

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинске конструкције и механизација

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинско инжењерство

Предмет: Компјутерско моделирање и симулације машинских елемената и конструкција

Број индекса: 715/2016

Милош Д. Раденковић

Примена PLM софтвера у развоју производа

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. **Др Мирко Благојевић, ван. проф.- ментор**

Датум одбране: _____

2. _____

Оцена: _____

3. _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да у неком од PLM софтвера измоделира, а затим и направи физички модел неког новог преносника снаге.

Препоручена литература:

1. Б.Стојановић, М. Благојевић: Механички преносници, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2015;
2. М. Благојевић: Кинематичка и динамичка анализа једностепеног циклоредуктора, Магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац , 2003.

Крагујевац, март 2018.

Ментор:

Др Мирко Благојевић, ван.проф.

Резиме

У оквиру овог завршног рада разматрани су циклоидни преносници снаге са новом концепцијом (централни ваљци непокретног централног зупчаника замењени су сегментом са унутрашњим циклоидним озубљењем). Прво је направљен 3D модел једног конкретног једностепеног циклоредуктора у PLM софтверу *SolidWorks*. Затим је, коришћењем универзалних и нумеричких машина направљен физички модел овог циклоредуктора. Посебна пажња је посвећена изради профила зупца циклозупчаника – еквидистанти скраћене епитрохоиде.

Кључне речи: *циклоредуктор, циклозупчаник, SolidWorks*.

In this study, cycloidal power transmissions with a new concept were considered (the central rollers of the fixed central gear were replaced by the segment with internal cycloidal gearing). The first, a 3D model of one specific single-stage cycloidal reducer was developed in the *SolidWorks* PLM software. Then, using the universal and numerical machines, a physical model of this cycloidal reducer was made. Special attention was devoted to making a profile of a cycloidal tooth - equidistants of a shortened epitrohoide.

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

Садржај:

Увод.....	5
1. Циклоредуктори.....	7
1.1. Основне радне карактеристике циклоредуктора	7
1.2. Принцип рада	8
1.3. Предности и мане циклоредуктора	10
1.4. Начин генералисања профила зупца циклозупчаника	10
2. Моделирање једноступеног циклоредуктора	13
3. Израда циклоредуктора.....	16
3.1. Спецификација машина на којима је вршена обрада	20
3.1.1. Универзални струг Потисје Морандо РА-22.....	20
3.1.2. Универзални струг Првомајска TNP-200В.....	21
3.1.3. Универзални струг Првомајска NILES TNP-300	22
3.1.4. Универзална глодалица Првомајска ALG-200	23
3.1.5. Универзална глодалица	24
3.1.6. Универзална стубна бушилица Далмастрој МК-4.....	26
3.1.7. CNC глодалица Mori Seiki NV5000	27
3.1.8. Округла брусилица	28
3.1.9. Универзална линијска тестера за сечење материјала	29
4. Опис израде елемената циклоредуктора.....	30
5. G код циклоидног озубљења.....	37
6. Закључак	39
7. Литература	40

Увод

Преносници снаге у општем случају представљају механизме који служе за пренос снаге и кретања. Преносници се постављају између погонске и радне машине у циљу прилагођавања радних карактеристика погонске машине потребама радне машине, уз што мање губитке енергије. То значи да је преносник посреднички механизам, чији је задатак да пренесе механичку енергију погонске машине на радну машину. У већини случајева погонска машина, преносник и радна машина чине једну целину. Потреба за применом преносника снаге је произишла из карактеристичних величина погонске машине и карактеристичних величина радне машине. Карактеристичне величине погонске машине (угаона брзина, број обртаја, обртни момент и снага), ретко када ће одговарати потребама радне машине. За различите радне услове користе се различите концепције преносника, тако да се данас у примени највише користе механички, хидраулични, пнеуматски, електрични, комбиновани и хибридни преносници.

Развој механичких преносника је текао упоредо са развојем машинства и индустрије. Елементи првих преносника су пронађени у Кини, Индији, Месопотамији и Египту [1]. Материјал од којих су били израђени је био у то време и једини материјал који би се могао прецизно обрадити, а то је било дрво. Људи су имали потребу за употребом преносника код млинова, уређаја за наводњавање и подизање терета. Историјски записи говоре да је први зупчаник настао још 350 године пре нове ере. Велики допринос конструкцији као и примени преносника дали су грчки математичар Архимед (*Archimedes*, 287- 212. пре.н.е), као и италијански вајар, сликар и инжењер Ленардо да Винчи (*Leonardo da Vinci*, 1452-1519. год.).

Како се сама цивилизација развијала тако су временом долазила и нова, савременија решења за пренос снаге и кретања. Појавили су се планетарни преносници, као и најзначајнији представници нове генерације механичких преносника, а то су таласни редуктори и циклоредуктори. Таласни редуктори поседују еластични зупчаник који врши планетарно окретање око генератора таласа који такође ротира око исте осе. Раде на принципу преноса ротационог кретања које следи из прогресивне теласне деформације једног зупчаника [1]. Механички преносници су уређаји који служе за пренос механичке енергије уз промену брзине кретања и одговарајућу промену обртног момента, често и уз промену облика и закона кретања. Овакви преносници омогућавају економичан рад, регулисање брзине кретања, рад са великим обртним моментима, малим бројем обртаја, као и остваривање траженог преносног односа са великом тачношћу. У општем случају, механички преносници се користе за велике снаге и постизање великих преносних односа између улазног и излазног вратила преносника. Механички преносник се састоји из једног или више различитих преносника. Механичка енергија се преноси преко машинских елемената различитих врста и облика, међусобним контактом и спрезањем. Машински

делови који врше пренос механичке енергије могу бити фрикциони, зупчасти, каишни и ланчани.

Радне машине углавном раде при нижем броју обртаја у односу на погонске, при чему су вредности обртних момената знатно веће. Понекад је неопходно једном погонском машином погонити више радних машина. Код неких погона код транспортних система, положај оса вратила погонске и радне машине се мења у току експлоатације, као и њихово међусобно растојање. У неким случајевима неопходна је и промена броја обртаја радне машине у самом процесу експлоатације. Механички преносници кретање и обртни момент преносе преко такозване везе обликом или трењем. Поступак избора одговарајућег преносника за конкретну примену није ни мало једноставан и највише зависи од постављених захтева. Ако су доминантни захтеви мале димензије, константан преносни однос, велики степен искоришћења, велика издржљивост и трајност у раду, низак ниво буке и вибрација, онда су зупчасти преносници свакако у предности у односу на све остале типове преносника и најзаступљенији су у пракси. За пренос снаге и кретања између два вратила са већим осним растојањем и сталним преносним односом, примењују се зупчасти каишни и ланчани преносници. Обзиром на своје кинематске и динамичке карактеристике, примењују се само за мање вредности угаоних брзина и обртних момената. Ако је међу захтевима наглашен постојан и стабилан рад преносника у случају краткотрајних преоптерећења, а да при томе преносни однос не мора бити константан, за већа осна растојања и мање снаге веома велику примену имају каишни преносници. За исте захтеве али у случају мањих осних растојања користе се фрикциони преносници. У случају преоптерећења овакви преносници проклизавају и тако штите погонску и радну машину. Користе се код преносника чији су елементи веома скупи за израду. Када се међусобни положај вратила мења у току експлоатације, или се вратила налазе под одређеним углом, примењују се кардански преносници. Кардански преносници имају изузетно високу вредност степена искоришћења. Навојни преносници се користе када је потребно да се обртно кретање претвори у трансаторно, односно обртни момент у аксијалну силу. Планетарни преносници (зупчасти преносници са унутрашњим озубљењем) имају све већу примену у савременој индустрији (код борбених средстава, транспортних уређаја, алатних машина...). Њихове основне предности у односу на зупчасте преноснике са спољашњим озубљењем су мање димензије, мања оптерећења и већи степен искоришћења. Тип преносника зависи од вредности преносног односа. У случају када је преносни однос већи од 1, тада је реч о редуктору. У случају када је преносни однос мањи од 1 тада је реч о мултипликатору. Преносници чији је преносни однос једнак јединици спадају у једноставне механичке преноснике, и код њих су параметри на улазном вратилу једнаки параметрим на излазном вратилу.

1. Циклоредуктори

Циклоредуктори представљају савремен тип преносника снаге. Они припадају групи планетарних механичких преносника. Имају широку примену у савременој индустрији и све више замењују конвенционалне зупчасте редукторе. Имају велике предности у односу на остале преноснике снаге по питању преносног односа, компактности конструкције и степена искориштења. Основни елемент оваквих преносника је зупчаник са циклоидним профилем - циклозупчаник.

