

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Методе прорачуна у развоју производа

Број индекса: 306/2018

Милош Д. Раденковић

**Пројектовање и израда алата за експерименталну анализу
напонско-деформационог стања циклозупчаника**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Мирко Благојевић, ред. проф. - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да изврши прорачун и пројектовање неопходних елемената једног конкретног једностепеног циклоредуктора, а затим да уради идејно решење, пројектну документацију и физички модел алата за испитивање напонско-деформационог стања циклозупчаника пројектованог циклоредуктора.

Препоручена литература:

- [1] В. Н. Кудрявцев: Планетарные Передачи, Москва, 1966;
- [2] М. Lehmann: Berechnung und messung der krafte in einem zykloiden-kurvenscheiben - getriebe, Докторска дисертација, Технички унверзитет Минхен, München, 1976;
- [3] М. Благојевић: Кинематичка и динамичка анализа једностепеног циклоредуктора, Магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003;
- [4] М. Благојевић: Напонско и деформационо стање елемената циклоредуктора при динамичким оптерећењима, Докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008;
- [5] М. Матејић: Нови приступ пројектовању и оптимизацији циклоидних преносника снаге, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019;
- [6] И. Пантић: Динамичке симулације у процесу развоја производа, Мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2015;
- [7] М. Раденковић: Примена PLM софтвера у развоју производа, Завршни рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019;

Крагујевац, 27.02.2020.

Ментор:

др Мирко Благојевић, ред. проф.

Резиме

Циклоредуктори су савремени преносници снаге који имају веома добре радне карактеристике: дуг и поуздан радни век, веома компактну конструкцију, висок степен искоришћења, широк опсег преносних односа, велику динамичку издржљивост,.... Све ове особине сврставају их у сам врх савремене индустрије. Имају веома широко поље примене. Последњих година се највише користе у индустрији робота и баш из тог разлога су сва истраживања из ове области веома драгоцена. Главни елемент циклоредуктора је циклозупчаник који има веома сложен облик. Профил зупца циклозупчаника је еквидистанта скраћене епитрохоиде. Баш због свог сложеног облика, веома је тешко аналитичким путем одредити расподелу напона и деформација у телу циклозупчаника.

Тема овог мастер рада је пројектовање и израда алата за експерименталну анализу напонско – деформационог стања циклозупчаника у статичким и динамичким условима рада.

Кључне речи: циклоредуктор, циклозупчаник, SolidWorks, експериментална анализа

Abstract

Cycloreducers are modern gears that have very good working characteristics: long and reliable service life, very compact construction, high degree of utilization, wide range of gear ratios, great dynamic durability, All these features place them at the very top of modern industry. They have a very wide field of application. In recent years, they are mostly used in the robot industry, and for that reason, all research in this area is very valuable. The main element of the cyclo reducer is the cycloid gear, which has a very complex shape. The tooth profile of the cycloid gear is the equidistant of the truncated epitrochoid. Due to its complex shape, it is very difficult to determine the distribution of stresses and strains in the body of cyclo gears analytically.

The topic of this master thesis is the design and development of tools for experimental analysis of the stress - strain state of cyclo gears in static and dynamic operating conditions.

Key words: cycloidal speed reducer, load, cycloid disc, SolidWorks.

Садржај

Увод.....	2
2.0 ПРОРАЧУН И ПРОЈЕКТОВАЊЕ ВИТАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ЈЕДНОСТЕПЕНОГ ЦИКЛОРЕДУКТОРА	6
2.1 ПОЛАЗНИ ПОДАЦИ	6
2.2 ПРОРАЧУН ПАРАМЕТРА СНАГЕ И КРЕТАЊА НА ПОЈЕДИНИМ МЕСТИМА ЦИКЛОРЕДУКТОРА	6
2.3 ПРОРАЧУН ПРЕЧНИКА УЛАЗНОГ И ИЗЛАЗНОГ ВРАТИЛА ЦИКЛОРЕДУКТОРА	7
2.3.1 УЛАЗНО ВРАТИЛО ЦИКЛОРЕДУКТОРА	7
2.3.2 ИЗЛАЗНО ВРАТИЛО ЦИКЛОРЕДУКТОРА	8
2.4 ЈЕДНАЧИНА ПРОФИЛА ЗУПЦА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА	9
2.5 ПРОРАЧУН ДИМЕНЗИЈА ЕКСЦЕНТАР ЧАУРЕ	13
2.6 ОДРЕЂИВАЊЕ ШИРИНЕ ЦИКЛОЗУПЧАНИКА	14
2.7 ПРОРАЧУН ДИМЕНЗИЈА ОСОВИНИЦА И ВАЉКА ЦЕНТРАЛНОГ ЗУПЧАНИКА.....	16
2.8 ПРОРАЧУН ДИМЕНЗИЈА ИЗЛАЗНЕ ОСОВИНИЦЕ И ИЗЛАЗНОГ ВАЉКА.....	17
3.0 НОВИ ПРИСТУП ПРОЈЕКТОВАЊУ АЛАТА ЗА ИСПИТИВАЊЕ НАПОНСКО- ДЕФОРМАЦИОНОГ СТАЊА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА	20
3.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ АЛАТА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНУ АНАЛИЗУ НАПОНСКО- ДЕФОРМАЦИОНОГ СТАЊА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА	21
4.0 ИЗРАДА АЛАТА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНУ АНАЛИЗУ НАПОНСКО -ДЕФОРМАЦИОНОГ СТАЊА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА.....	33
4.1 ИЗРАДА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА	33
4.2 ИЗРАДА ВАЉАКА ЦЕНТРАЛНОГ ЗУПЧАНИКА И ИЗЛАЗНИХ ВАЉАКА	38
4.3 ИЗРАДА ЕКСЦЕНТАР ЧАУРЕ	43
4.4 ИЗРАДА БРОНЗАНЕ ЧАУРЕ	45
4.5 ИЗРАДА ВРАТИЛА	46
4.6 ИЗРАДА ПОДЛОШКИ	48
4.7 ИЗРАДА БОЧНИХ ПЛОЧА АЛАТА.....	49
4.8 ИЗРАДА ДОЊЕ ПЛОЧЕ АЛАТА	51
4.9 ИЗРАДА ПРИТИСКИВАЧА	52

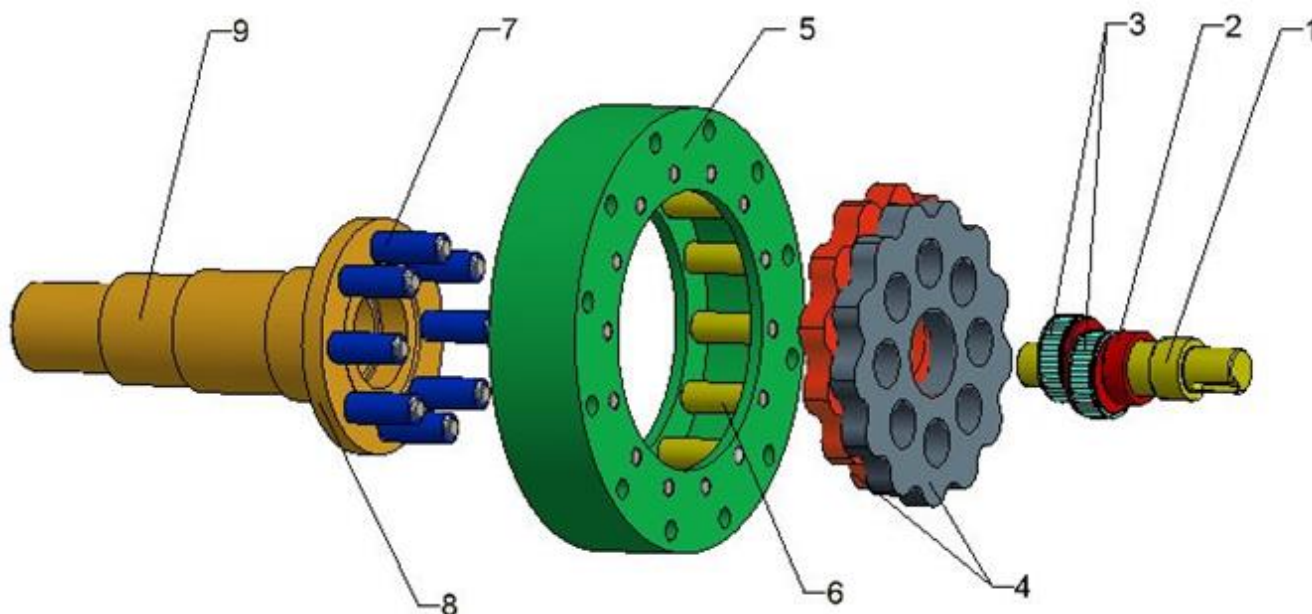
5.0 МОНТАЖА АЛАТА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНУ АНАЛИЗУ НАПОНСКО – ДЕФОРМАЦИОНОГ СТАЊА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА	53
6.0 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	60
Литература.....	61

Увод

Циклоредуктори спадају у групу планетарних преносника снаге и као такви представљају једно од бољих иновативних решења у овој области. Најстарији подаци о овим редукторима датирају из тридесетих година прошлог века, а неке од тада направљених концепција циклоредуктора су још увек у примени, што јасно говори о њиховој дуговечности и квалитету, [1]. Проналазач ове врсте редуктора био је немачки инжењер *Lorenz Braren* (1931. године), који је радио као конструктор у немачкој компанији *Dekkel* у Минхену која се бавила производњом фотоапарата, објектива и делова за фотоапарате. Специфичан механизам затварача фотоапарата инспирисао је *Lorenz Braren*-а и навео га да почне да развија идеју о сасвим новом типу планетарног преносника, што је као резултат дало појаву првог циклоредуктора. Како би се потпуно посветио развоју и усавршавању своје идеје о новом типу планетарног преносника, *Lorenz Braren* је напустио компанију *Dekkel* у којој је радио и убрзо основао своју компанију 1931. године у Минхену. *Lorenz Braren* је модел циклоредуктора изложио на сајму у Лајпцигу, што је изазвало огромно интересовање великог броја посетилаца, међу којима је била и делегација јапанске корпорације *Sumitomo Machinery Co*, данас *Sumitomo Heavy Industries Ltd*. Након првих преговора између *Lorenz Braren*-а и велике јапанске корпорације, закључен је споразум у Јапану 1937. године. Овим уговором јапанска компанија је откупила лиценцу и почела серијску производњу циклоредуктора, [1,2]. Такође је ово један од најстаријих примера јапанско-немачке индустријске сарадње. За време Другог светског рата односи између ове две уговорне стране били су прекинути због ратних околности и дешавања у свету, што је пореметило чак и многе дугорочне сарадње између различитих земаља света. Производни погон у Минхену уништен је 1944. године, али захваљујући исплати заосталих финансијских обавеза од стране јапанске корпорације *Sumitomo*, немачка компанија је успела да поврати своје производне погоне и убрзо се врати на светско тржиште 1948. године. Идејни творац и зачетник нове ере планетарних преносника *Lorenz Braren* умро је 1953. године. Компанију је преузео његов син *Rudolf Braren*. У периоду када је он преузео власништво компаније, фирма је значајно модернизована, купљене су машине најновије генерације, уведен је систем за електронску обраду података, производни процес је унапређен, итд. Унук *Lorenz Braren*-а, *Christijan Keller*, 1976. године преузима компанију и наставља са даљим развојем процеса конструисања и израде циклоредуктора. Циклоредуктори се у основи разликују од осталих типова преносника по изгледу унутрашњих елемената редуктора, као и по принципу рада. Код циклоредуктора се примењује циклоидно озубљење, а као профил зупца циклозупчаника се користи еквицикланта скраћене епитрохоиде, [1,2,3,4,5,6,7]. Обзиром на предности које поседују (широк опсег могућих преносних односа, висок степен искоришћења, компактност конструкције и сл.), циклоредуктори данас имају веома широку област примене. Циклоредуктори су први пут споменути у литератури *В. Н. Кудрявцев-а* у књизи *Планетарные Передачи* у издању из 1966. године, [1]. У овој књизи описан је начин генерисања профила циклозупчаника који прате одговарајуће математичке једначине. Такође, у овој литератури извршена је анализа свих сила које делују на главни елемент циклоредуктора, циклозупчаник. Ова књига је представљала, а представља и данас полазну литературу за све научне радове из области циклоредуктора. Аналитички поступак за одређивање оптерећења која делују на

циклозупчаник развијао је у својој докторској дисертацији *Manfred Lehmann*, у којој се држао свих полазних претпоставки, али је у обзир узео и зазор који се јавља на местима између елемената циклоредуктора, [2]. Захваљујући контакту конкавне и конвексне површине, циклоредуктори могу да пренесу велика радна оптерећења чак и у тешким радним условима. Како су циклоредуктори веома заступљени у савременој машиноградњи, многи истраживачи у свету су одлучили да изучавају баш ову врсту преносника. Циклоредуктор посматран са технолошке стране представља веома сложену конструкцију због посебне геометрије, па се због тога овај тип преносника снаге производи у веома малом броју земаља у свету. Највећа компанија која се бави израдом циклоредуктора је јапанска компанија *Сумитомо (Sumitomo)* која је усавршила производњу оваквих преносника снаге и уврстила их у све чешће примењиване преноснике снаге. Циклоредуктори су по својим радним карактеристикама јединствени преносници снаге и кретања. У поређењу са класичним зупчастим редукторима, циклоредуктори су отпорнији, стабилнији при раду и што је најважније, могу апсорбовати велика, чак и екстремна ударна оптерећења. Циклоредукторе карактерише поузданост и дуг радни век, чак и у тешким условима рада. Циклоредуктори имају изузетно велике преносне односе. Могу бити једностепени и вишестепени. Једностепени циклоредуктори иако имају веома мале габаритне димензије, могу имати преносни однос чак и до 1:119, док вишестепени циклоредуктори могу да остваре милионске преносне односе. Принцип рада циклоредуктора се заснива на томе да улазно вратило са ексцентар чауром изазива ексцентрично кретање циклозупчаника. Циклозупчаник се спреже са ваљцима непокретног централног зупчаника. Кретање се даље, преко контакта површина отвора у циклозупчанику и излазних ваљака, преноси на излазно вратило. У овом процесу се врши редуковање броја обртаја и промена смера обртања излазног у односу на улазно вратило. Степен искоришћења једностепеног циклоредуктора може достићи вредност и до 93%, док је степен искоришћења двостепеног циклоредуктора око 86%, [3]. Повећавањем броја циклозупчаника повећава се носивост циклоредуктора, али се повећава и број површина у контакту што доводи до смањења степена искоришћења због трења у тим контактима. Принцип рада циклоредуктора се заснива на ексцентричној ротацији циклозупчаника коју изазива ексцентар чаура на коју је циклозупчаник ослоњен. Током рада циклоредуктора јављају се вибрације које доводе до повећаног хабања профила циклозупчаника и већег оптерећења лежаја. Самим тим смањује се радни век појединих елемената циклоредуктора. Овакав тип планетарног преносника је веома погодан за рад са честим покретањем и заустављањем, отпоран је на промену смера обртања јер је $2/3$ ваљака централног циклозупчаника у константној спрези са зупцима циклозупчаника. Поред свих ових карактеристика, веома је важно то да је циклоредуктор отпоран на краткотрајна преоптерећења чак и до 500% без последица на елементе у спрези. Сви елементи циклоредуктора се израђују од квалитетних материјала, током чије израде се врши строга контрола геометрије и квалитета као и саосности контактних површина. Радни век циклоредуктора може бити и преко 20 година, уз правилно спровођење процедура одржавања према препорукама произвођача. Радни век може да се разликује код концепција које остварују кретање трењем клизања и трењем котрљања. У циклоредуктору не постоје аксијалне силе, док су улазно и излазно вратило коаксијални у свим варијантама циклоредуктора. Због свих ових предности и иновативних могућности, а највише због малих габаритних димензија, циклоредуктори су нашли широку примену код машина које изискују висок степен оптимизације простора. Због карактеристичног

налегања површина које се спрежу, веома је значајан утицај трења. Због тога се код циклоредуктора препоручује подмазивање адекватним мазивима, уљем или мастима, у зависности од радних услова. Препорука већине произвођача је да количина уља буде у висини теменог пречника централног зтупчаника, како би се током рада циклоредуктора услед кретања циклозупчаника мазиво пренело равномерно на све елементе који су у контакту, и тако обезбедило константно и квалитетно подмазивање. Већа количина уља би могла да нашкоди равномерном раду циклоредуктора због стварања притиска унутар кућишта током кретања циклозупчаника. Кућиште редуктора је херметички затворен склоп. Са доње стране кућишта постоји отвор са чепом који служи за испуштање уља из кућишта, док са горње стране постоји одушак. Циклоредуктори имају дуг радни век, иако трпе често велика оптерећења. Велики преносни однос даје им предност у односу на већину других преносника. Највећем оптерећењу су изложене осовинице централног зупчаника и излазне осовинице које носе ваљке. На њих деују савојна и смичућа оптерећења великих интензитета. Да би један циклоредуктор радио са минималним губицима потребно је направити све елементе са високом прецизношћу. Основни елементи циклоредуктора приказани су и нумерисани на слици 1, [3].



