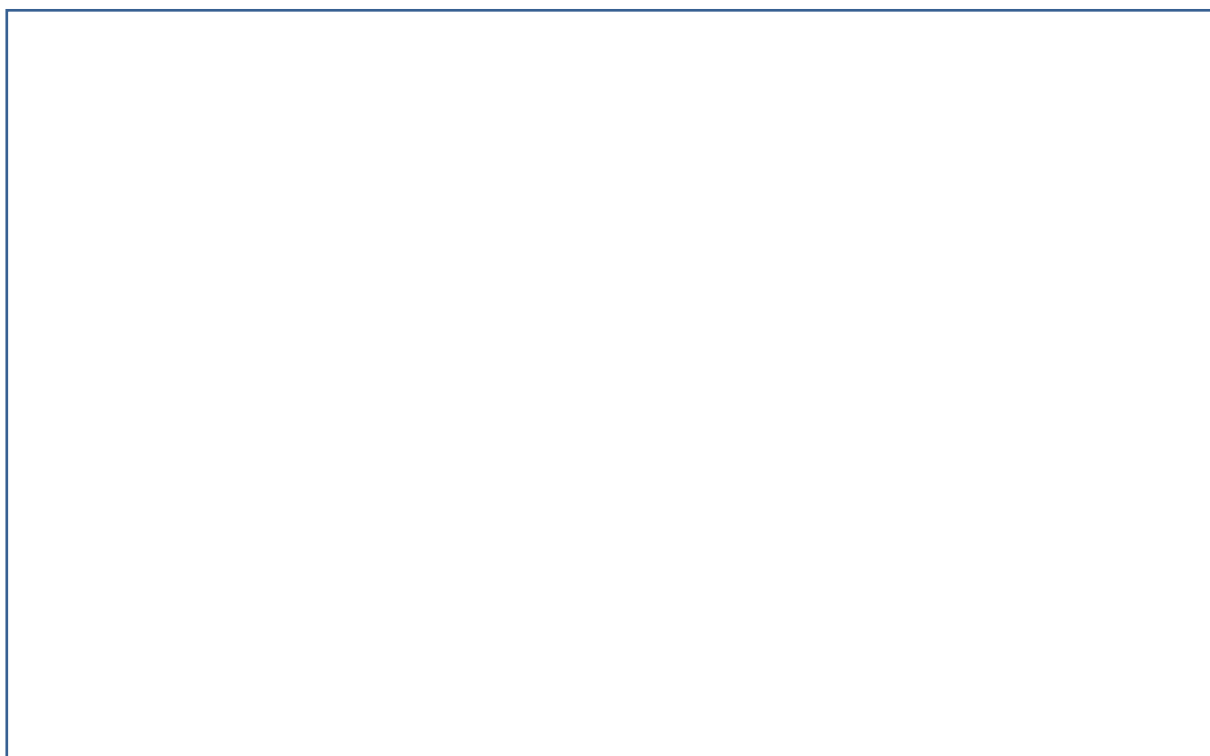
**Slika 28. Primjer generiranog IBIS dijagrama**

Prednost ovakog oblika zapisa je u tome što bilo koja osoba koja nije direktno sudjelovala u procesu odlučivanja na brz i jednostavan način dolazi do informacije zašto je odabrano određeno rješenje i jesu li uopće postojale druge varijante. Na prikazanom dijagramu se jasno mogu vidjeti sva predložena rješenja u obliku skice i argumenti za i protiv svakoga od njih.

### **6.2.6. Komponente koje realiziraju zahtjeve i komponente koje realiziraju funkcije**

Najintuitivniji oblik zapisa ove dvije poddomene zasigurno je matrični zapis. Slika 29 prikazuje jedan takav zapis za poddomenu „Komponente koje realiziraju zahtjeve“. Analogno tome moguće je kreirati i matricu za poddomenu „Komponente koje realiziraju funkcije“. Ukoliko bi zapis ove poddomene ostao samo na prikazanoj matrici ne bi ostvarili željeni učinak, stoga je potrebno ostvariti interaktivnost matričnog zapisa. Ta interaktivnost bi se

očitovala u tome da je iz ovoga zapisa klikom miša na zahtjev broj 2 moguće pristupiti informacijama vezanima za njega, poput dijagrama na Slika 23. Nadalje, svaka pojedina veza, prikazana znakom X u matrici, otvarala bi novi zapis s pojedinostima veze između komponente i zahtjeva. Na taj način osigurava se potpuna sljedivost i pristup svim informacijama povezanima sa zahtjevima i komponentama prikazanima u ovoj poddomeni. Jedan od prijedloga je i da se oblik zapisa ne ograničava na matrični, jer bi u određenim uvjetima prikladniji bio grafički oblik gdje svaka komponenta/zahtjev predstavljaju jedan čvor povezan vezama različitih vrsta s drugim odgovarajućim čvorovima.