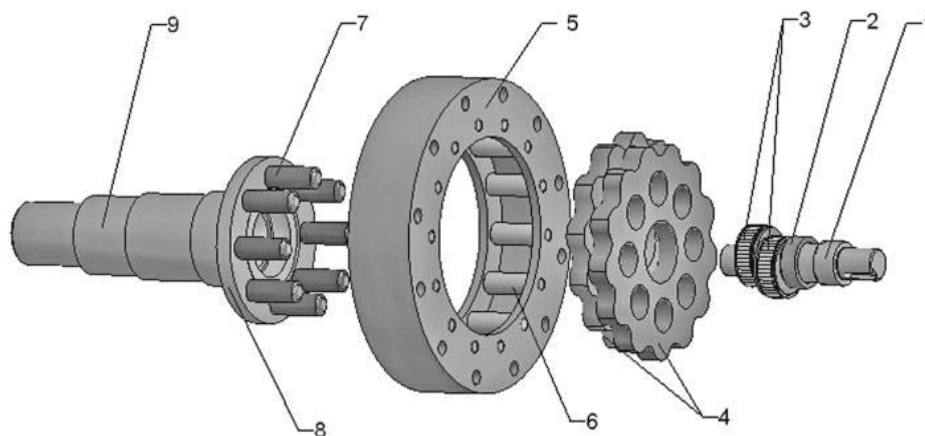
1.1. Основне радне карактеристике циклоредуктора

Циклоредуктори данас имају веома широко поље примене и све чешће у пракси замењују конвенционалне типове редуктора. Њихов изумитељ је немачки инжењер *Lorenz Braren*. Радио је као конструктор у фирми *Dekkel* у Минхену која се бавила производњом фотоапарата. Механизам затварача фотоапарата инспирисао је *Lorenz Braren*- а да дође на идеју о развоју сасвим нове генерације планетарних преносника. Да би се потпуно сконцентрисао на развој и усавршавање своје идеје *Lorenz Braren* је напустио фирму *Dekkel* и основао своју фирму 1931. године у Минхену [2]. Код циклоредуктора се примењује циклоидно озубљење, а као профил зупца зупчаника (циклозупчаника) се користи еквилистанта скраћене епитрохоиде. Захваљујући контакту конкавне и конвексне површине, циклоредуктори могу да пренесу велика радна оптерећења. Имају изузетно велике преносне односе и могу бити једностепени и вишестепени. Један једностепени циклоредуктор може имати преносни однос и до 1:119, а тростепени циклоредуктор теоријски преносни однос близу 1:1000000. Принцип рада циклоредуктора се заснива на томе да улазно вратило покреће ексцентричну чауру која доводи циклоидни зупчаник у ексцентрично кретање. Даље се то кретање преноси на ваљке на излазном вратилу. Тако се мења смер обртања излазног вратила и редукује број обртаја. Степен искориштења једностепеног циклоредуктора може бити и до 93 %, док је степен искориштења двостепеног редуктора око 86% [1]. Рад циклоредуктора се заснива на ексцентричном кретању циклозупчаника чија маса није занемарљива. Током рада циклоредуктора велики проблем представљају вибрације које доводе до повећаног хабања профила циклозупчаника и већег оптерећења лежачева, а самим тим смањује се радни век појединих елемената редуктора. Поред тога, циклоредуктор је веома погодан за рад у условима са честим покретањима и заустављањима. Такође је веома отпоран на промену смера обртања, обзиром на то да је око 2/3 ваљака централног циклозупчаника у константној спрези са зупцима циклозупчаника. Циклоредуктор је отпоран и на краткотрајна оптерећења (и до 500 %) без последица на елементе у спрези. Елементи циклоредуктора се израђују од квалитетних материјала. Током израде се врши строга контрола елемената. Радни век циклоредуктора је и до 20 година без озбиљних интервенција, у зависности од

тога да ли се контакт додирних површина профила остварује трењем клизања или трењем котрљања. У циклоредуктору нема аксијалних сила, а улазно и излазно вратило су коаксијални у свим варијантама. Због тога су нашли широку примену код машина и уређаја са великим габаритним ограничењима. Због самог налегања површина профила који се спрежу, јавља се велико трење. Због тога се у циклоредуктору препоручује подмазивање уљем или машћу, у зависности од радних услова. Препорука за количину уља је таква да уље буде у висини теменог пречника унутрашњег озубљеног сегмента како би током кретања унутрашњи циклозупчаник пренео подмазујуће средство по целој унутрашњости редуктора и обезбедио константно подмазивање у току рада. Кућиште редуктора је херметички затворен склоп. На једној страни поклопца постоји чеп који служи за испуштање уља из кућишта, док са горње стране кућишта постоји мали отвор који служи као одушак како не би дошло до промене притиска у кућишту што би могло да изазове одређене негативне последице. Циклоредуктор има веома велики радни век, с обзиром да је то један вид преносника снаге и кретања који трпи често велика оптерећења, честа укључивања и искључивања и има могућност брзог заустављања због великог и специфичног преносног односа. Највеће оптерећење трпе осовинице које носе централне и излазне ваљке. Оптерећене су на савијање и смицање. Израђују се од квалитетних челика за побољшање и траже велику тачност при изради. 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.

1.2.Принцип рада

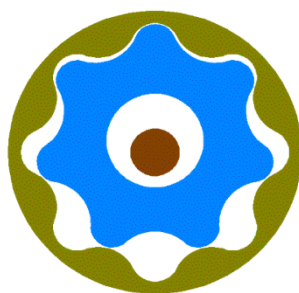
Основни елементи циклоредуктора су приказани на слици 1. За разлику од класичних механичких преносника који преносе снагу и кретање преко еволвентних зупчастих парова, циклоредуктори имају зупчанике са циклоидним озубљењем – циклозупчанике. На улазном вратилу (1) се налази ексцентар чаура (2) на којој су преко игличастих лежаја (3) ослоњени циклозупчаници (4). Они се спрежу са ваљцима (6) непокретног централног зупчаника (5). Кроз отворе у циклозупчаницима пролазе излазни ваљци (7) који су преко излазног диска (8) повезани са излазним вратилом (9) и на њега преносе резултујуће обртно кретање у смеру супротном од смера обртања улазног вратила. Због уравнотежавања динамичких сила и равномерне расподеле оптерећења, за један степен преноса се користе по два циклозупчаника међусобно заокренута за 180° .



Слика 1. Основни елементи циклоредуктора [2]

- 1- улазно вратило,
- 2- ексцентар чаура,
- 3- лежаји циклозупчаника,
- 4- циклозупчаници,
- 5- тело централног зупчаника,
- 6- ваљци централног зупчаника,
- 7- излазни ваљци,
- 8- излазни диск,
- 9- излазно вратило.

На слици 2 је приказана концепција циклоредуктора код које је трење котрљања замењено трењем клизања. Ова концепција је предмет истраживања у завршном раду.



Слика 2. Циклоредуктор са трењем клизања [3]

1.3.Предности и мане циклоредуктора

Циклоредуктори као нови механички преносници снаге све чешће проналазе примену у савременој индустрији. Као и сви други преносници, и они имају своје предности и недостатке. Недостаци циклоредуктора су захтевана велика прецизност израде, што и јесте највећи проблем при пројектовању једног оваквог редуктора. Неки од недостатака се могу уочити и отклонити у фази пројектовања коришћењем савремених PLM софтвера. Међутим, одређени недостатци се примећују тек у фази израде и монтаже (квалитет материјала, квалитет и прецизност израде, технологија израде елемената редуктора као и многи други фактори). Сваки мањи недостатак може значајно да смањи степен искоришћења и повећа губитке у редуктору. Отпори у преноснику морају да буду сведени на минимум како би се елиминисало непотребно радијално оптерећење елемената циклоредуктора. Саосност улазног и излазног вратила као и осталих елемената утиче на миран и бешуман рад преносника. Недостатак циклоредуктора је такође што овакви типови редуктора нису још увек довољно истражени и испитани за конкретне потребе индустрије. Један од недостатака је и скупа израда главних елемената редуктора (циклозупчаника). За профил зупца циклозупчаника најчешће се користи еквидистанта скраћене епитрохоиде [2]. За израду оваквог геометријског облика неопходно је коришћење савремених CNC глодалица или обрадних центара што знатно утиче на повећање трошкова израде.