Слика 1.1 Елементи циклоредуктора, [3]

- (1) – улазно вратило, (2) – ексцентар чаура, (3) – игличаста лежаји циклозупчаника, (4) – циклозупчаници, (5) – непокретни централни зупчаник, (6) – ваљци централног зупчаника, (7) – излазни ваљци, (8) – излазни диск, (9) – излазно вратило

Развијена је и посебна група циклоредуктора који имају три циклозупчаника међусобно заокренута за угао од по 120 степени (*fine cyclo*). Ови циклоредуктори захтевају високу прецизност при изради јер је код њих бочни зазор између елемената који су у међусобном контакту занемарљив и готово да не постоји. Вишестепени циклоредуктори се добијају линијском синтезом једноступених циклоредуктора, тако да се код једноступених и

тростепених циклоредуктора улазно и излазно вратило обрћу у супротним смеровима, док код двостепених циклоредуктора оба вратила имају исти смер обртања. Обзиром на то да имају бројне предности (мале вибрације, низак ниво буке, мала маса, добра динамичка уравнотеженост, висока поузданост), циклоредуктори имају веома широку област примене. Често се дешава да овакав тип механичког преносника нема алтернативу, из разлога што цена њихове израде није више толико висока, и тежи да буде компетентна ценама конвенционалних редуктора.

2.0 ПРОРАЧУН И ПРОЈЕКТОВАЊЕ ВИТАЛНИХ ЕЛЕМЕНАТА ЈЕДНОСТЕПЕНОГ ЦИКЛОРЕДУКТОРА

У оквиру овог поглавља извршен је прорачун и пројектовање виталних елемената једног конкретног једноступеног циклоредуктора. За циклозупчанике пројектованог циклоредуктора биће конструисан алат за испитивање њиховог напонско-деформационог стања. Полазни подаци су изабрани тако да димензије пројектованог циклоредуктора омогуће прецизну и квалитетну експерименталну анализу на постојећој лабораторијској опреми.

2.1 ПОЛАЗНИ ПОДАЦИ

- *Снага електромотора*
 $P_{EM} = 5.5 \text{ kW}$
- *Број обртаја електромотора*
 $n_{EM} = 1750 \text{ min}^{-1}$
- *Преносни однос циклоредуктора*
 $u_{CR} = 11$
- *Степен искоришћења циклоредуктора*
 $\eta_{CR} = 0.94$
- *Степен искоришћења улазне и излазне спојнице*
 $\eta_S = 1$
- *Полупречник подеоног круга централног зупчаника r*
 $r = 100 \text{ mm}$ (усвојено на основу габаритних ограничења)

2.2 ПРОРАЧУН ПАРАМЕТАРА СНАГЕ И КРЕТАЊА НА ПОЈЕДИНИМ МЕСТИМА ЦИКЛОРЕДУКТОРА

- *Снага на улазном вратилу циклоредуктора*
 $P_{ul} = P_{EM} \cdot \eta_S = 5.5 \text{ kW}$
- *Угаона брзина електромотора*
 $\omega_{EM} = \frac{\pi \cdot n_{EM}}{30} = 183.2 \text{ s}^{-1}$
- *Обртни момент електромотора*

$$T_{EM} = \frac{P_{EM}}{\omega_{EM}} = 30.02 \text{ Nm} = T_{ul}$$

- Број обртаја излазног вратила циклоредуктора

$$n_{iz} = \frac{n_{EM}}{u_{CR}} = 159.1 \text{ min}^{-1}$$

- Угаона брзина излазног вратила циклоредуктора

$$\omega_{iz} = \frac{\pi \cdot n_{iz}}{30} = 16.65 \text{ s}^{-1}$$

- Снага на излазном вратилу циклоредуктора

$$P_{iz} = P_{ul} \cdot \eta_{CR} = 5.17 \text{ kW}$$

- Обртни момент на излазном вратилу циклоредуктора

$$T_{iz} = T_{ul} \cdot \eta_{CR} \cdot u_{CR} = 310.4 \text{ Nm}$$

- Излазни обртни момент на једном од циклозупчаника

$$T_3 = 0.55 \cdot T_{iz} = 170.7 \text{ Nm}$$

2.3 ПРОРАЧУН ПРЕЧНИКА УЛАЗНОГ И ИЗЛАЗНОГ ВРАТИЛА ЦИКЛОРЕДУКТОРА

2.3.1 УЛАЗНО ВРАТИЛО ЦИКЛОРЕДУКТОРА

- Материјал улазног вратила

Усвојен је Č1430 са следећим карактеристикама:

- Затезна чврстоћа $R_m = 640 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
- Граница течења $R_e = 330 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
- Трајна динамичка чврстоћа при наизменично променљивом оптерећењу на увијање:

$$\tau_{Du(0)} = 255 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Фактор K

$$K = 2.4$$

- Степен сигурности S

$$S = 2.5$$

- Дозвољени напон на увијање

$$\tau_{doz} = \frac{\tau_{Du(0)}}{K \cdot S} = 42.5 \frac{N}{mm^2}$$

- Прорачунски пречник улазног вратила циклоредуктора

$$d_{ul1} = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot T_{EM}}{\tau_{doz}}} = 15.2 \text{ mm}$$

- Клин улазног вратила

$$b = 5 \text{ mm}, h = 5 \text{ mm}, t = 2.9 \text{ mm}$$

- Пречник улазног вратила циклоредуктора

$$d_{ul} = d_{ul1} + t = 18.1 \text{ mm}$$

- Стандардни пречник улазног вратила циклоредуктора

$$d_{ulst} = 20 \text{ mm}$$

2.3.2 ИЗЛАЗНО ВРАТИЛО ЦИКЛОРЕДУКТОРА

- Материјал излазног вратила

- Као и за улазно вратило, усвојен је $\check{S}1430$. Његове карактеристике дате су у претходном поглављу.

- Фактор K

$$K = 2.4$$

- Степен сигурности S

$$S = 2.5$$

- Дозвољени напон на увијање

$$\tau_{doz} = \frac{\tau_{Du(0)}}{K \cdot S} = 42.5 \frac{N}{mm^2}$$

- Прорачунски пречник излазног вратила циклоредуктора

$$d_{izl} = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot T_{EM}}{\tau_{doz}}} = 33.2 \text{ mm}$$

- Клин излазног вратила

$$b = 10 \text{ mm}, h = 8 \text{ mm}, t = 4.7 \text{ mm}$$

- Пречник излазног вратила циклоредуктора

$$d_{iz} = d_{izl1} + t = 37.2 \text{ mm}$$

- Стандардни пречник излазног вратила циклоредуктора
 $d_{izst} = 40 \text{ mm}$

2.4 ЈЕДНАЧИНА ПРОФИЛА ЗУПЦА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА

- коефицијент кориговања профила зупца циклозупчаника ξ
- Усваја се : $\xi = 0.4$

- Полупречник покретне кружнице r_2
 $r_2 = r \cdot (1 - \xi) = 60 \text{ mm}$
 $r_2 = 60 \text{ mm}$

- Стварна вредност коефицијента кориговања ξ
 $\xi = 1 - \frac{r_2}{r} = 0.4$

- Број зубаца циклозупчаника z_1
 $z_1 = |u_{CR}| = 11$

- Број зубаца (ваљака) централног зупчаника z_2
 $z_2 = z_1 + 1 = 12$

- Величина ексцентрицитета e
 $e = \frac{r_2}{z_2} = 5 \text{ mm}$

- Полупречник непокретне кружнице r_1
 $r_1 = r_2 \cdot \frac{z_1}{z_2} = 55 \text{ mm}$

- Полупречник ваљака централног зупчаника q
 $q = 0.08 \cdot r = 8 \text{ mm}$
усваја се $q = 8 \text{ mm}$

- Пречник теменог круга циклозупчаника d_a
 $d_a = 2 \cdot r + 2 \cdot e - 2 \cdot q = 194 \text{ mm}$

- Пречник подножног круга циклозупчаника d_f
 $d_f = 2 \cdot r - 2 \cdot e - 2 \cdot q = 174 \text{ mm}$

- Полупречник котрљајуће кружнице R_a

$$R_a = \frac{r}{1 + u_{CR}} = 8.33 \text{ mm}$$

- Полупречник основне кружнице R_b

$$R_b = r - R_a = 91.67 \text{ mm}$$

- Помоћни угао ϕ

$$\phi = \arctg\left(\frac{\sin\beta}{\frac{R_a}{e} + \cos\beta}\right) = \arctg\left(\frac{\sin\beta}{\frac{8.33}{5} + \cos\beta}\right)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{\sin\beta}{1.666 + \cos\beta}\right)$$

- Угао међусобног положаја почетне и тренутне тачке додира основне и котрљајуће кружнице у односу на центар основне кружнице α

$$\alpha = \frac{R_a}{R_b} \cdot \beta = \frac{\beta}{11}$$

- Једначине скраћене епитрохоиде :

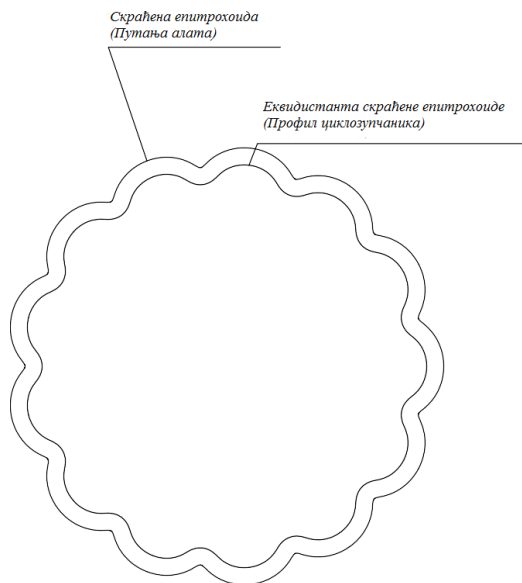
$$x = 100 \cdot \cos\left(\frac{\beta}{11}\right) + 5 \cdot \cos\left(\frac{12 \cdot \beta}{11}\right)$$

$$y = 100 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{11}\right) + 5 \cdot \sin\left(\frac{12 \cdot \beta}{11}\right)$$

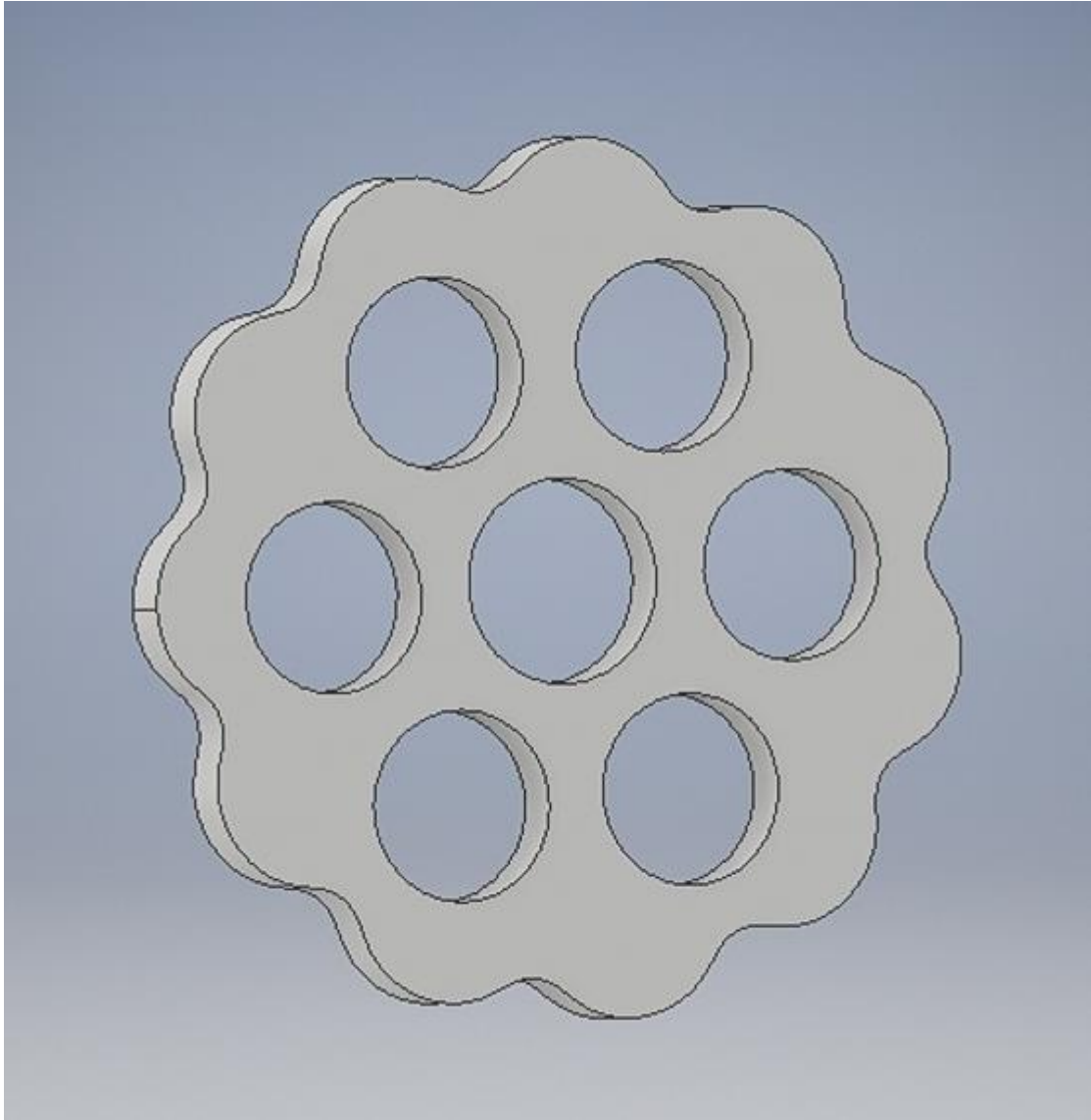
- Једначине екидистанте скраћене епитрохоиде :

$$x = 100 \cdot \cos\left(\frac{\beta}{11}\right) + 5 \cdot \cos\left(\frac{12 \cdot \beta}{11}\right) - 8 \cdot \cos\left(\frac{\beta}{11} + \arctg\left(\frac{\sin\beta}{1.666 + \cos\beta}\right)\right)$$

$$y = 100 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{11}\right) + 5 \cdot \sin\left(\frac{12 \cdot \beta}{11}\right) - 8 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{11} + \arctg\left(\frac{\sin\beta}{1.666 + \cos\beta}\right)\right)$$



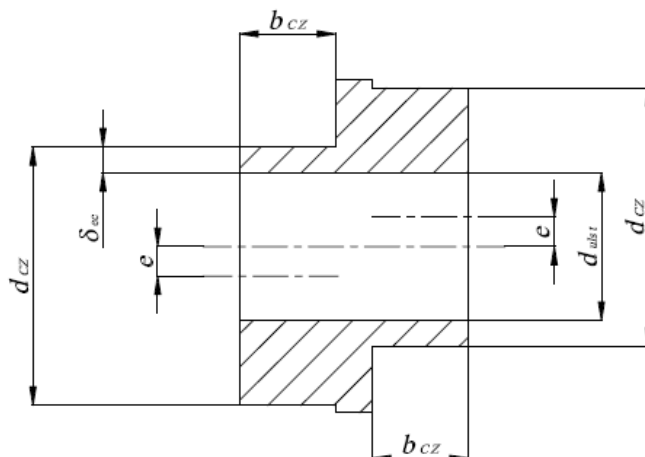
Слика 2.4.1 Профил циклозупчаника



Слика 2.4.2 3D модел циклозупчаника

2.5 ПРОРАЧУН ДИМЕНЗИЈА ЕКСЦЕНТАР ЧАУРЕ

Прорачун димензија ексцентар чауре и лежаја циклозупчаника потребан је због дефинисања појединих геометријских параметара неопходних за даљи ток прорачуна.