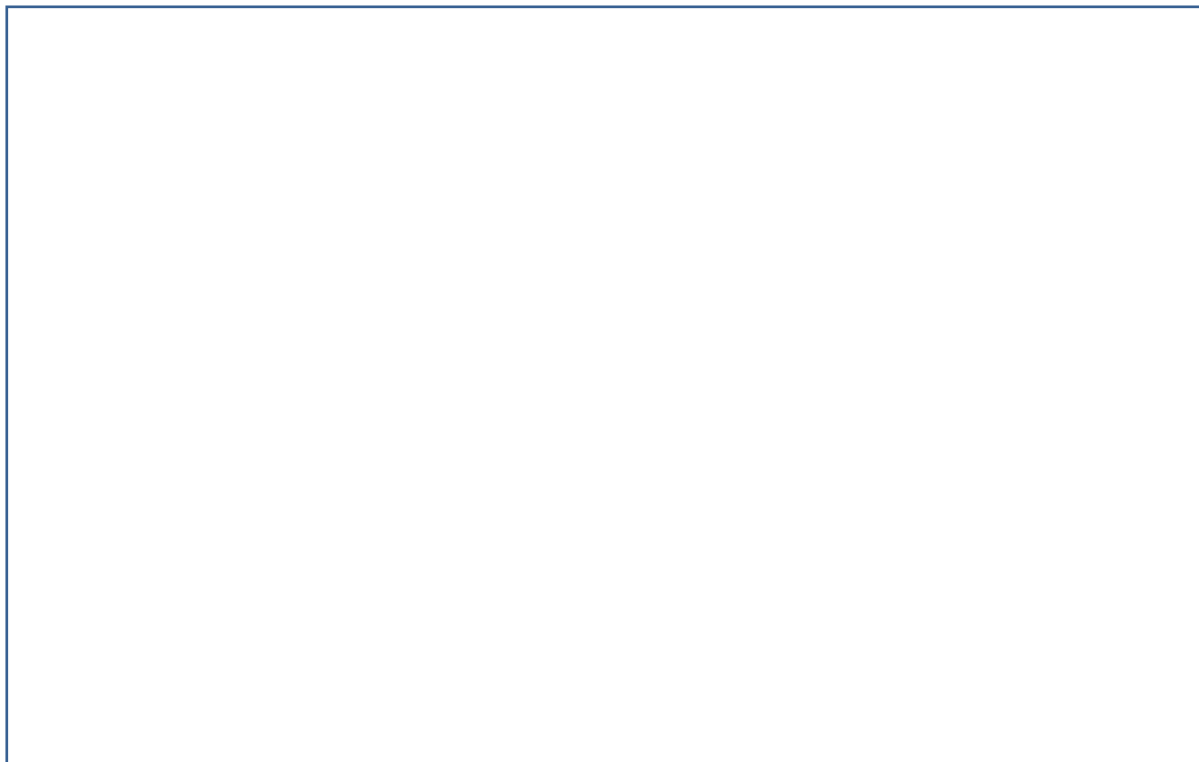


**Slika 29. Zapis komponenta-zahtjev**

### **6.2.7. Struktura proizvoda**

Prilikom pokretanja razvojnog projekta usuglašen je način na koji će se nazivati svi CAD dokumenti i na koji način će se spremati na računalo. S obzirom da se radi o preglednom, strukturiranom načinu, koji sam po sebi daje osnovni uvid u strukturu cjelokupnog proizvoda, isti je iskorišten i za osnovni prikaz poddomene „struktura proizvoda“. Slika 30 grafički prikazuje grananje strukture proizvoda. Osnovna podjela podsklopova vidljiva je na skupu 5 TAR\_00 foldera koji se kasnije granaju na svoje podsklopove i komponente. Jedna od mogućnosti je i korištenje BOM (eng. Bill of Material) liste CAD alata koji se koristi za konstruiranje, ali tako generirane liste su najčešće same po sebi nepregledne i teške za

snalaženje nekome tko nije upoznat s projektom, stoga ih se preporuča izbjegavati. Detaljniji prikaz strukture proizvoda od onoga na Slika 30 za sobom povlači i problem ažuriranja. Neovisno o načinu prikaza strukture, ukoliko se prikazuje struktura do razine komponenti, neophodno je osigurati automatizirano ažuriranje s CAD alatom. U suprotnome, ostavlja se mogućnost za nesklad između stvarnog stanja i stanja prikazanog u zapisu sljedivosti.



**Slika 30. Struktura proizvoda**



## 7. ZAKLJUČAK

Konstruirani uređaj u potpunosti zadovoljava sve uvjete postavljenje u listi zahtjeva i kao takav je pogodan za obavljanje ispitivanja BMI penetracija prema svim važećim pravilnicima. Izmjenjivost sonde i laka prilagodba prihvata da odgovara njihovim dimenzijama čini ga fleksibilnim u pogledu mogućih promjena. Također, pogonski dijelovi uređaja dimenzionirani su za brzine veće od propisanih, tako da je ostvarena i fleksibilnost s kinematske strane. Korištenje aluminija kao glavnog materijala osigurava otpornost na koroziju što u kombinaciji s izvedenim brtvljenjem omogućava rad uređaja i na dubinama većim od 20 metara. Eventualna optimizacija cjelokupnog uređaja moguća je u pogledu smanjenja mase, prvenstveno nosivih dijelova kućišta čime bi se olakšala manipulacija prilikom transporta ili ispitivanja na suhom, jer olakšanje ne bi imalo velikog utjecaja na samu funkcionalnost uređaja.

## LITERATURA

- [1] Štorga, M.: Razvoj proizvoda, podloga uz predavanje, Zagreb, 2004.
- [2] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Tehnička knjiga Zagreb, 2009.
- [3] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 2009.
- [4] Herold, Z.: Računalna i inženjerska grafika, Zagreb, 2003.
- [5] Misumi, <http://www.misumi-europe.com/en/>
- [6] Ščap, D.: Podloge za transportne uređaje, Zagreb 2010.
- [7] THK: Ball Screw General Catalog,  
[http://www.thk.com/sites/default/files/documents/uk\\_pdf/product/general/a/ee\\_A15.pdf](http://www.thk.com/sites/default/files/documents/uk_pdf/product/general/a/ee_A15.pdf)
- [8] Pavkovic, N., Martinec, T., Štorga, M.: Traceability – a Factor of Integration and a Method to Deal with Complexity, 10th International Workshop on Integrated Design and Engineering, 2014.
- [9] Martinec, T., Pavkovic, N.: Visualization of Information Traceability in Product Development, International Design Conference, 2014.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija
- III. Funkcijska dekompozicija