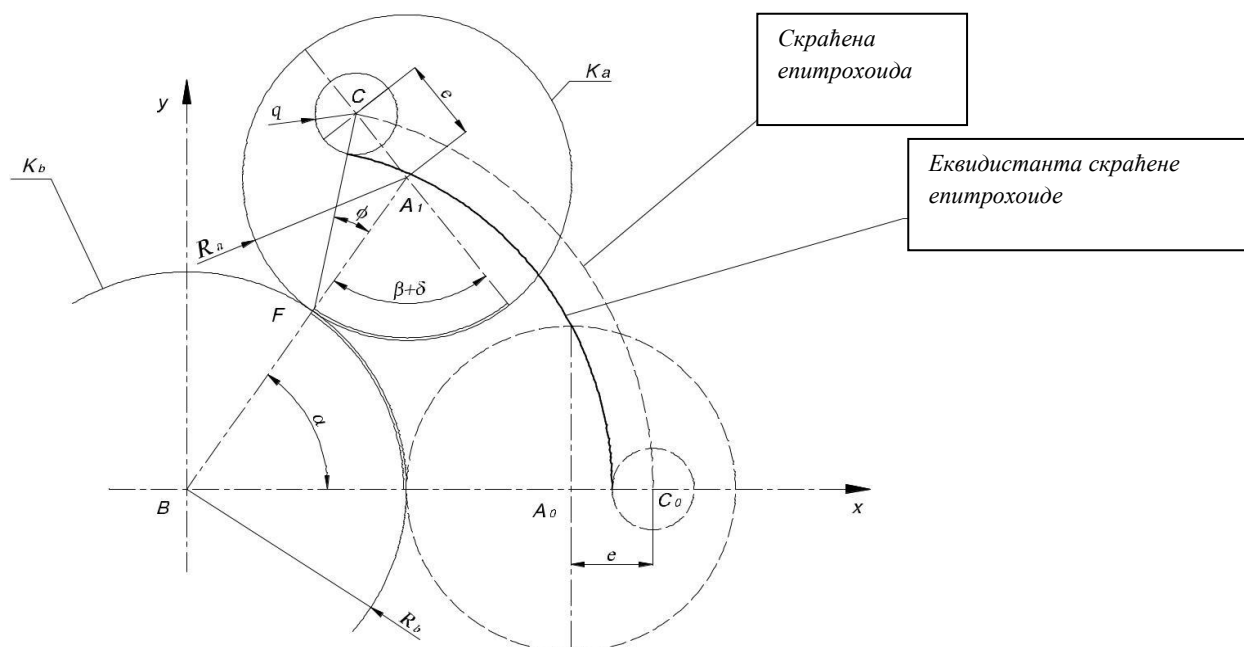
Поред недостатака, циклоредуктори имају и велики број предности у односу на класичне зупчасте редукторе. Циклоредуктори, захваљујући својој концепцији и начину рада, могу да остваре веома велике преносне односе. Преносни однос циклоредуктора једнак је броју зубаца циклозупчаника. Велика предност циклоредуктора је и то што могу да поуздано раде у веома прменљивим радним условима. Такође, могу да апсорбују екстремна оптерећења која се јављају периодично. Конструкција редуктора није компликована. Кућиште није великих габарита и цео склоп је у принципу компактан како за пренос и монтажу тако и за склапање и израду. Циклоредуктор обезбеђује константан преносни однос, без буке и вибрација. Имају висок степен искоришћења и као такви веома су повољни за примену у савременој индустрији. Њихова поузданост је велика, као и век трајања. Уз препоручено одржавање циклоредуктор може издржати велики број радних часова. Под одржавањем се подразумева промена средства за подмазивање и замена котрљајних лејаја према препоруци произвођача.

1.4.Начин генерисања профила зупца циклозупчаника

Основни геометријски облик за конструисање профила зупца циклозупчаника је трохоида [2]. Она представља криву линију из фамилије циклоида коју описује тачка везана за котрљајућу кружницу на удаљености e (величина ексцентрицитета) од центра поменуте кружнице, при њеном котрљању без клизања по обиму основне кружнице, слика 3. У зависности од тога да ли се котрљајућа кружница котрља са спољашње или унутрашње стране, разликују се епитрохоиде и хипотрохоиде. Ако је растојање e веће од полупречника котрљајуће кружнице R_a , трохоида је продужена, а у супротном трохоида је скраћена [2].

Једначина еквидистанте скраћене епитрохоиде

Еквидистанта скраћене епитрохоиде се најчешће користи као профил зупца циклозупчаника. Начин њеног генерисања је приказан на слици 3.



Слика 3. Генерисање еквидистанте скраћене епитрохоиде [2]

Једначине еквидистанте скраћене епитрохоиде имају облик:

$$x = (R_b + R_a) \cos \alpha + e \cos(\alpha + \beta) - q \cos(\alpha + \varphi) \quad (1)$$

$$y = (R_b + R_a) \sin \alpha + e \sin(\alpha + \beta) - q \sin(\alpha + \varphi) \quad (2)$$

где је:

R_b – полупречник основне (непокретне) кружнице,

R_a – полупречник котрљајуће кружнице,

α – угао међусобног положаја почетне и тренутне тачке додира основне и котрљајуће кружнице у односу на центар основне кружнице,

e – величина ексцентрицитета,

β – угао заокретања котрљајуће кружнице,
 q – еквидистантно растојање,
 φ – помоћни угао.

Помоћни угао φ се израчунава као:

$$tg\varphi = \frac{\sin\beta}{\frac{Ra}{e} + \cos\beta} \quad (3)$$

Убацивањем израза за израчунавање угла φ у почетне једначине, долази се до *коначног облика једначина еквидистанте скраћене епитрохоиде*:

$$x = (Rb + Ra) \cos \alpha + e \cos(\alpha + \beta) - q \cos(\alpha + \varphi) \quad (4)$$

$$y = (Rb + Ra) \sin \alpha + e \sin(\alpha + \beta) - q \sin(\alpha + \varphi) \quad (5)$$

2. Моделирање једностепеног циклоредуктора

У оквиру овог завршног рада прво је извршено моделирање, а затим и израда једног једностепеног циклоредуктора посебне концепције где је трење котрљања замењено трењем клизања.

Полазни подаци пројектованог циклоредуктора су:

Снага: 0,25kW,

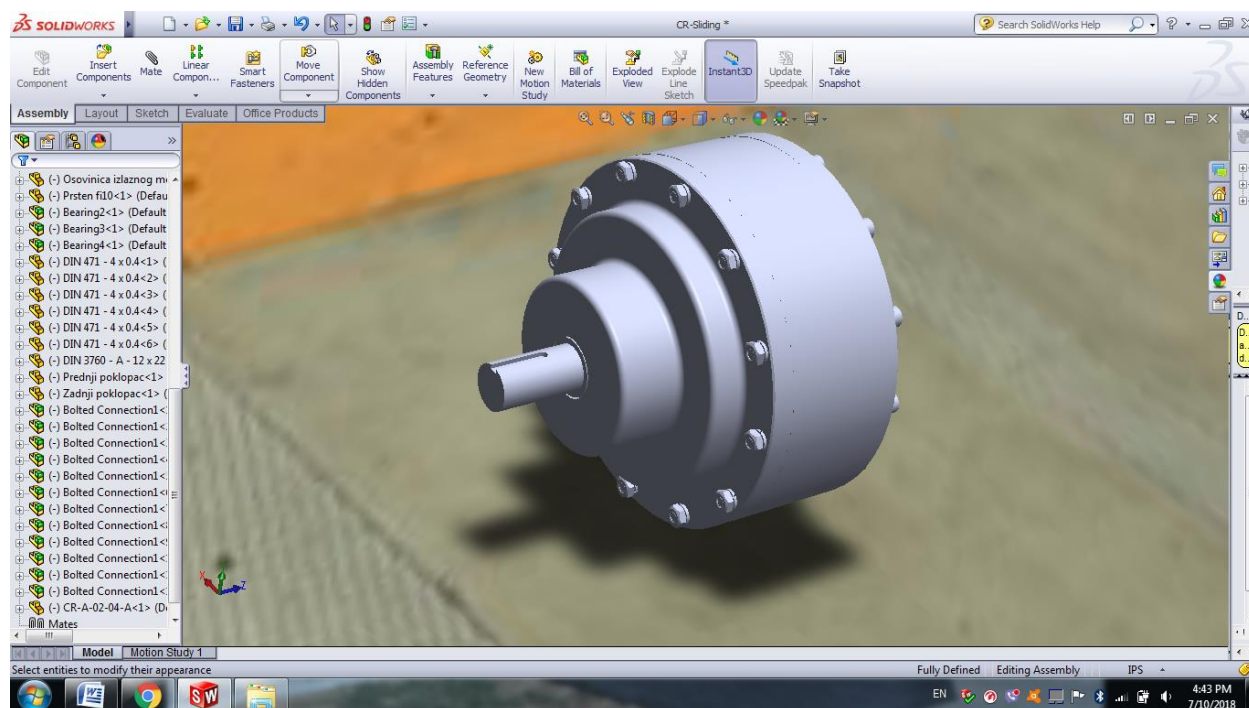
Улазни број обртаја: 900 min^{-1}

Пречник циклозупчаника: $\varnothing 88\text{mm}$

Спољашњи пречник кућишта циклоредуктора: $\varnothing 125 \text{ mm}$

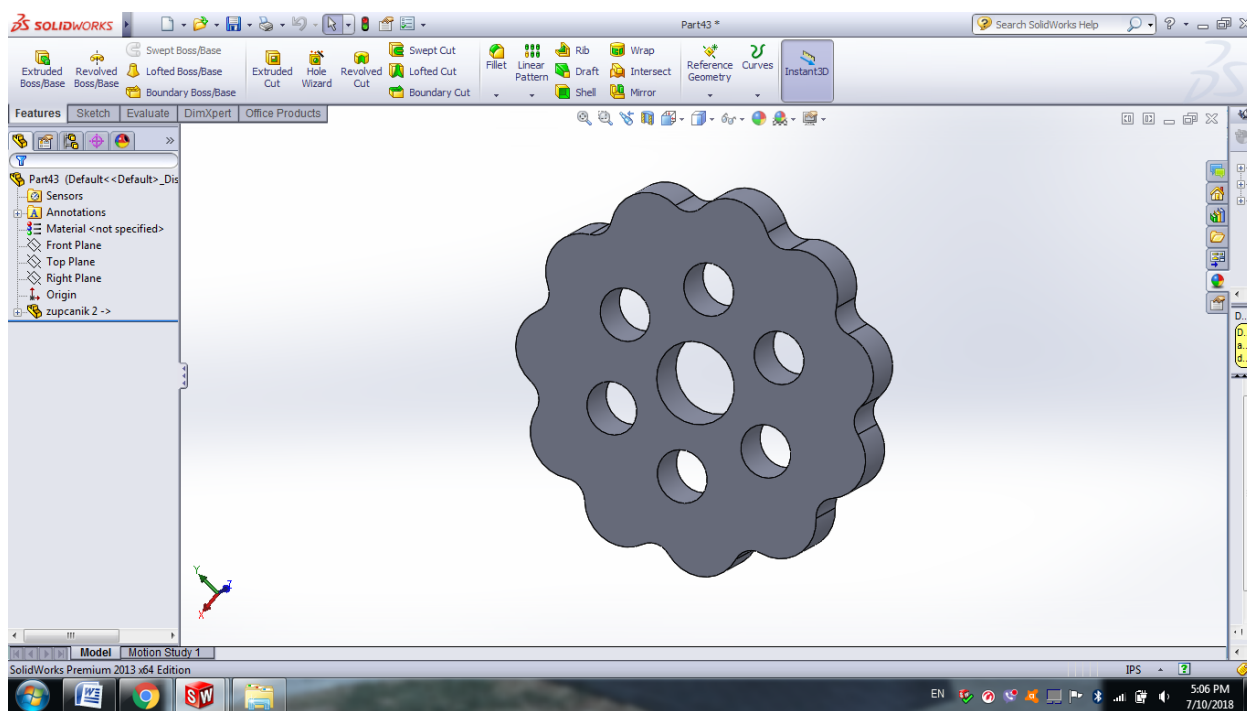
Средство за подмазивање: уље

Моделирање представља процес креирања гаметријске презентације неког тродимензионалног објекта. Да би моделирање било реализовано, потребан је рачунарски софтвер за моделирање. Данас се могу наћи различити типови софтвера који су по свом радном окружењу веома слични за рад. Моделирање једностепеног циклоредуктора, склапање елемената и израда цртежа је извршена у PLM софтверу *SolidWorks*, слика 4. Овај софтвер омогућава да се на брз и лак начин дође до жељеног геометријског облика. Има такође огромне предности у односу на класично техничко цртање. У сваком тренутку дозвољава различите видове исправки и што је најважније, упозорава на грешке приликом цртања скице као и склапања елемената у *Assembly design* окружењу.



Слика 4. Радно окружење у софтверу *SolidWorks*

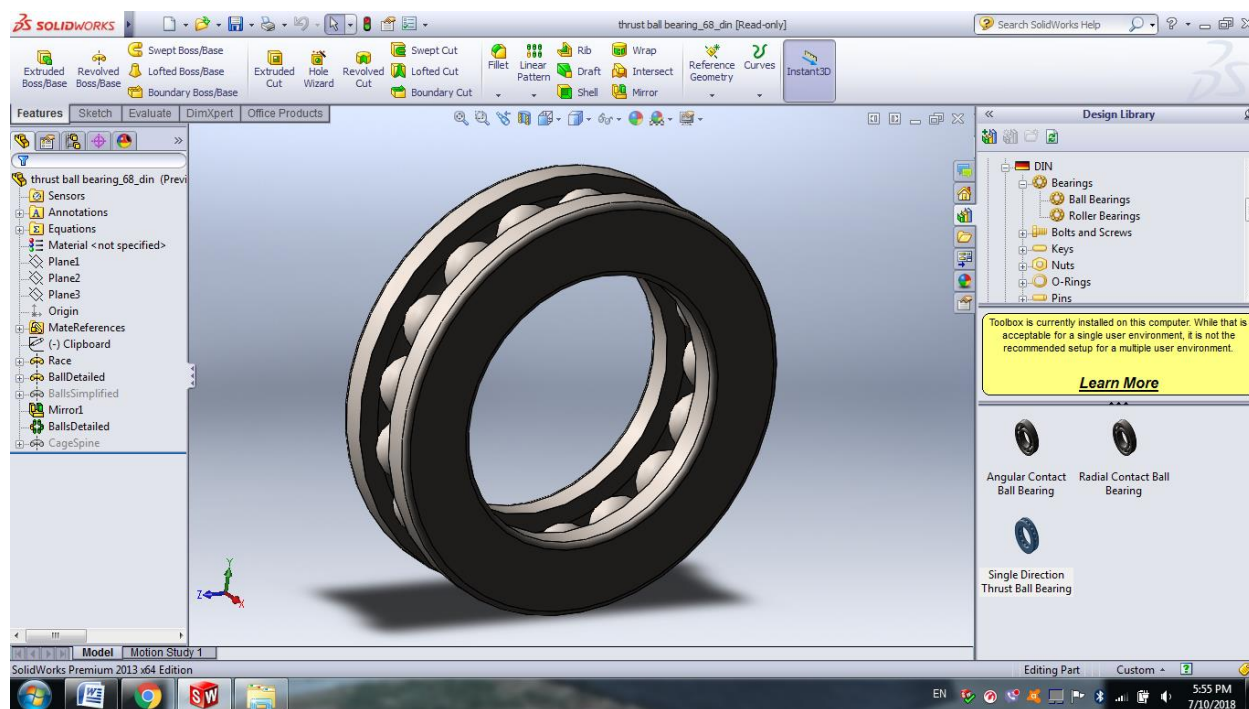
Софтвери за компјутерско конструисање су веома поуздани за рад што се тиче тачности приказа, размера, као и геометријских облика. До модела се долази од једноставних свакодневних облика као што су лопта, купа, коцка и слично. Затим се врши надоградња њихових површина у зависности од потреба. То може бити бушење, обарање ивица, извлачење конуса, упуштање, као и многе друге операције. Софтвери имају велики број стандардних алата за добијање сложеније геометрије. Модел добијен у оваквим софтверима ће увек бити верна слика реалног производа. Поред тога што обезбеђују велику геометријску тачност, софтвери нуде и разне друге могућности што се тиче напонских, термичких и осталих анализа. Код оваквих испитивања највећи акценат се ставља на методу коначних елемената, која приказује како ће се измоделирани склоп или припремак понашати услед излагања разноврсним оптерећењима која се јављају у току рада. На слици 5 је приказан генерисани циклозупчаник пројектованог циклоредуктора.



Слика 5. 3D Модел циклозупчаника

Коришћење софтвера за пројектовање знатно је олакшало посао конструисања (нема поновног цртања свих делова после сваке измене и све конструкцијске интерације које су одрађене се чувају). Софтвер обавештава о свакој неравномерности и неусаглашености између делова и њихових преклапања. Овакав вид моделирања подразумева да се будући производ и његови делови креирају, приказују и памте као просторни (запремински) објекти, што они уствари и јесу. Такав моделирани просторни објекат има све потребне информације за израду, прорачун, израду симулација и анализу [4]. Модел урађен у софтверу *SolidWorks* (или неком другом PLM софтверу) може се искористити за CAE (computer aided engineering) анализу.

Поред основних палета алата за израду модела, *SolidWorks* поседује и своју базу стандардних елемената за најзначајније међународне стандарде. То убрзава процес моделирања самог склопа, јер нема потребе за израдом модела елемената који су стандардизовани, а има их на тржишту. Они се усвајају према параметрима и особинама које су потребне моделу на датој позицији. Стандардни елементи у бази имају исте ознаке као и елементи који се могу наћи на тржишту. Како се домаћи стандард у највећој мери поклапа са немачким DIN стандардом, током моделирања циклоредуктора усвојени су стандардни модели кугличних лежајева, спољашњих и унутрашњих ускочника, вијака са наврткама и заптивке према DIN стандарду. На слици 6 приказан је начин генерисања котрљајног лежаја.