Слика 2.5.1 Скица ексцентар чауре

- минимална дебљина зида ексцентар чауре δ_{ec}
- На основу препоруке из литературе [1]: $\delta_{ec} = 5 \text{ mm}$

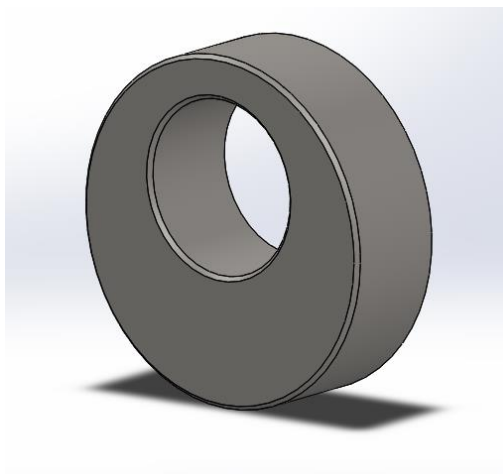
- Унутрашњи пречник лежаја циклозупчаника d_z
 $d_{cz} = d_{ulst} + 2 \cdot e + 2 \cdot \delta_{ec} = 40 \text{ mm}$

За лежај циклозупчаника усвојен је игличасти лежај ознаке K40x45x13, C = 16. 8 kN

- Спољашњи пречник игличастог лежаја $D_{cz} = 45 \text{ mm}$
- Ширина игличастог лежаја $B_{il} = 13 \text{ mm}$

- Полупречник подеоног круга излазног механизма R_{oiz}

$$R_{oiz} = \frac{D_{cz}}{2} + \frac{D_f - D_{cz}}{4} = 54.75 \text{ mm}$$



Слика 2.5.2 3D модел ексцентар чауре

2.6 ОДРЕЂИВАЊЕ ШИРИНЕ ЦИКЛОЗУПЧАНИКА

Полази се од *Hertz* – овог израза за контактни напон

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F_{Nmax}}{b \cdot \rho_{ek}} \cdot \frac{1}{\pi \cdot \left(\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \right)}} \leq \sigma_{Hd}$$

σ_{Hd} – дозвољени контактни напон на зупцу циклозупчаника

$$\sigma_{Hd} = \frac{\sigma_{Hlim}}{S_H} = 1130.8 \frac{N}{mm^2}$$

σ_{Hlim} - динамичка издржљивост бока зупца циклозупчаника

За материјал циклозупчаника, као и за ваљке централног зупчаника, излазне ваљке и одговарајуће осовинице усвојен је материјал Č4320, цементиран и каљен.

$$\sigma_{Hlim} = 1470 \frac{N}{mm^2}$$

S_H - степен игурности

Усвојено $S_H = 1.3$

μ_1, μ_2 - *Poisson* – ови бројеви

Усвојено: $\mu_1 = \mu_2 = \mu = 0.3$

E_1, E_2 – модули еластичности материјала

$$E_1 = E_2 = E = 2.1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

F_{Nmax} - максимална вредност силе спрезања

На основу препорука из литературе: $F_{Nmax} = \frac{4 \cdot T_3}{r_1 \cdot z_2} = 1034.5 \text{ N}$

ρ_{ek} - еквивалентни радијус кривине у тачки додира

Максимална сила спрезања F_{Nmax} јавља се при погонском углу $\beta = 130^\circ$, [1].

$$\rho_{ek} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} = 7.64 \text{ mm}$$

где је:

ρ_1 - радијус кривине ваљка централног зупчаника

ρ_2 - радијус кривине циклозупчаника

$$\rho_1 = q = 8 \text{ mm}$$

$$\rho_2 = \rho_0 - q = 171.27 \text{ mm}$$

ρ_0 - радијус кривине центра ваљка централног зупчаника

$$\rho_0 = \frac{r \cdot \left[1 + (1 - \xi)^2 - 2 \cdot (1 - \xi) \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \beta_1}{z_2}\right) \right]^{3/2}}{(z_2 + 1) \cdot (1 - \xi) \cdot \cos\left(\frac{z_1 \cdot \beta_1}{z_2}\right) - z_2 \cdot (1 - \xi)^2 - 1} = 179.27 \text{ mm}$$

$$\beta_1 = 180^\circ - \beta = 50^\circ$$

Потребна ширина циклозупчаника:

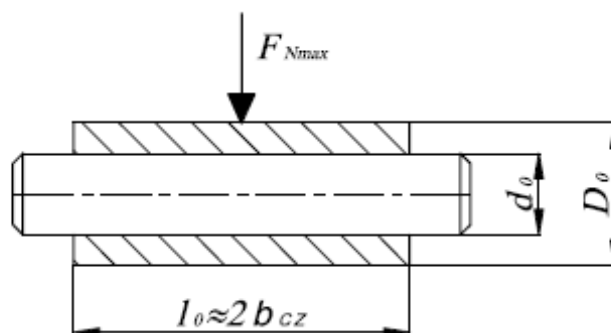
$$b_{CZ} = \frac{F_{Nmax} \cdot E}{5.72 \cdot \rho_{ek} \cdot \sigma_{Hd}^2} = 3.888 \text{ mm}$$

Из конструктивних разлога, обзиром да је ширина игличастог лежаја $B_{il} = 13 \text{ mm}$, усвојено је да је ширина циклозупчаника $b_{CZ} = 13 \text{ mm}$.

2.7 ПРОРАЧУН ДИМЕНЗИЈА ОСОВИНИЦА И ВАЉКА ЦЕНТРАЛНОГ ЗУПЧАНИКА

Пречник ваљка централног зупчаника израчунава се на основу израза:

$$D_0 = 2 \cdot q = 16 \text{ mm}$$



Слика 2.7.1 Скица ваљка и осовинице централног зупчаника

За пречник осовинице централног зупчаника, усваја се: $d_0 = 9 \text{ mm}$

- Материјал осовинице и ваљка централног зупчаника

Усваја се Č4320 чија је граница течења $R_e = 450 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

- Површински притисак на додирним површинама осовинице и ваљка

$$p = \frac{F_{Nmax}}{d_0 \cdot b_{cz}} = 8.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Критична вредност површинског притиска

$$p_t = 1.2 \cdot R_e = 540 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Степен сигурности при површинском притиску

$$S_t = \frac{p_t}{p} = 61.4 > S_{tmin} = 2$$

- Степен сигурности против разарања при смицању

$$S_\tau = \frac{[\tau]}{\tau} = 44.8 > S_{\tau min} = 1.5$$

- Критични напон при смицању

$$[\tau] = 0.8 \cdot R_e = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Напон на смицање

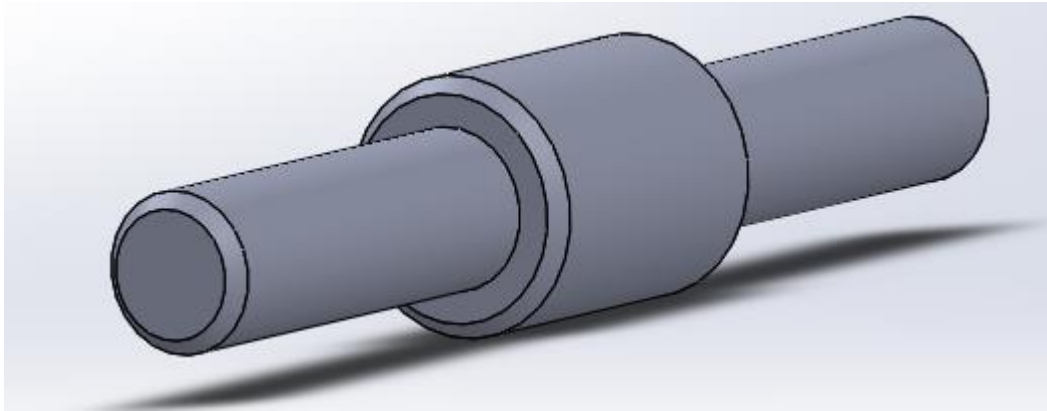
$$\tau = \frac{F_{Nmax}}{i \cdot A_0} = 8.13 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

i - број пресека изложених смицању

$$i = 2$$

A_0 - смичућа површина

$$A_0 = \frac{d_0^2 \cdot \pi}{4} = 63.6 \text{ mm}^2$$



Слика 2.7.2 3D модел осовинице и ваљка централног зупчаника

2.8 ПРОРАЧУН ДИМЕНЗИЈА ИЗЛАЗНЕ ОСОВИНИЦЕ И ИЗЛАЗНОГ ВАЉКА

- Пречник излазне осовинице израчунава се на основу израза:

$$d_{vk} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot F_{Kmax}}{\tau_{doz} \cdot \pi}} = 5.5 \text{ mm}$$

Усваја се : $d_{vk} = 15 \text{ mm}$

$$F_{Kmax} = 1.35 \cdot \frac{4 \cdot T_3}{R_{oiz} \cdot u} = 2806.03 \text{ N}$$

u - број излазних ваљака

Усваја се : $u = 6$

- Материјал излазне осовинице и излазног ваљка

Усваја се Č4320 чија је граница течења : $R_e = 450 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

- Дозвољени напон на смицање τ_{doz}

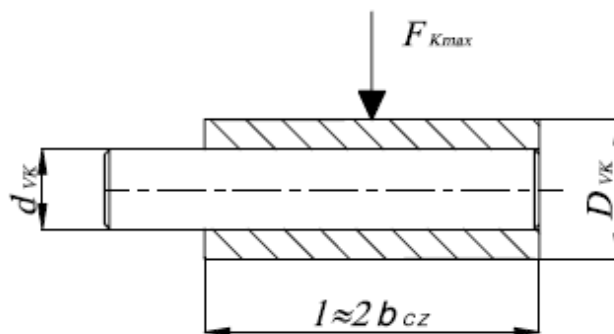
$$\tau_{doz} = \frac{[\tau]}{S_\tau} = 120 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Критични напон при смицању

$$[\tau] = 0.8 \cdot R_e = 360 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Степен сигурности против разарања при смицању

Усваја се $S_\tau = 3$



Слика 2.8.1 Скица излазне осовинице и излазног ваљка

- Пречник излазног ваљка

Усваја се : $D_{vk} = d_{vk} + 2 \cdot 4.5 = 24 \text{ mm}$

- Пречник отвора у циклозупчанику

$$D_{ocZ} = D_{vk} + 2 \cdot e = 34 \text{ mm}$$

- Степен сигурности при површинском притиску

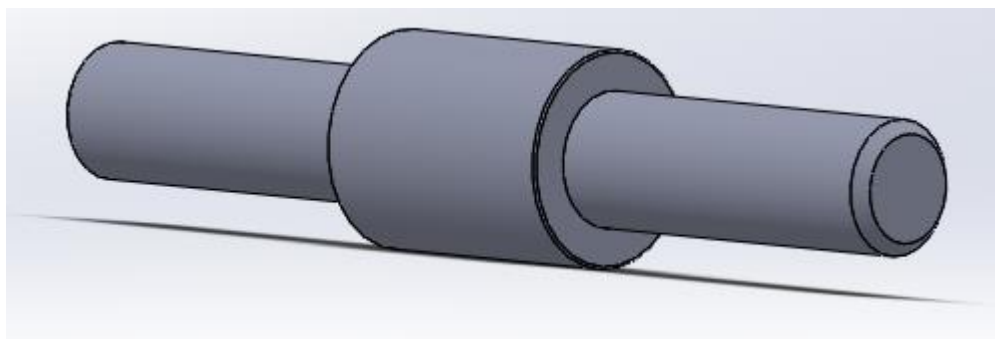
$$S_t = \frac{p_t}{p} = 37.53 > S_{tmin} = 2$$

- Критична вредност површинског притиска

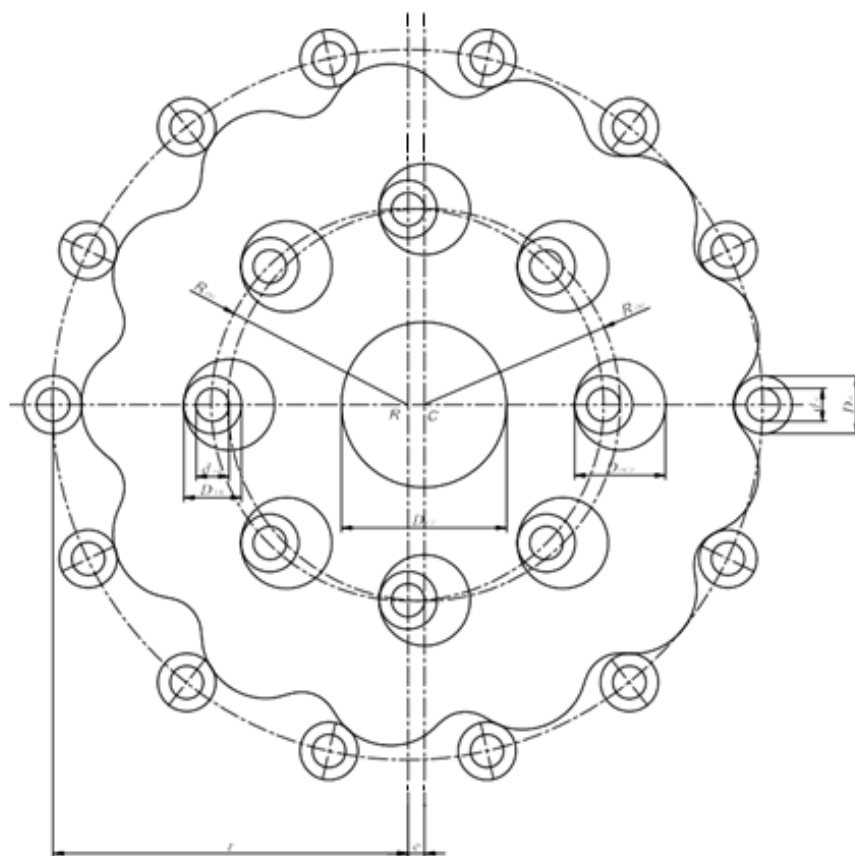
$$P_t = 1.2 \cdot R_e = 540 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- Површински притисак на додирним површинама осовинице и ваљка

$$p = \frac{F_{kmax}}{d_{vk} \cdot b_{cz}} = 14.39 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$



Слика 2.8.1 3D модел излазне осовинице и излазног ваљка



Слика 2.8.2 Скица циклозупчаника и прорачунатих елемената циклоредуктора

3.0 НОВИ ПРИСТУП ПРОЈЕКТОВАЊУ АЛАТА ЗА ИСПИТИВАЊЕ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНОГ СТАЊА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА

Витални елемент циклоредуктора је свакако циклозупчаник. Због свог изузетно сложеног облика (профил зупца циклозупчаника је еквилибрисант скраћене епитрохоиде), као и због сложеног оптерећења које на њега делује, веома је важно одредити што тачнију расподелу напона, деформација и померања на циклозупчанику како би се обезбедио дуг и поуздан радни век циклоредуктора.