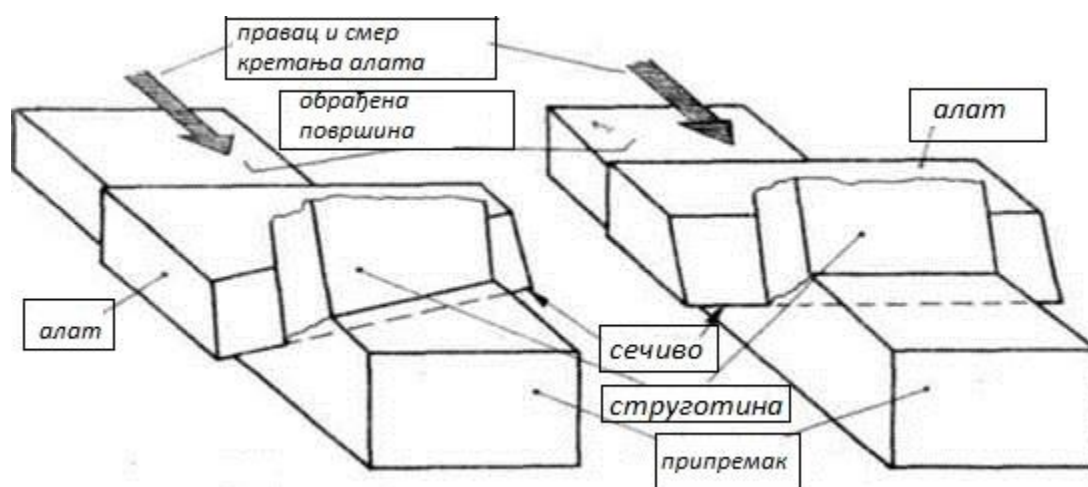


Слика 6. Усвајање стандардног лежаја из базе стандардних елемената

Поред базе стандардних елемената, на интернету се могу пронаћи каталози CAD модела скоро свих машинских елемената, погонских система и др. разних произвођача. Њих издају компаније које производе делове, па се код конструисања сложених постројења могу користити готови модели разних врста пумпи, мотора, цилиндара, спојница, кочница,...

3. Израда циклоредуктора

Сви елементи циклоредуктора су израђени технологијом обраде резањем. Резање је процес који се састоји у продирању резног алата у материјал, слика 7. У пракси се разликује косо и ортогонално резање. Резање се обавља при строго одређеној кинематици релативног кретања између алата и припремка, где се дефинишу главно и помоћно кретање. Главно кретање одређује брзину кретања, а изводе га или алат или припремак. Оно може бити кружно или праволинијско. Помоћно кретање такође може бити кружно или праволинијско. Главно и помоћно кретање у одређеној кинематици кретања алата и припремка дефинишу метод обраде. Један метод обраде може имати само једно главно или једно или више помоћних кретања [5].



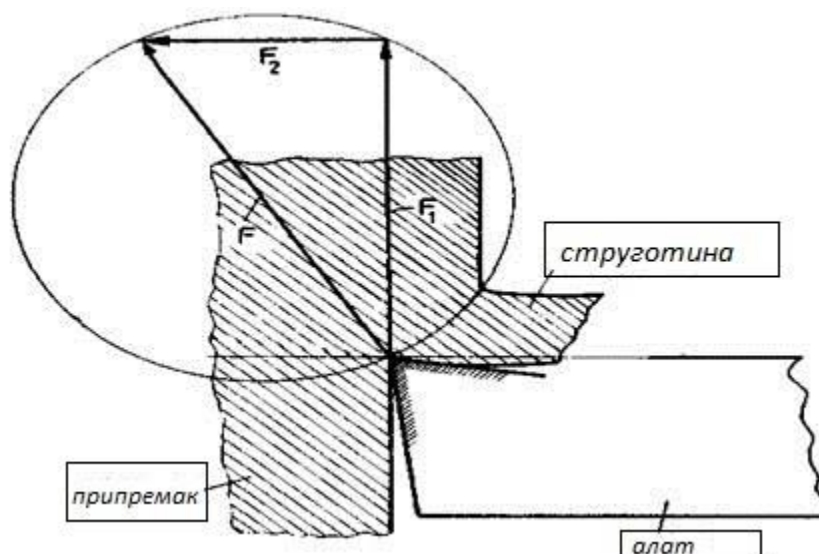
Слика 7. Технологија обраде резањем [5]

Методе обраде резањем су:

- стругање,
- рендисање,
- брушење,
- глодање,
- бушење.

Када алат делује на материјал припремка који скида, прво га еластично деформише, а затим и пластично, и тада у једној локалној зони, зони резања, долази до формирања струготине. Фактори који утичу на ток процеса резања резултују се преко два основна фактора, а то су брзина резања и сила резања. Векторски план брзина у зони резања чине три брзине: брзина резања, брзина смицања струготине и брзина кретања струготине по површини алата. Резни клин алата продире у материјал припремка под дејством механичке силе резања. Сила које је по интензитету и правцу једнака сили резања, а супротног је смера и оптерећује резни клин алата назива се отпор резању [5]. На слици 8

приказан је упрошћени модел сила резања, које се појављују при ортогоналном резању. Сила F као резултанта се може разложити на две међусобно нормалне компоненте. У овом случају узима се правац брзине резања и одговарајући нормални правац, тј. правац нормалан на обрађену површину.



Слика 8. Распоред сила при процесу резања [5]

У зависности од механизма и карактера образовања струготине, формира се струготина различитог облика и типа. Облик и тип струготине зависе од врсте физичко-механичких особина материјала предмета обраде. Струготина се може поделити у 4 основна типа:

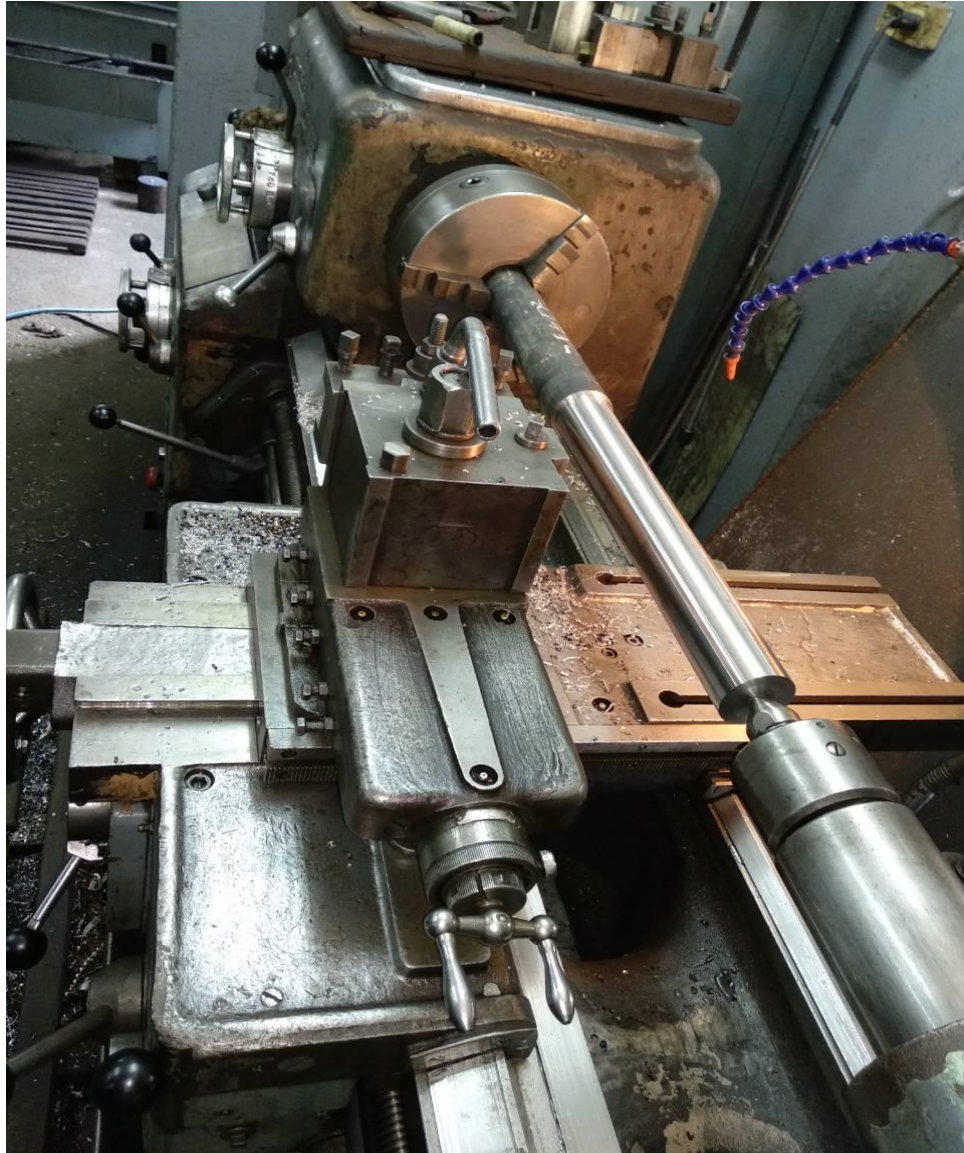
- Прекидна,
- Непрекидна,
- Непрекидна у условима појаве наслаг
- Ламиларна.