Због изузетне сложености овог поступка, није се пуно истраживача у свету бавило овим истраживањима. М. Благојевић је истраживао ову проблематику у својој докторској дисертацији, [4]. Његов алат за одређивање напонско-деформационог стања циклозупчаника је приказан на слици 3.1.



Слика 3.1 Алат за одређивање напонско-деформационог стања циклозупчаника, [4]

Код приказаног алата спољашње оптерећење је нормална сила у контакту зупца циклозупчаника и одговарајућег ваљка централног зупчаника. Претпостављено је да су у контакту два излазна ваљка са отворима у телу циклозупчаника и да они преносе излазно оптерећење. Тачан положај циклозупчаника је додатно одређен и ексцентар чауром.

Иако овај алат представља једно веома иновативно решење и потпуно нови приступ експерименталној анализи напона и деформација циклозупчанка, његов основни недостатак је тај што се њиме може анализирати само једнострука спрега (случај када су у контакту само један зубац циклозупчаника и одговарајући ваљак централног зупчаника). Као што је познато, основна предност циклоредуктора је да је у непосредном контакту увек $2/3$ ваљака централног зупчаника са зупцима циклозупчаника. Ова чињеница и обезбеђује већу носивост циклоредуктора у односу на остале преноснике снаге, као и могућност краткотрајног преоптерећења и до 500%.

У оквиру овог мастер рада развијен је и направљен алат помоћу кога се може анализирати напонско - деформационо стање циклозупчаника при једнострукој, двострукој и трострукој спреси. Такође, могуће је мењати и број излазних ваљака који преноси излазни обртни момент.

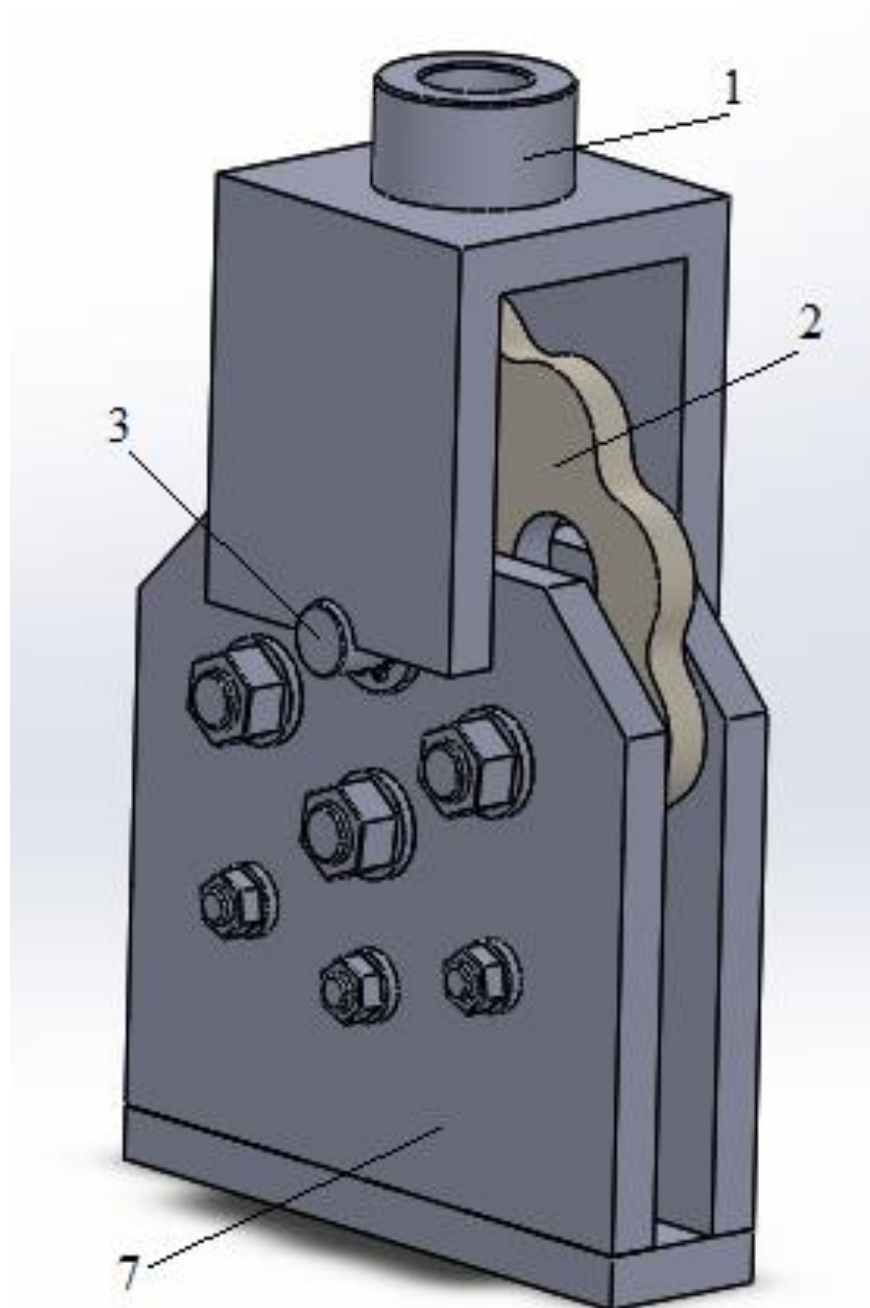
На основу развијеног алата ће моћи доста прецизно и поуздано да се одреди расподела напона и деформација у телу циклозупчаника при различитим спољашњим оптерећењима. Алат ће такође омогућити анализу напона и деформација и у статичким и у динамичким условима рада.

3.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ АЛАТА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНУ АНАЛИЗУ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНОГ СТАЊА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА

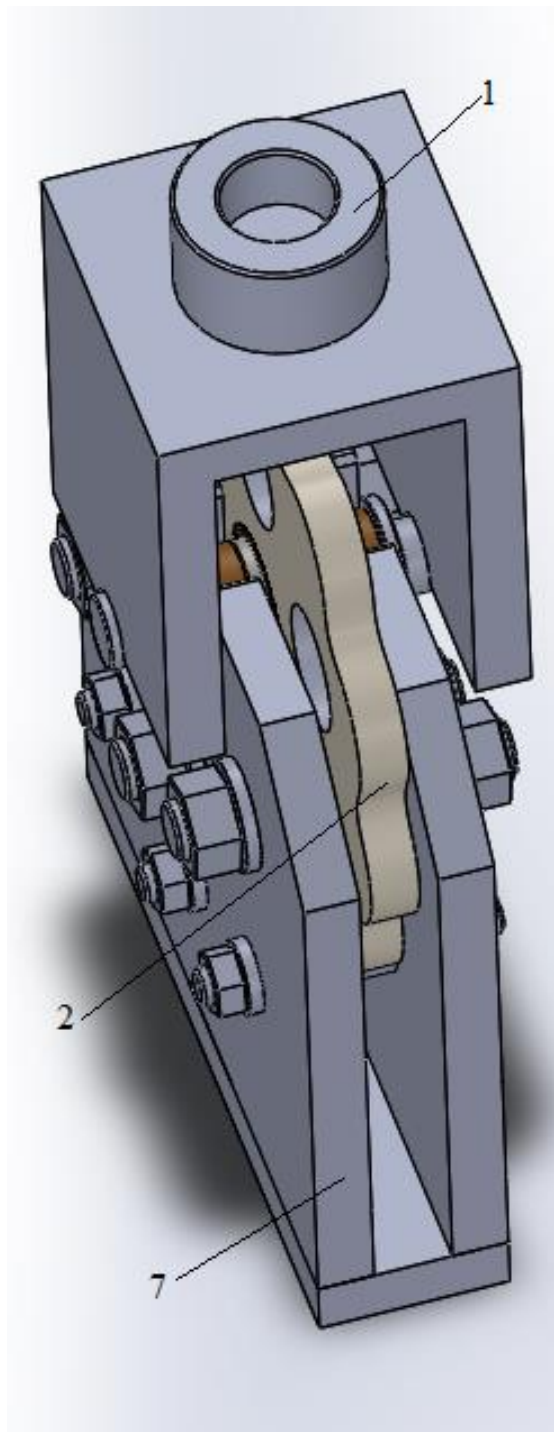
За циклозупчаник пројектованог циклоредуктора у оквиру овог поглавља развијен је алат за анализу његовог напонско-деформационог стања при различитим условима спољашњег оптерећења. Када је у питању контакт зубаца циклозупчаника и ваљака централног зупчаника, предвиђена је могућност анализе једноструке, двоструке и троструке спреге, а када је у питању контакт отвора у телу циклозупчаника са излазним ваљцима такође су предвиђена ова три случаја. Захваљујући овој чињеници и модуларном приступу пројектовања, алат ће омогућити креирање веома комплексне и реалне слике када је у питању напонско – деформационо стање циклозупчаника.

Алат је креиран у софтверу *SolidWorks*.

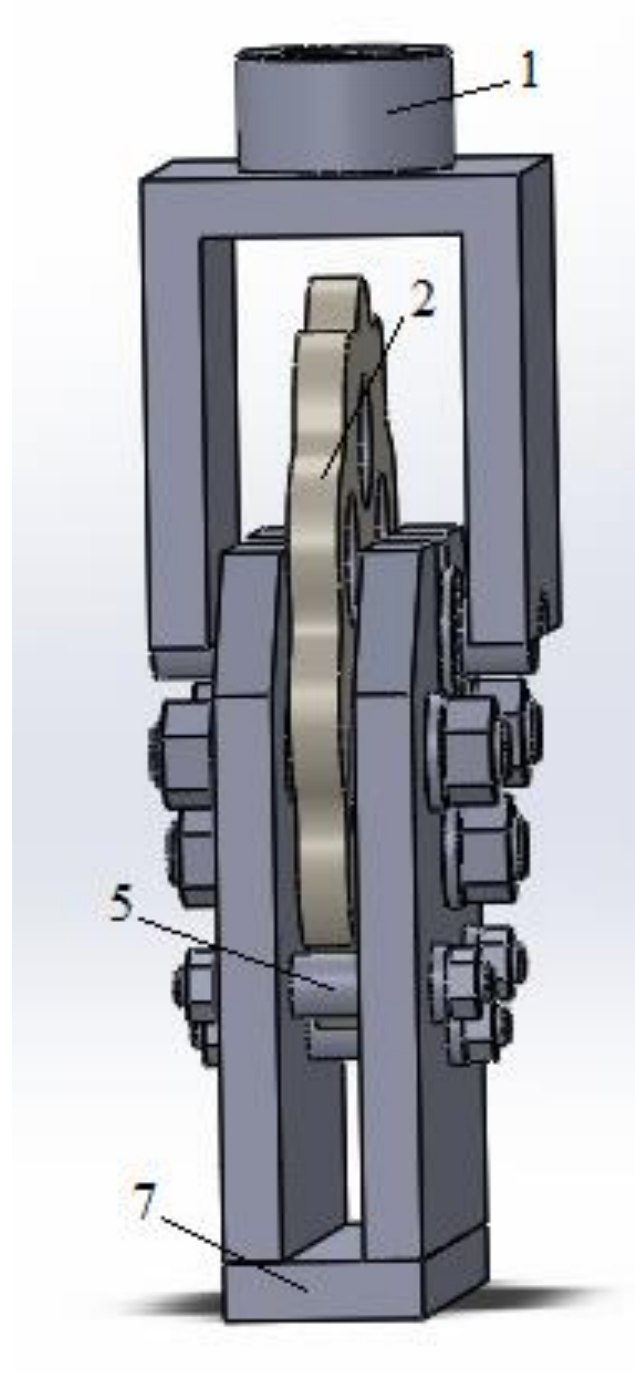
На сликама 3.2, 3.3, 3.4 и 3.5 приказан је 3D модел развијеног алата за анализу напонско-деформационог стања циклозупчаника.



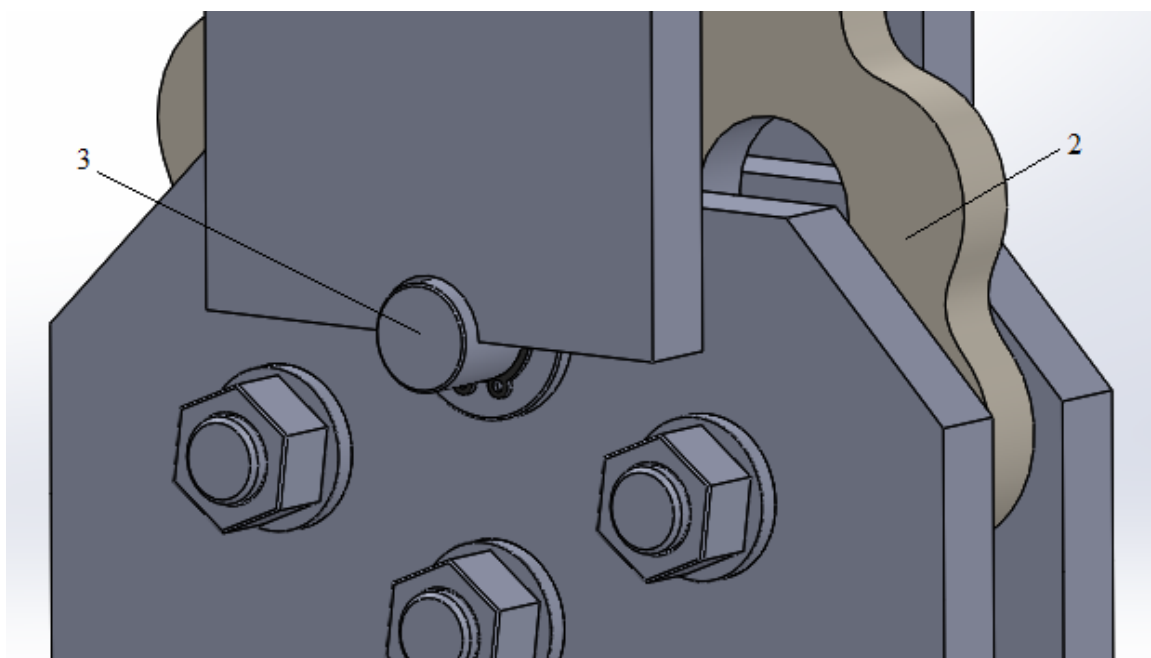
Слика 3.2 3D модел алата за анализу напонско-деформационог стања циклозупчаника -1



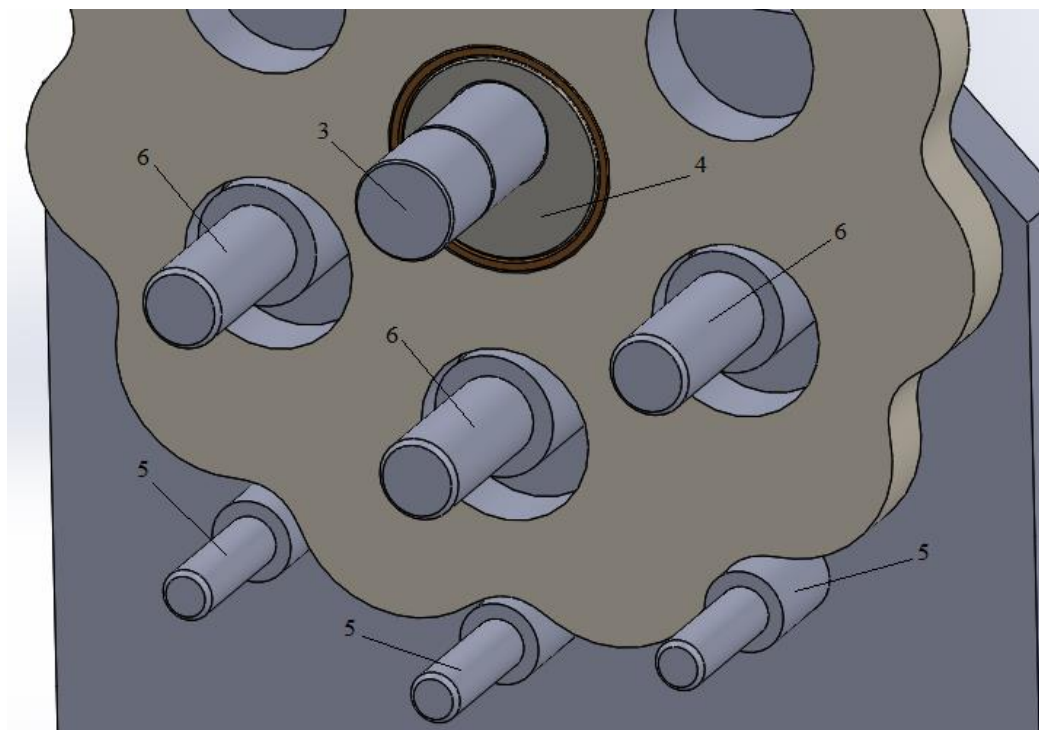
Слика 3.3 3D модел алата за анализу напонско-деформационог стања циклозупчаника -2



Слика 3.4 3D модел алата за анализу напонско-деформационог стања циклозупчаника -3



Слика 3.5 3D модел алата за анализу напонско-деформационог стања циклозупчаника -4



Слика 3.6 3D модел алата за анализу напонско-деформационог стања циклозупчаника -5

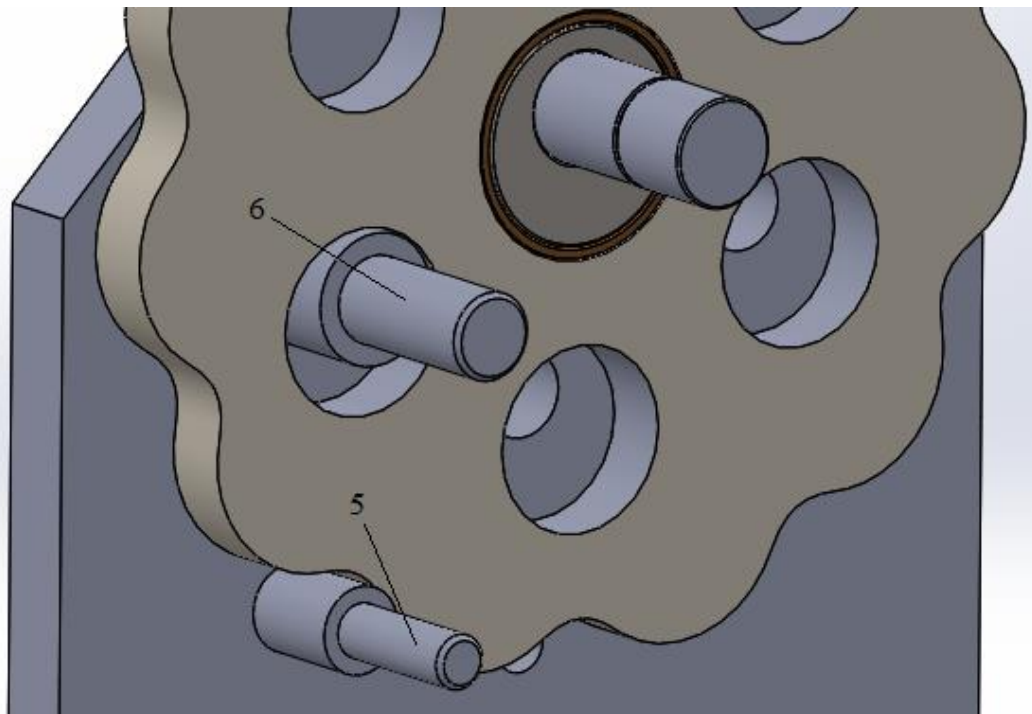
Основни делови алата су:

- 1 – притискивач,
- 2 – циклозупчаник,
- 3 – улазно вратило,
- 4 – ексцентар чаура,
- 5 – осовиница и ваљак централног зупчаника,
- 6 – излазна осовиница са излазним ваљком,
- 7 – постоље алата.

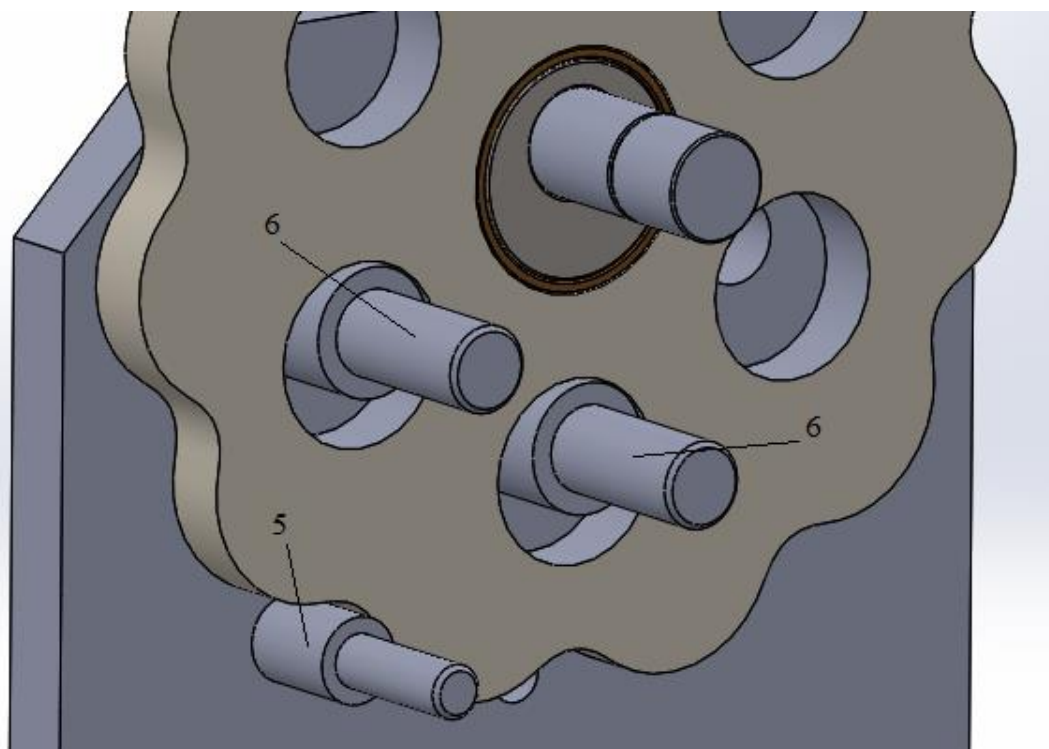
На основу пројектованог алата могуће је анализирати напонско – деформационо стање циклозупчаника за следеће случајеве:

1. *Једнострука спрега* – у контакту 1 излазни ваљак (слика 3.7)
2. *Једнострука спрега* – у контакту 2 излазна ваљка (слика 3.8)
3. *Једнострука спрега* – у контакту 3 излазна ваљка (слика 3.9)
4. *Двострука спрега* – у контакту 1 излазни ваљак (слика 3.10)
5. *Двострука спрега* – у контакту 2 излазна ваљка (слика 3.11)
6. *Двострука спрега* – у контакту 3 излазна ваљка (слика 3.12)
7. *Трострука спрега* – у контакту 1 излазни ваљак (слика 3.13)
8. *Трострука спрега* – у контакту 2 излазна ваљка (слика 3.14)
9. *Трострука спрега* – у контакту 3 излазна ваљка (слика 3.15)

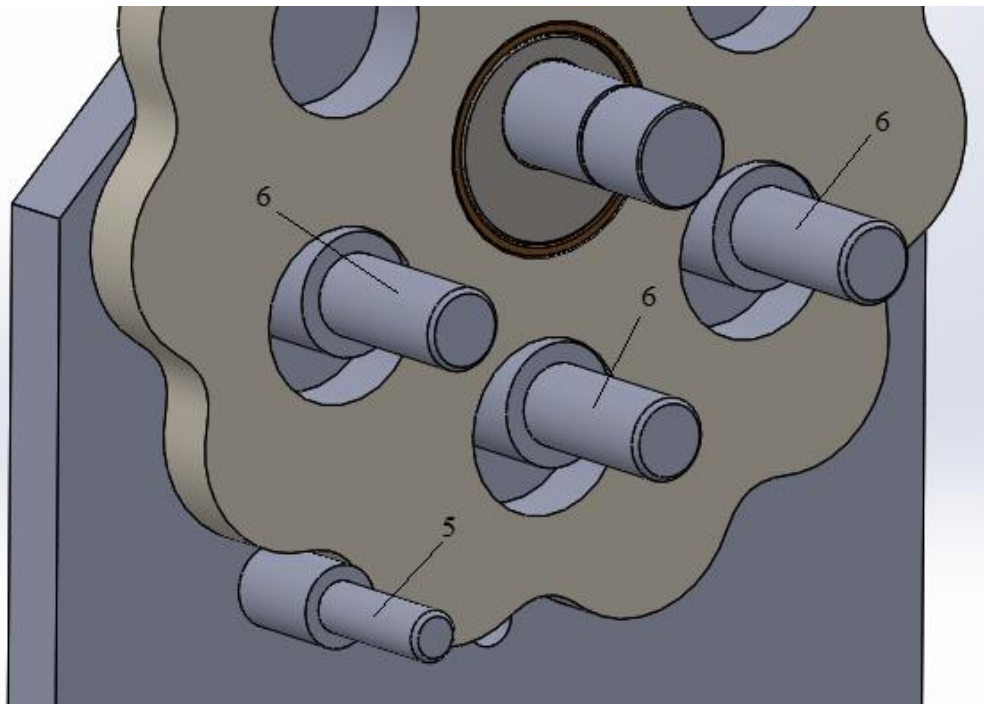
Додатно је могуће комбиновати и положаје ваљака (централних и излазних) који преносе оптерећење. На основу свих ових анализа, може се креирати веома поуздана расподела напона и деформација циклозупчаника при статичком и динамичком спољашњем оптерећењу.



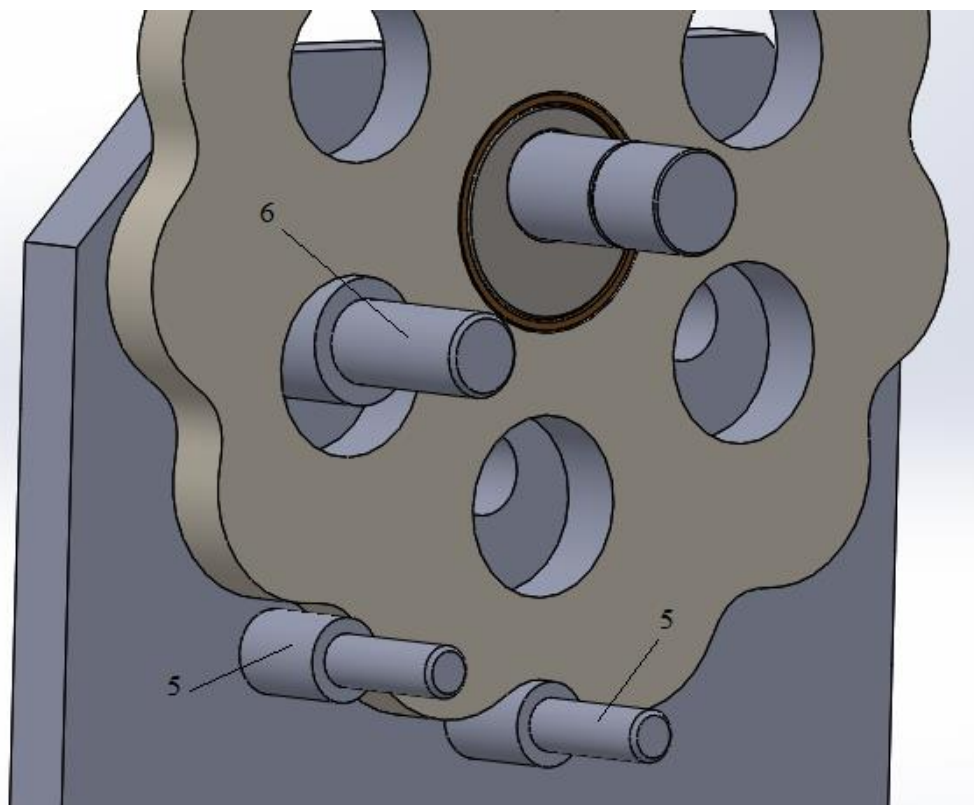
Слика 3.7 Једнострука спрега – у контакту 1 излазни ваљак