У зони резања, као последица отпора резног клина при продирању у материјал, јавља се топлота. Топлота утиче на формирање струготине, квалитет обраде материјала, радни век алата ... Више од 99% механичке енергије се при резању претвара у топлоту. Највећи део генерисане топлоте се одводи струготином. Код малих брзина резања количина генерисане топлоте која се одводи струготином и предметом обраде је приближно иста. Са повећањем брзине резања, смањује се количина топлоте која се одводи предметом обраде и алатом. Да би се повећао квалитет обрађене површине, а уједно и смањила температура резања и повећао радни век алата, користе се расхладна средства у виду уља и емулзија. Расхладна средства се доводе или преко црева тако да млаз течности пада директно на површину између резног клина и алата, или постоје канали у самом резном алату тако да путем њих течност стиже у зону резања [5]. Коришћење одговарајућег расхладног средства је веома битно код резања. Код стругања и грубог глодања користе се емулзије. Код назубљивања и прецизних израда профила се користе уља. Током израде

циклоредуктора кружни делови су добијени технологијом обраде стругањем. Стругање је поступак обраде првенствено ротационих делова (вијака, осовина, чаура, ременица...), слика 9. Остварује се тако што предмет обраде врши главно, ротационо кретање, док алат врши помоћно праволинијско кретање. Разликује се попречно и уздужно стругање, слика 10. Производне операције се код стругања могу поделити на грубе и фине. Када су дубине резања велике онда се ради о грубим операцијама, а када су дубине знатно мање онда је реч о фином резању. Финим резањем се добија готова мера у задатим толеранцијама. Сви елементи циклоредуктора који су специјалног облика (зупци циклозупчаника, контуре, распоређени отвори, жлебови за клин...) су добијени глодањем. Главно кретање код глодања врши алат, и то је обртно кретање. Технологија обраде резањем се састоји од операција, захвата и подоперација. У операцију спадају све радње и обраде које се врше непрекидно на једном или више припремака, у оквиру једног радног места са једном припремом машине. Захват представља једновременно дејство једног или више алата на једну или више површина које се обрађују при непромењеном режиму обраде. Подоперација представља један положај предмета обраде у односу на машину и стезни алат.



Слика 9. Обрада ротора стругањем



Слика 10. Операција уздужног стругања

3.1. Спецификација машина на којима је вршена обрада

Израда делова циклоредуктора је вршена на већем броју универзалних и нумеричких машина. У овом поглављу су дате њихове основне радне карактеристике.

3.1.1. Универзални струг Потисје Морандо РА-22

Универзални стругови су намењени како серијској тако и појединачној производњи. Струг *Потисје Морандо* је израђен према италијанској лиценци, слика 11. Карактеристике га добра стабилност при обради комада великих габарита, као и прецизност у постизању захтеваних толеранција. Погон главног кретања (стезне главе) врши се преко електромотора који је ламелама повезан са мењачким делом машине. Погон помоћног кретања се остварује преко дводелне чауре са унутрашњим трапезним навојем (резање навоја), и осовине са каналом за клин целом својом дужином (уздужна и попречна обрада). Машина је опремљена пумпом за емулзију која се користи у току обраде. Произведен је 1987. године и радне карактеристике су му:

- Снага мотора: 4 kW,
- Радна дужина: 1500 mm,
- Отвор кроз вретено: 62 mm,
- Распон радних брзина: 20-2400 min⁻¹.



Слика 11. Универзални струг РА-22

3.1.2. Универзални струг Првوماјска TNP-200B

Стругови са ознаком TNP спадају у брзорadne стругове који имају велике радне дужине и мање стезне главе, слика 12. Производили су се у Загребу (Хрватска), у фабрици „Првوماјска,, која се бавила конкретно израдом делова за машине, склапањем машина, и ремонтом истих. Модел TNP-200B има добре особине што се тиче прецизности израде комада малих димензија. На његовом електромотору, на месту између кућишта и вентилатора се налази електромагнетна кочница, која омогућава брзо заустављање. Управљање главним кретањем се не врши преко полуге квачила, већ преко палице. На палици постоје 4 положаја. Централни је наутрални положај са укљученом електромагнетном кочницом, горњи и доњи положаји су два различита смера окретања стезне главе, док палица окренута на лево значи да је електромагнетна кочница искључена. Поред задњег ослонца (стопе) струга, са своје доње стране постоји корито за струготину, испод кога се налази простор за емулзију, док се пумпа налази са задње стране струга. Струг је произведен 1989.године и има следеће радне карактеристике:

- Снага електромотора: 3 kW,
- Радна дужина: 2000 mm,
- Отвор кроз вретено: 52 mm,
- Распон радних брзина: 40-1800 min⁻¹.



Слика 12. Универзални струг Првوماјска TNP-200B

3.1.3. Универзални струг Првوماјска NILES TNP-300

Овај модел струга припада ранијим генерацијама стругова и он служи за обраду комада великих габарита, слика 13. Растојање од центра стезне главе до врха линијала му омогућава да стегне пречник и до 650 mm. Произведен је у Загребу по лиценци немачке компаније *Niles*. Он је специфичан јер његова стезна глава нема класичну завојницу која стеже пакнове већ специјално назубљену летву и пакнове тако да обезбеђује подешавање њиховог положаја без вађења. Његове радне карактеристике су:

- Снага електромотора: 3.5 kW,
- Радна дужина: 1000 mm,
- Отвор кроз вретено: 62 mm,
- Распон радних брзина: 10-1400 min⁻¹.



Слика 13. Универзални струг Првوماјска TNP-300 NILES

3.1.4. Универзална глодалица Првомајска ALG-200

Ова глодалица је једна од најзаступљенијих универзалних глодалица у Србији. Користе је већином алатнице како за серијску тако и за појединачну производњу, слика 14. Произведена је у фабрици алатних машина „Првомајска„ у Загребу и њен рад карактерише велика стабилност и прецизност. Глодалице типа ALG имају одређене модификације, што већина других глодалица нема, а то је покретна пинола која носи алат, тако да глодалица у некој мери може имати и улогу бушилице. Једна од најбитнијих ствари којом је у некој мери и убрзан и упрошћен рад на оваквој машини је то што се ручице команди за све три осе налазе на истој страни, тако да радник не мора да се креће око радног стола глодалице како би померао сваку осу појединачно. Исто је и код ручица промена брзина главног и помоћног кретања. Глодалица има вертикално и хоризонтално вретено у склопу свог кућишта, корито и пумпу за емулзију. Такође глодалица има вертикални и хоризонтални радни сто. Хоризонтални радни сто је демонтажан и он се монтира на вертикални радни сто по потреби. Произведена је 1982. године и њене радне карактеристике су:

- Снага електромотора: 2.4 kW,
- Радни габарити: 200x400x300 mm.



Слика 14. Универзална глодалица Првомајска ALG-200

3.1.5. Универзална глодалица

Оваква глодалица се користи за грубо глодање, код глодања неправилно израђених припремака, глодања на предмеру и свих глодања која стварају велику буку и вибрације, слика 15. Фабрички, глодалица је имала само хоризонтално вретено, али због потребе и обима посла урађена је модификација и за вертикално вретено. Направљен је ланчани преносник који погон са хоризонталног вретена пребацује на вратило вертикалног вретена. Глава носача алата се заокреће до 90° у оба смера и демонтажна је. Глодалица фабрички није имала пумпу за емулзију али је накнадно направљено екстерно корито са пумпом на врху поклопца. Глодалица има следеће радне карактеристике:

- Снага електромотора: 3 kW,
- Радни габарити: 200x300x350 mm.



Слика 15. Универзална глодалица

Поред класичниог стезног алата који се користи за време обраде глодањем, користе се и подеони апарати и планске плоче. На слици 16 приказан је вертикални подеони апарат. Његов преноси однос износи 90:1 и користи се за глодање у вертикалној равни. Погодан је за израду ланчаника већих димензија као што су ланчаници за тракторска витла и галови ланчаници за пекарске транспортере (слика 17).



Слика 16. Бушење отвора у вертикалном подеоном апарату



Слика 17. Велики ланчани преносници

3.1.6. Универзална стубна бушилица Далмастрој МК-4

Оваква бушилица има велике предности што се тиче серијског резања навоја машинским урезницама. Има променљив смер обртања алата и посмак при бушењу, слика 18. Велика стопа на коју се ослања даје јој велику стабилност, а два радна стола од којих је један демонтажан обезбеђују обраду комада великих габарита. Алат са целим кућиштем мењача и радни сто су покретни, а померање се врши преко зупчасте летве и фиксатора. Бушилица има лењир са граничником где се може подесити дубина бушења. Бушилица има следеће радне карактеристике:

- Снага електромотора: 2.6 kW,
- Радни габарити: 500x1000x1500 mm,
- Морзе конус: 4.