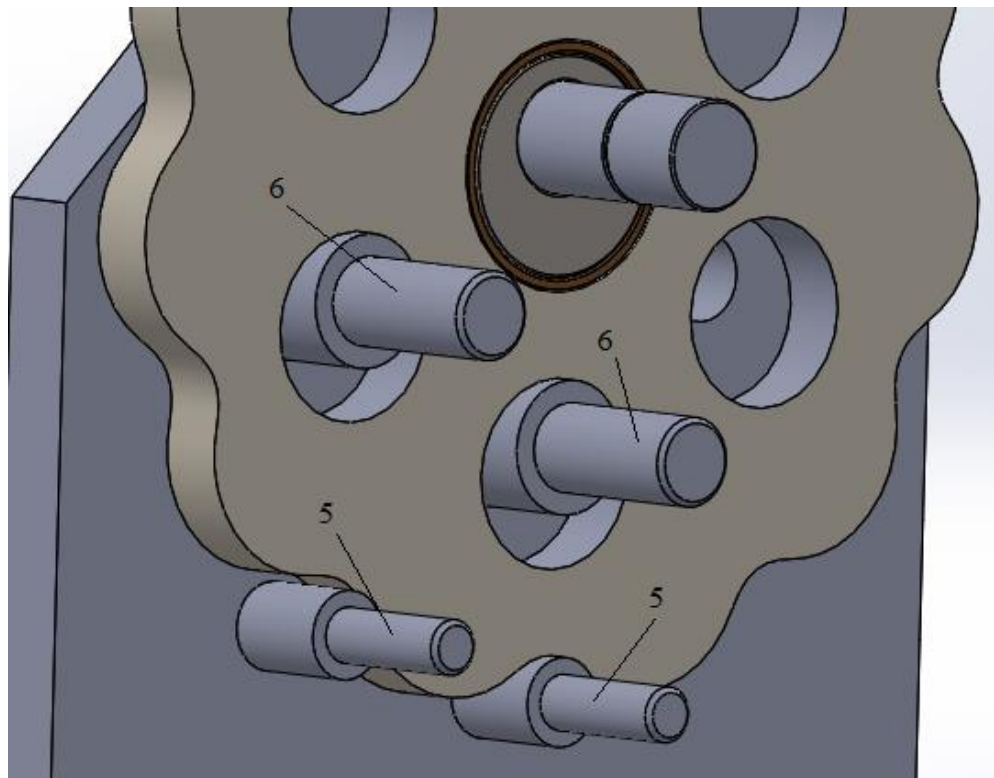
Слика 3.8 Једнострука спрега – у контакту 2 излазни ваљак



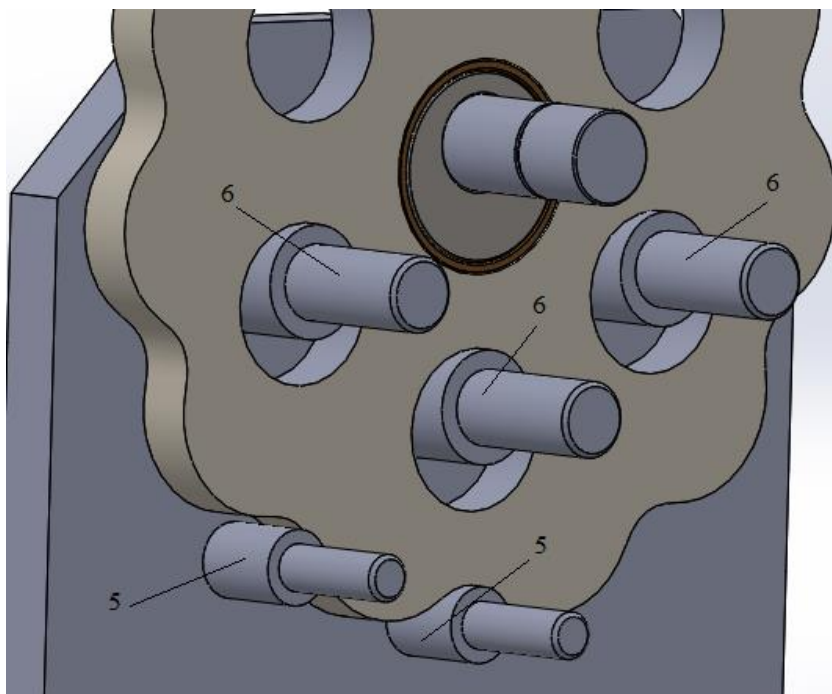
Слика 3.9 Једнострука спрега – у контакту 3 излазна ваљка



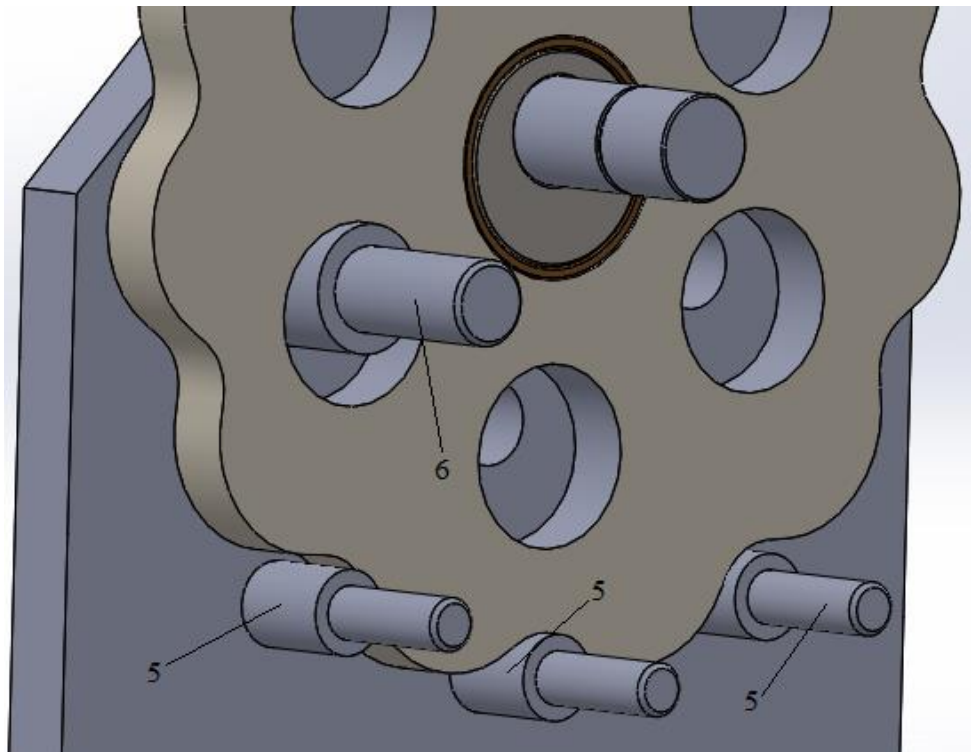
Слика 3.10 Двострука спрега – у контакту 1 излазни ваљак



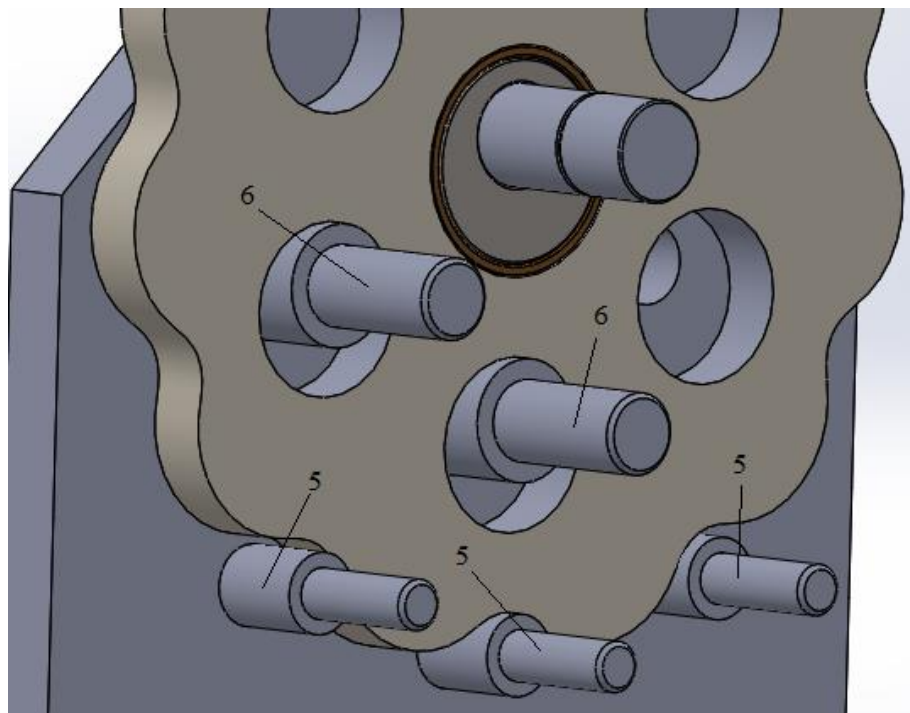
Слика 3.11 Двострука спрега – у контакту 2 излазна ваљка



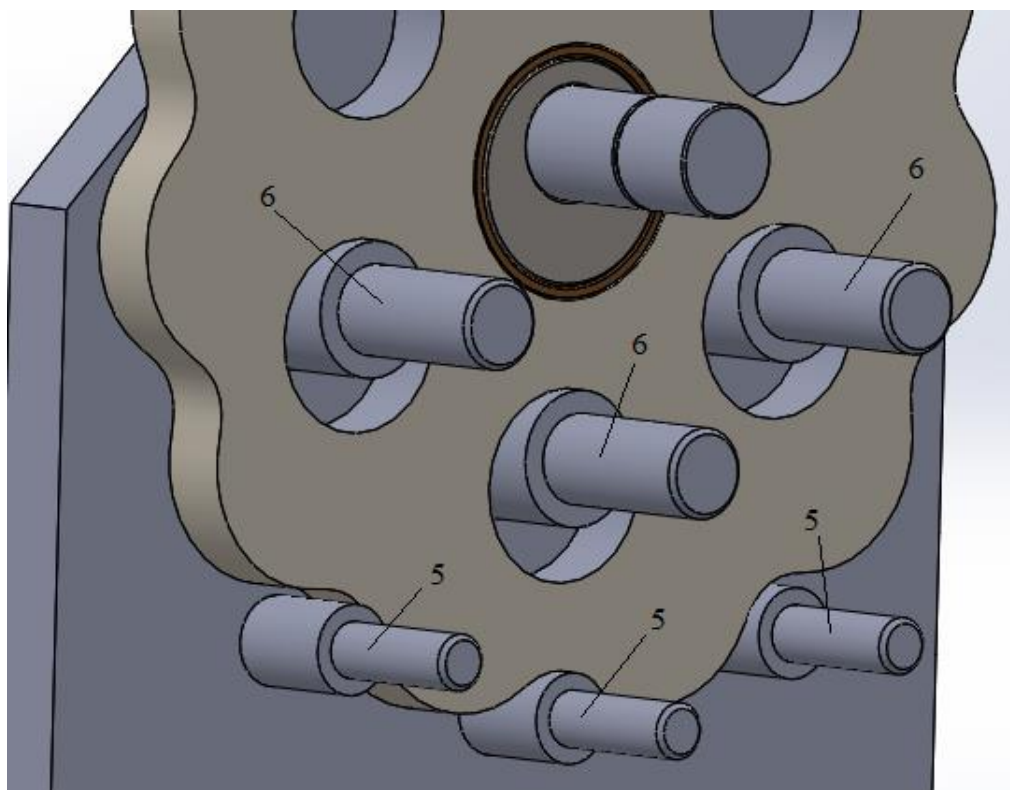
Слика 3.12 Двострука спрега – у контакту 3 излазна ваљка



Слика 3.13 Трострука спрега – у контакту 1 излазни ваљак



Слика 3.14 Трострука спрега – у контакту 2 излазни ваљка



Слика 3.15 Трострука спрега – у контакту 3 излазна ваљка

Предвиђено је да се испитивања напонско-деформационог стања циклозупчаника при статичким и динамичким спољашњим оптерећењима обаве на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу у Центру за инжењерски софтвер и динамичка испитивања на сервохидрауличном пулзатору SHIMADZU методом мерних трака, слика 3.16. Пулзатор SHIMADZU је намењен испитивањима статичких и динамичких карактеристика материјала на собној и повишеним температурама до 1000°C. Пулзатор има распон силе од 10N до 100kN и способност да одговори на широк распон фреквенција. Распон амплитуде је од 1 μm до 100 mm.



Слика 3.16 Сервохидраулични пулзатор SHIMADZU

4.0 ИЗРАДА АЛАТА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНУ АНАЛЗУ НАПОНСКО-ДЕФОРМАЦИОНОГ СТАЊА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА

Сви елементи који улазе у састав алата за испитивање напонско-деформационог стања циклозупчаника, као и елементи потребни за испитивање, израђени су технологијом обраде резањем. Цилиндрични делови су израђени на универзалним струговима, док су призматични елементи израђени на глодалици. Елементи са захтевнијом геометријом су израђени на CNC глодалици због тачности димензија и саосности која је веома важна. Циклоредуктори су познати по томе што њихова производња захтева велику прецизност, као и детаљу контролу пре склапања. Због тога је током израде алата велика пажња посвећена начину израде и квалитету обраде.

Алат је направљен у краљевачкој породичној фирми СЗР „Зегер“ која располаже веома квалитетним машинским парком неопходним за производњу веома сложених машинских система.

4.1 ИЗРАДА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА

За поједине елементе циклоредуктора било је потребно креирати 3D модел, а затим урадити исте машинирањем на CNC глодалици. Најзахтевнији елемент је био циклозупчаник, због специфичног геометријског профила коју није могуће добити универзалним глодањем. Како би се смањило време обраде на CNC глодалици, припремак челика Č4732 претходно је обрађен на универзалном стругу. Извршене су следеће операције: бушење централног отвора за ексцентар, обрада централног отвора, обрада спољашњег пречника и ширине припремак. Затим је на CNC глодалици израђен профил циклозупчаника (еквидистанта скраћене епитрохоиде), као и отвори за излазне ваљке. Профила је израђен на основу већ генерисаног 3D модела циклозупчаника. За потребе испитивања направљена су два циклозупчаника, један од алуминијума и један од челика. Такође, направљен је и један циклозупчаник поступком 3D штампе.



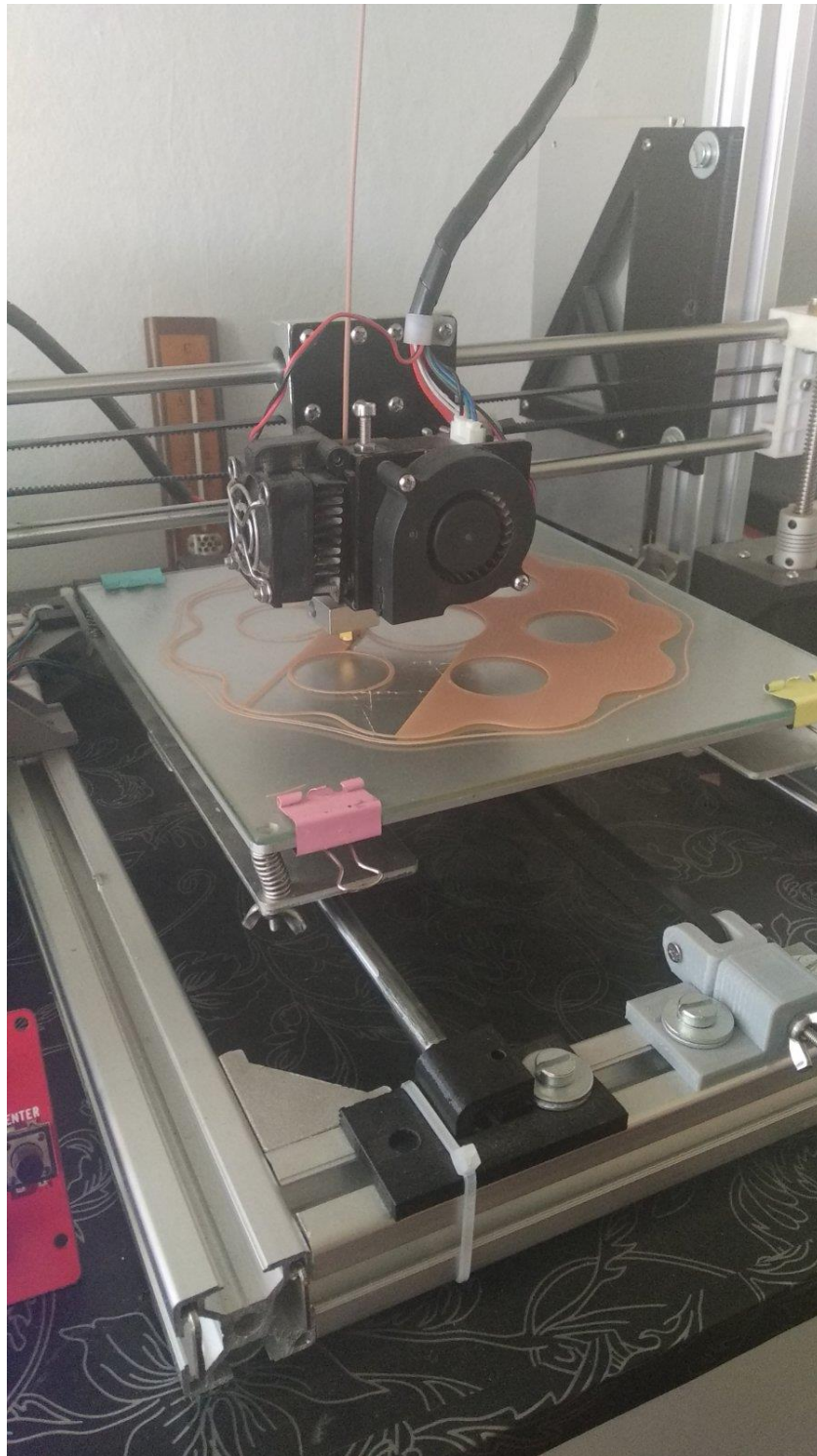
Слика 4.1 Циклозупчаник од алуминијума



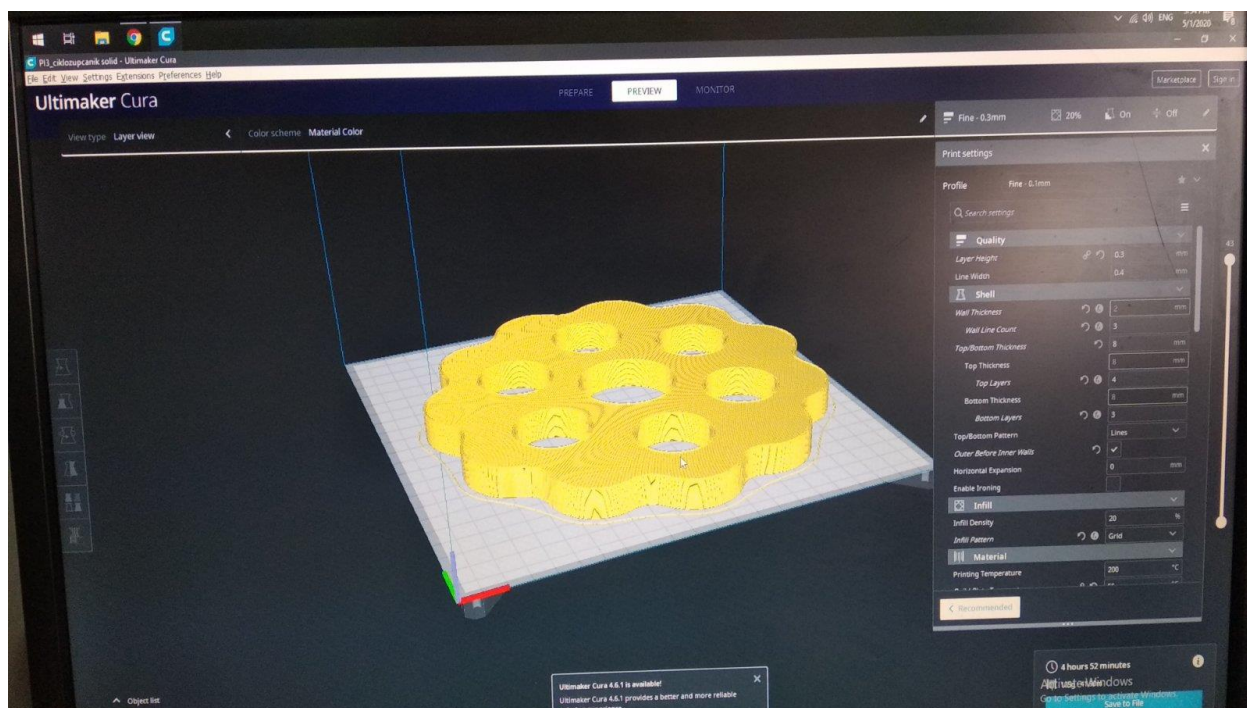
Слика 4.2 Циклозупчаник од челика



Слика 4.3 *Циклозупчаник добијен поступком 3D штампе*



Слика 4.4 Израда циклоредуктора поступком 3D штампе



Слика 4.5 Завршни процес 3D штампе циклозупчаника

4.2 ИЗРАДА ВАЉАКА ЦЕНТРАЛНОГ ЗУПЧАНИКА И ИЗЛАЗНИХ ВАЉАКА

Прорачуном циклоредуктора добијене су и усвојене коначне димензије свих елемената које улазе у састав циклоредуктора. Из разлога што ваљци централног зупчаника и излазни ваљци трпе велико радијално оптерећење, било је потребно ојачати површински слој ваљака. То је постигнуто цементацијом и каљењем. Из конструктивних разлога ваљак и осовиница су у овом случају израђени као један елемент. Разлог је тај што је у алату циклозупчаник оптерећен искључиво статичким оптерећењем и нема никаквог обртања. Са обе стране ваљака израђени су рукавци који се ослањају у отворима бочне плоче алата. На крајрвима рукаваца су навоји. Ваљци се навојним спојем везују са обе бочне плоче алата за испитивање.



Слика 4.6 Израда ваљака



Слика 4.7 Израда навоја М16 (излазни ваљак)



Слика 4.8 Израда навоја M10 (ваљак централног зупчаника)



Слика 4.9 Завршна обрада навоја

4.3 ИЗРАДА ЕКСЦЕНТАР ЧАУРЕ

Ексцентар чаура је добијена стругањем, док је отвор који се налази ексцентрично у односу на уздужну осу припремка израђен на глодалици (довођењем припремке и алата у осу, а затим извођењем алата из осе у вредности 5 mm). Уместо пројектованог игличастог лежаја усвојена је бронзана чаура која се монтира између ексцентар чауре и циклозупчаника. Због поступка монтаже алата и статичке природе оптерећења, изостављен је клин који везује ексцентар чауру и вратило.



Слика 4.10 Израда ексцентар чауре на стругу



Слика 4.11 Израда отвора у ексцентар чаури

4.4 ИЗРАДА БРОНЗАНЕ ЧАУРЕ

Током прорачуна циклоредуктора, усвојени су лежаји на одговарајућим местима на вратилу. Како су израђени елементи циклоредуктора намењени експерименталном испитивању, уместо стандардних лежаја усвојене су и израђене бронзане чауре које по свим својим димензијама одговарају предвиђеним кугличним и игличастим лежајима.



Слика 4.12 Израда бронзаних чаура

4.5 ИЗРАДА ВРАТИЛА

Прорачунским путем дошло се до пречника улазног вратила циклоредуктора, на које треба да делује сила притискивача током испитивања. На вратилу су укопани канали за осигураче како током испитивања вратило не би мењало свој положај у аксијалном правцу. Вратило је израђено на стругу тако да задовољава димензије отвора у ексцентар чаури.



Слика 4.13 Израда вратила на стругу



Слика 4.14 Израда канала за осигурач

4.6 ИЗРАДА ПОДЛОШКИ

Да би алат био у потпуности осигуран од међусобног померања спрегнутих елемената, израђене подлошке веће ширине него стандардне.



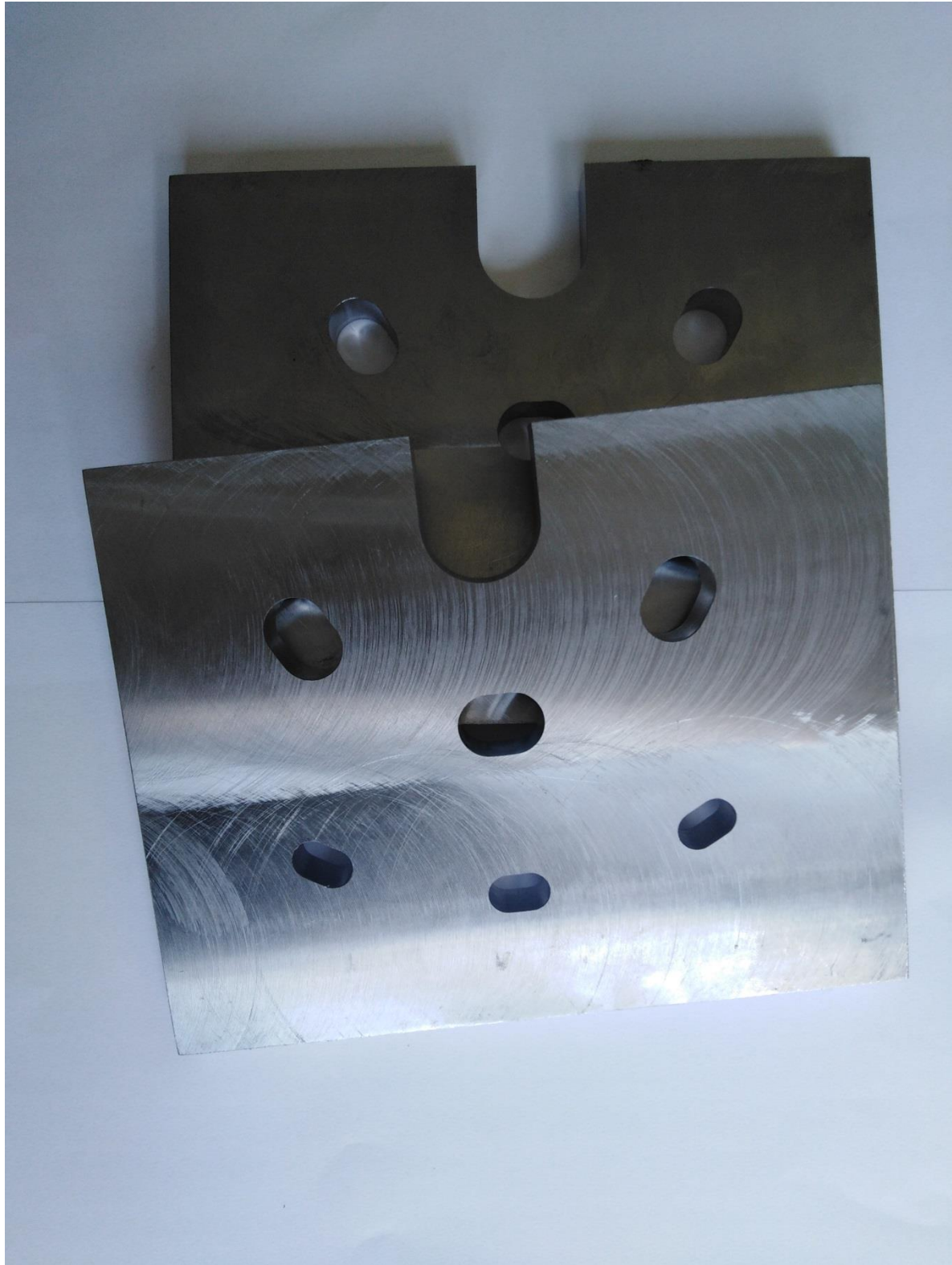
Слика 4.15 Подлошке

4.7 ИЗРАДА БОЧНИХ ПЛОЧА АЛАТА

Током израде свих елемената алата за испитивање, велика пажња је посвећена прецизности и саосности. Свако мање одступање утицало би на монтажу и нарушило би могућност склапања. Када је реч о бочним плочама алата, распоред отвора је првобитно генерисан у 3D моделу. Отвори нису кружни већ елипсастог облика како би се обезбедио контакт ваљка и профила циклозупчаника. Лежиште вратила је проширено за 4 mm према стопи, како би било омогућено деловање притискивача. Плоче су прво грубо обрађене на глодалици, а затим су рупе избушене на координатној CNC бушилици.



Слика 4.16 Грубо глодање плоча



Слика 4.17 Бочне плоче алата после завршне обраде

4.8 ИЗРАДА ДОЊЕ ПЛОЧЕ АЛАТА

Након што су израђене бочне плоче алата, да би се обезбедила тачна монтажа и услов поновљивости, плоче алата су везане чивијама Ø8. Такође, обележене су лева и десна страна плоче.



Слика 4.18 Чивија за осигурање

4.9 ИЗРАДА ПРИТИСКИВАЧА

Притискивач је пројектован тако да обухвата цео алат и радијусом на крајевима плоча делује на вратило које је спрегнуто са ексцентар чауром, одговарајућим ваљцима и циклозупчаником. Дебљина зида притискивача усвојена је као и дебљина зида плоче алата.



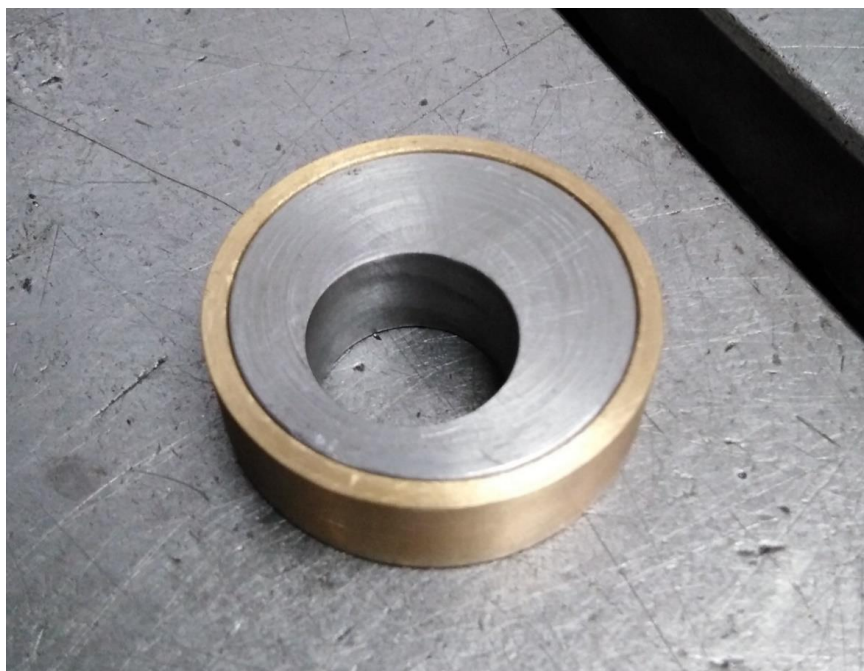
Слика 4.19 Заваривање плоча притискивача

5.0 МОНТАЖА АЛАТА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНУ АНАЛИЗУ НАПОНСКО – ДЕФОРМАЦИОНОГ СТАЊА ЦИКЛОЗУПЧАНИКА

Циклоредуктори су по својој структури веома сложени машински системи. Захтевају изузетну пажљивост и посвећеност у фази пројектовања, док је израда њихових виталних елемената можда и најкомплекснији сегмент. Познате светске компаније које се баве производњом циклоредуктора (*Sumitomo*, *Spinea*, *Nabtesco*) имају технолошке услове и машинске паркове специјално прилагођене изради ове врсте преносника снаге. Баш захваљујући веома захтевном процесу израде, у свету и не постоји велики број реномираних произвођача циклоредуктора.