Слика 18. Универзална стубна бушилица са аутоматским посмаком

3.1.7. CNC глодалица Mori Seiki NV5000

Ова глодалица је јапанске производње, светски познате компаније *Mori Seiki*, која се бави производњом CNC машина. Позната је по томе што је веома прецизна и приступачна за програмирање на самој машини, а исто тако и читање програма, слика 19. Она је коришћена за израду спољашњег и унутрашњег озубљења (циклозупчаника и озубљеног венца), јер прецизна геометрија коју захтевају циклоредуктори за конкретно ове елементе не би била постигнута на универзалним машинама. Њени радни габарити су 1200x700x700mm.



Слика 19. CNC глодалица Mori Seiki NV5000

3.1.8. Округла брусилца

На округлој брусилци су добијене толерисане мере најважнијих делова циклоредуктора. Оваква брусилца може да врши само округло унутрашње и спољашње брушење радних делова, слика 20. Брусилца је произведена 1977. године и њене радне карактеристике су:

- Снага електромотора: 5,5 kW,
- Радни габарити: 200x1000 mm,
- Пречник тоцила: 600 mm.



Слика 20. Брусилаца за округло брушење

3.1.9. Универзална линијска тестера за сечење материјала

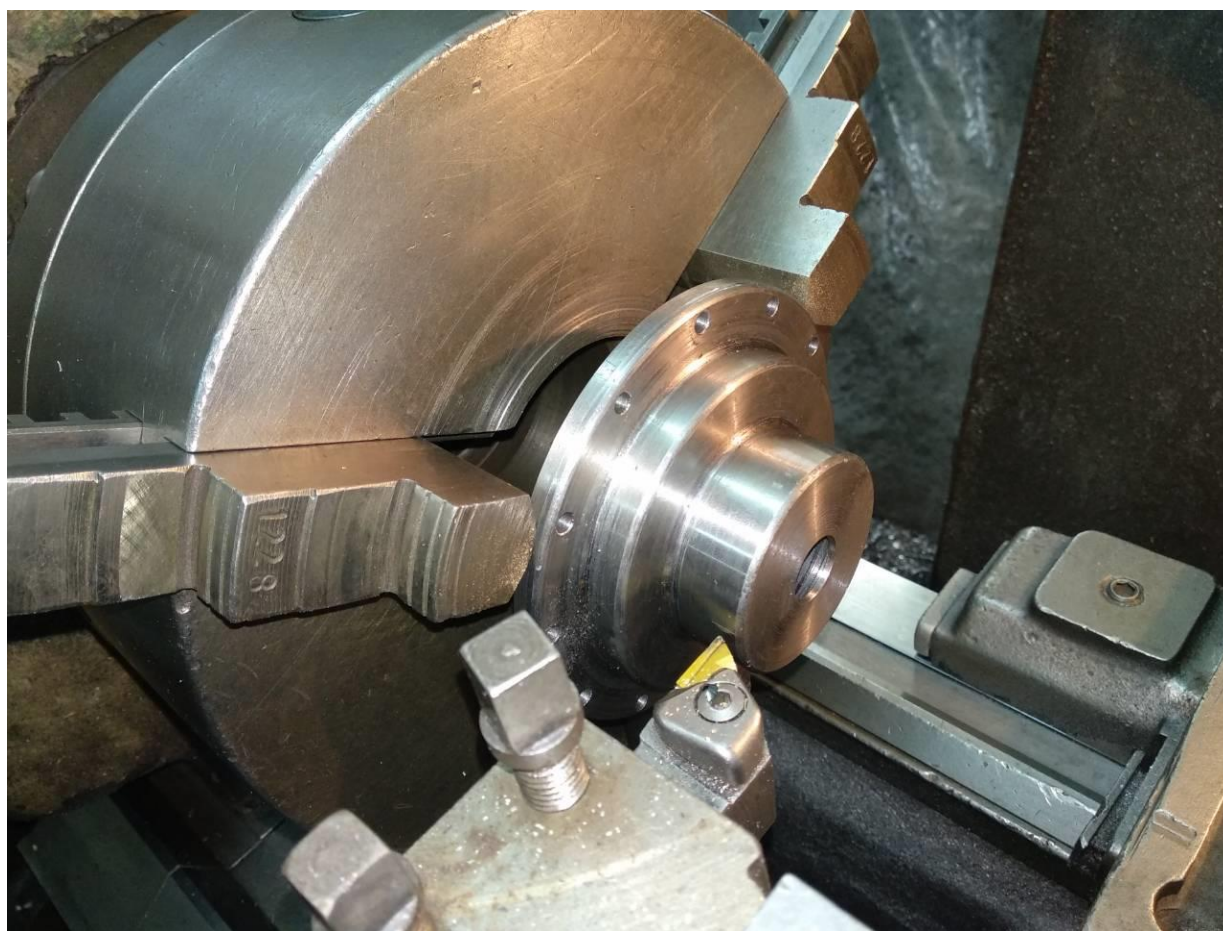
Сваки комад припремка мора да има одговарајуће димензије са додацима за обраду. Материјал се узима од шипки одговарајућег пречника које се затим секу на одређену меру. Тестера је произведена 1988. године и може да пресече комаде до 800 mm, слика 21.



Слика 21. Универзална линијска тестера за сечење материјала

4. Опис израде елемената циклоредуктора

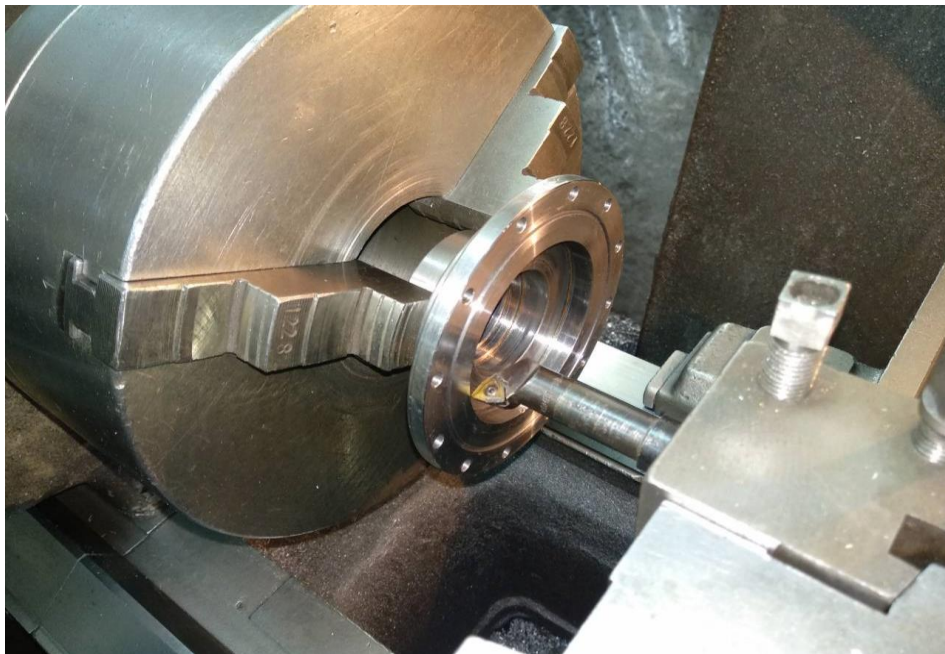
За израду циклозупчаника, кућишта и ваљака коришћен је челик за побољшање 42CrMo4, док је за све остале елементе коришћен челик 1C45. Прво је направљено тело кућишта, затим и оба поклопа са отворима за лежај, заптивни елементи и излазно вратило. Наведени елементи циклоредуктора су добијени стругањем. На сликама 22 и 23 је приказана обрада поклопаца стругарским ножем за равнање чеоне површине са углом оштрице од 45°. На слици 24 је приказана обрада рупе стругарским ножем за рупу са променљивом крукс плочицом. На исти начин су добијени сви остали унутрашњи пречници (за лежај, заптивне елементе и излаз вратила). Све спољашње мере и мере отвора су добијене истим режимом обраде.



Слика 22. Уздужна обрада стругањем



Слика 23. Чеона обрада стругањем



Слика 24. Обрада рупе стругарским ножем

На слици 25 је приказана израда погонског вратила. Обзиром да његова дужина није занемарљива, постојала је опасност да у току његове израде дође до појаве вибрација које негативно утичу на саосност и толеранцију по целој дужини, а то су најважнији детаљи код елемената циклоредуктора. Због тога су са са чеоних страна вратила забушивачем формирана гнезда у која касније упадају шиљци чија је улога формирање крутог ослонаца.