Алат за експерименталну анализу напонско-деформационог стања циклозупчаника садржи све виталне елементе једног циклоредуктора (циклозупчаник, ексцентар чаура, ваљци централног зупчаника, излазни ваљци,...). Као што је већ речено, процеси израде и монтаже циклоредуктора су веома захтевни тако да је прави подвиг за једну малу породичну компанију да се упусти у овакав пројекат и са успехом га реализује.

Процес монтаже је започет од ексцентар чауре и офговарајуће бронзане чауре која код алата има улогу игличастог лежаја.



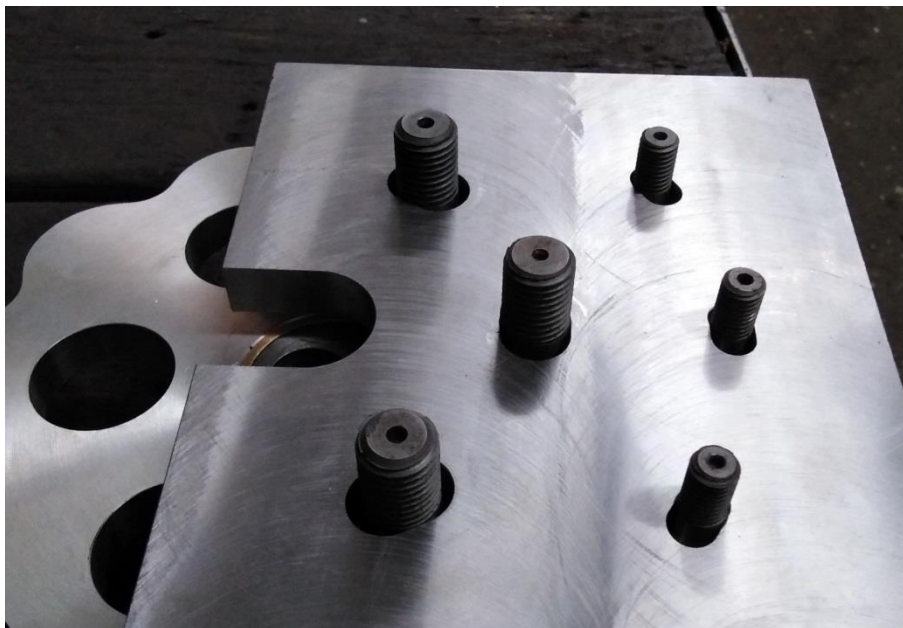
Слика 5.1 Ексцентар чаура у склопу са бронзаном чауром

Након монтаже бронзане чауре на спољашњи пречник ексцентар чауре, уследила је монтажа тог подскопа у централни отвор циклозупчаника.



Слика 5.2 Монтирање чауре у отвор циклозупчаника

Затим су монтирани ваљци централног зупчаника и излазни ваљци у отворе на плочама алата. Ваљци се осигуравају завртњима М16 и М10 са спољашње стране обе плоче.



Слика 5.3 Монтажа ваљака циклоредуктора



Слика 5.4 Осигуравање ваљака навојним спојевима

Пре него што се и друга страна осигура завртњима, потребно је убацити циклозупчаник тако да се унутрашњим зидом отвора ослони на излазне ваљке, а својим спољашњим профилом оствари контакт са ваљцима централног зупчаника. У оба случаја се остварује контакт по линији.



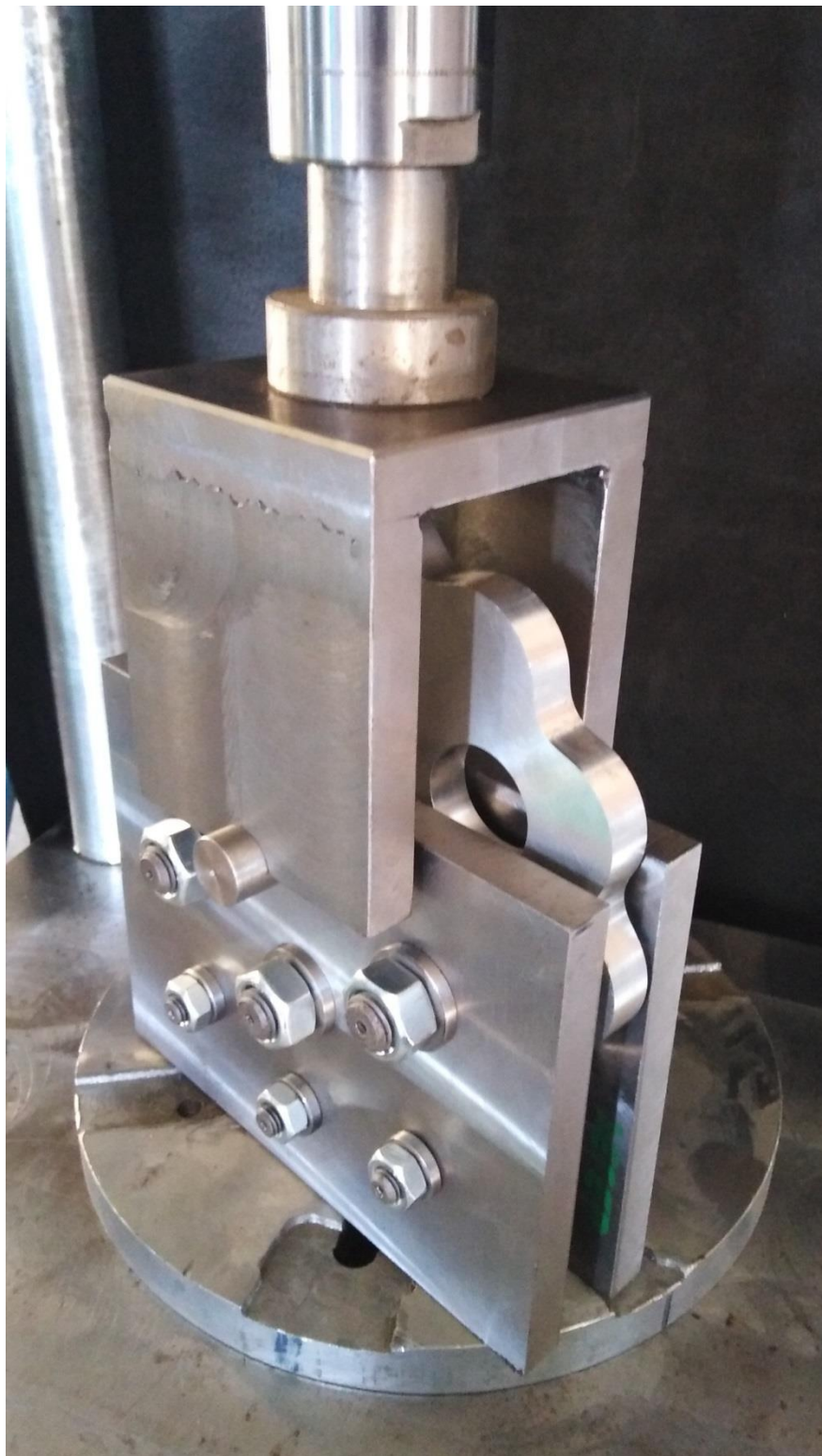
Слика 5.5 Монтажа циклозупчаника

Након убацивања циклозупчаника између плоча алата и осигурања завртњима, убачено је и вратило са чаурама и подлошкама једнако распоређених са обе стране алата. Како се током испитивања вратило не би аксијално померало, обе стране вратила су осигуране одговарајућим осигурачима.

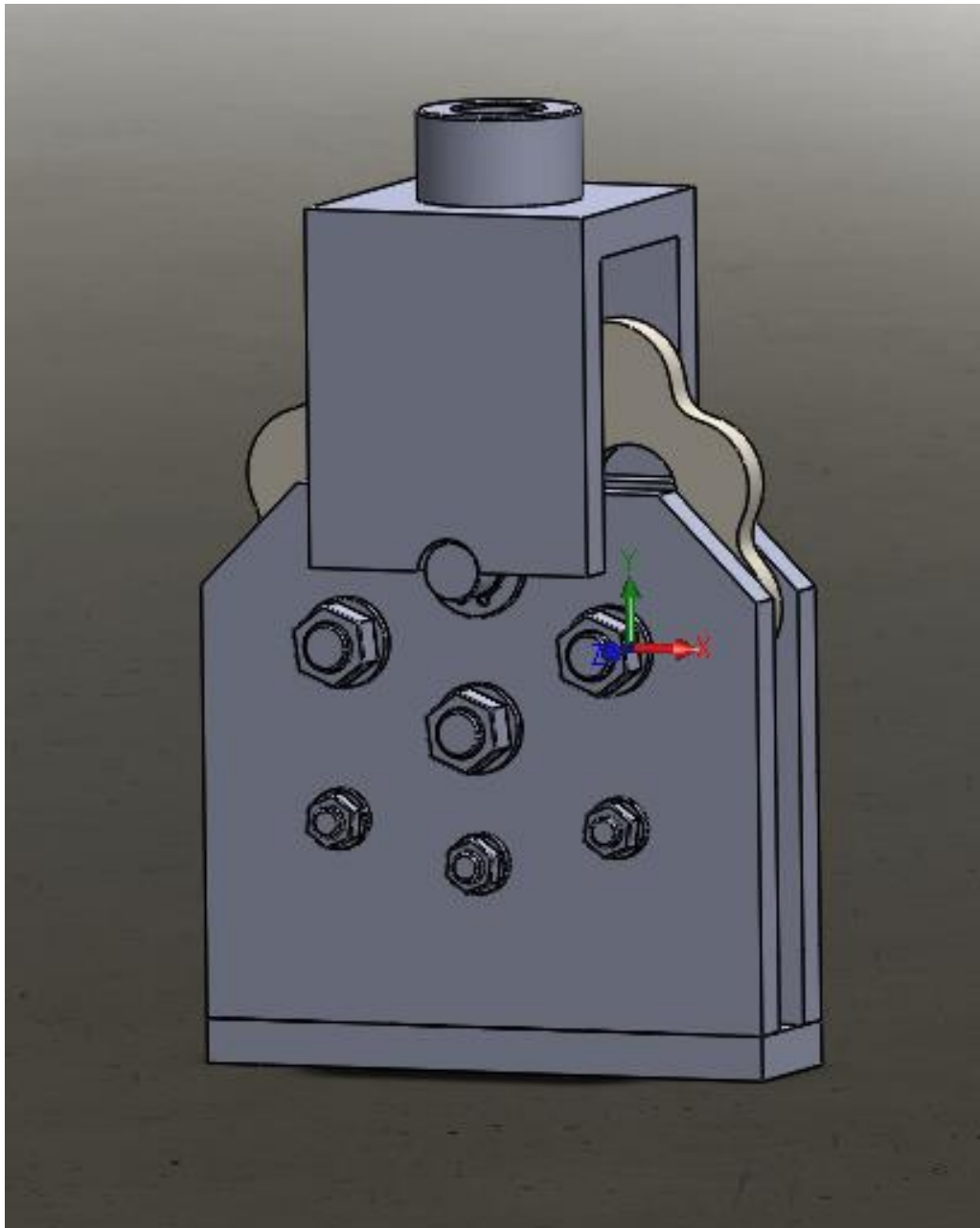


Слика 5.6 Монтажа вратила

Комплетно монтиран алат је приказан на слици 5.7.



Слика 5.7 Алат и притискивач са спрегнутим циклозупчаником



Слика 5.8 3D модел алата са притискивачем

6.0 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Циклоредуктори представљају нову генерацију механичких преносника снаге. Уместо еволвентних зупчаника користе се зупчаници са комплексним циклоидним профилем, циклозупчаници. Профил зупца циклозупчаника је еквидастанта скраћене епитрохоиде. Та сложена крива линија профила зупца доприноси побољшању неких особина и радних карактеристика у односу на конвенционалне еволвентне зупчасте преноснике. Циклоредуктори имају изузетно компактну конструкцију па је из тог разлога њихова примена веома пожељна код машинских система који на располагању имају ограничен простор за погонску групу. Због карактеристичног принципа рада могу да издрже висока и фреквентна преоптерећења.

Кључни елемент сваког циклоредуктора је циклозупчаник. Он је у току рада изложен веома сложеним напрезањима и због свог необичног облика веома је тешко аналитичким путем одредити расподелу напона и деформација. Циљ овог мастер рада је пројектовање и израда алата за експериментално одређивање напонско-деформационог стања циклозупчаника у статичким и динамичким условима рада. Алат треба да омогући испитивања у условима једноструке, двоструке и троструке спреге. Такође, конструкција алата треба да обезбеди испитивања у условима када је у контакту и различит број излазних ваљака.

У мастер раду је прво на основу усвојених полазних параметара циклоредуктора који би био подвргнут испитивањима извршен прорачун основних геометријских и кинематичких параметара. Дефинисане су једначине профила циклзупчаника (еквидистанте скраћене епитрохоиде) и одређене су димензије свих виталних елемената циклоредуктора. Затим је у програмском пакету "SolidWorks" извршено њихово моделирање, као и моделирање алата за испитивање.

Због веома сложене геометрије, израда циклоредуктора је веома комплексан процес и баш из тог разлога данас у свету поостоји веома мали број реномираних произвођача ове врсте преносника снаге (*Sumitomo, Spinea, Nabtesco,...*). Алат за експериментално испитивање напонско – деформационог стања циклозупчаника је на основу урађене техничке документације израђен у породичној компанији СЗР „Зегер“ из Краљева, што представља прави технолошки и инжењерски подухват. После израде и термичке обраде, извршена је монтажа алата.

Циклоредуктори, као представници нове епохе на пољу преносника снаге отварају за собом широку лепезу могућности за испитивање, усавршавање и развој. Израдом алата за експерименталну анализу напонско - деформационог стања циклозупчаника отвара се могућност доласка до многих важних закључака, као и информација о стању циклозупчаника пре него што он постане саставни део циклоредуктора. Овај мастер рад представља добру основу и даје могућност за многа даља испитивања која треба спровести када је реч о области овог типа савремених преносника.

Литература

- [1] В. Н. Кудрявцев: Планетарные Передачи, Москва, 1966;
- [2] М. Lehmann: Berechnung und messung der krafte in einem zykloiden-kurvenscheiben - getriebe, Докторска дисертација, Технички унверзитет Минхен, München, 1976;
- [3] М. Благојевић: Кинематичка и динамичка анализа једностепеног циклоредуктора, Магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003;
- [4] М. Благојевић: Напонско и деформационо стање елемената циклоредуктора при динамичким оптерећењима, Докторска дисертација, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008;
- [5] М. Матејић: Нови приступ пројектовању и оптимизацији циклоидних преносника снаге, Докторска дисертација, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019;
- [6] И. Пантић: Динамичке симулације у процесу развоја производа, Мастер рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2015;
- [7] М. Раденковић: Примена PLM софтвера у развоју производа, Завршни рад, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2019;