Слика 25. Израда погонског вратила

Како ексцентар није саосни геометријски елемент, за његову израду је направљен посебан алат, тј. плоча са отвором који одговара пречнику припремке. Тај отвор је изведен из центра тако да одговара цртежу ексцентра. Плоча на себи има канал у коме се налази клин са отвором и подесив је за фиксирање (слика 26).



Слика 26. Обрада ексцентра у посебном алату

У алату приказаном на слици 26 обрађене су обе површине ексцентри на тачну меру за лежај, а такође је у истом алату пробушен и отвор. За израду ексцентри је коришћен нешто спорији режим обраде са добрим хлађењем, јер стругарски нож током обраде није константно у контакту са комадом припремка, већ његова резна ивица скида слој материјала периодично током окретања. На излазне осовинице осовине су након обраде истих навучени излазни ваљци који су претходно нитрирани, и осигурани спољашњим ускочницима. Овим је завршен цео склоп излазног, гоњеног вратила (слика 27).



Слика 27. Склоп излазног вратила

Циклозупчаници су добијени израдом на CNC глодалици на основу претходно урађених CAD модела, слика 28. CNC машине имају предност над универзалним машинама јер могу да изводе сложенију геометрију у току обраде, док универзалне машине прецизно могу да обраде искључиво модуларне зупчасте профиле. Тачност CNC машина је неупоредиво већа док је време израде знатно мање. Код овакве обраде људски фактор замора и грешке при изради је сведен на минимум.



Слика 28. Израђени циклозупчаник

На слици 29 је приказано унутрашње циклоидно озубљење, а на слици 30 сви направљени елементи циклоредуктора.

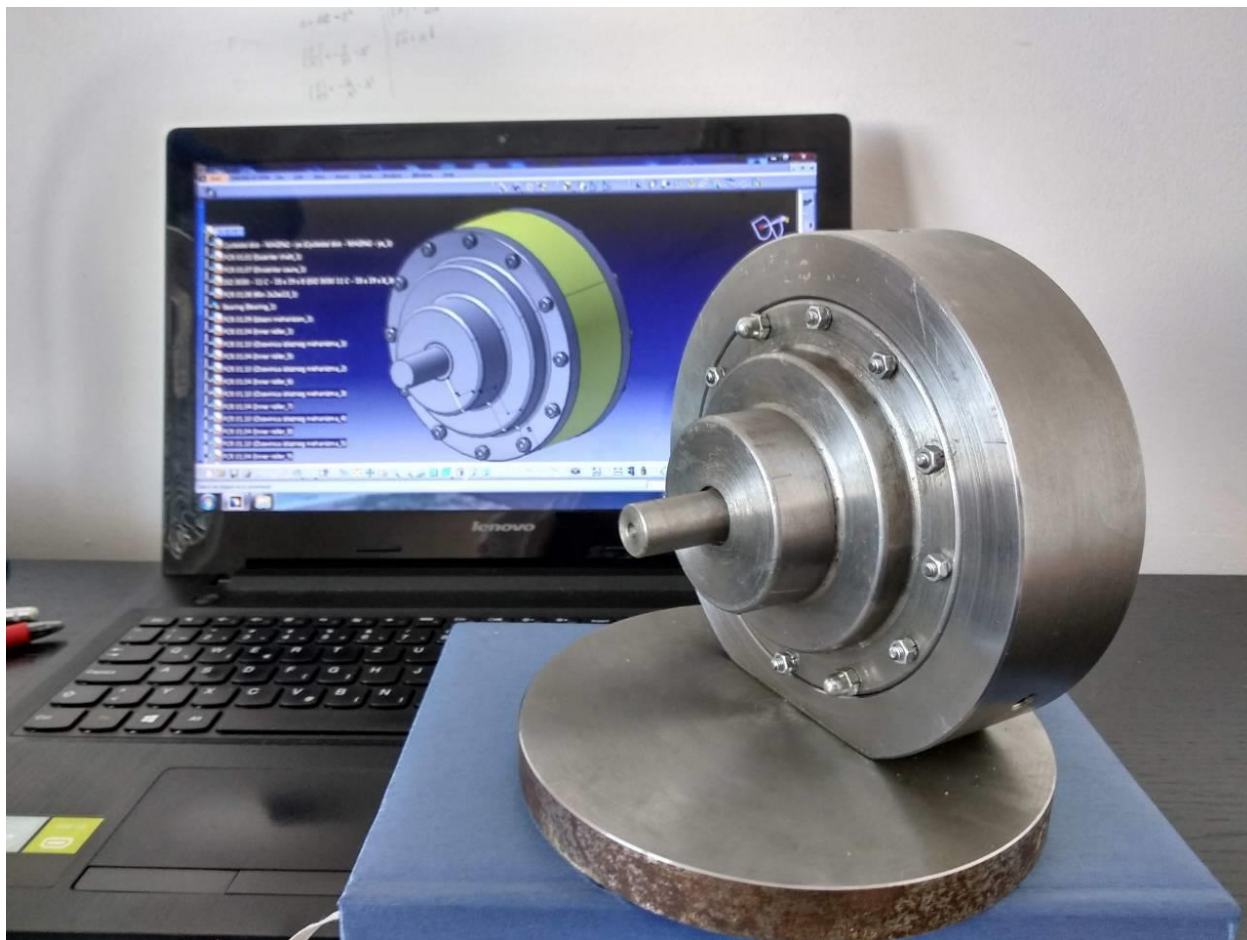


Слика 29. Унутрашње озубљење циклоредуктора



Слика 30. Направљени елементи циклоредуктора

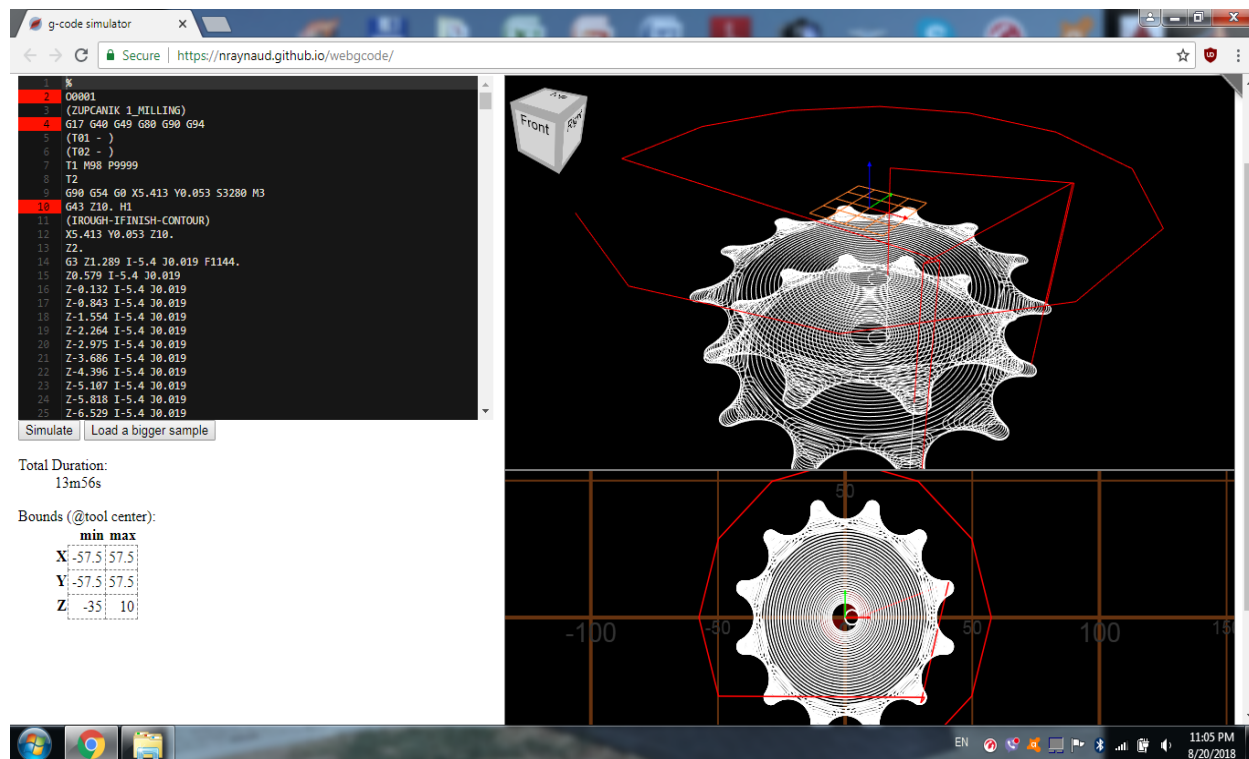
После израде свих елемената циклоредуктора и набавке стандардних елемената, извршена је монтажа. 3D модел циклоредуктора као и направљени циклоредуктор су приказани на слици 31.



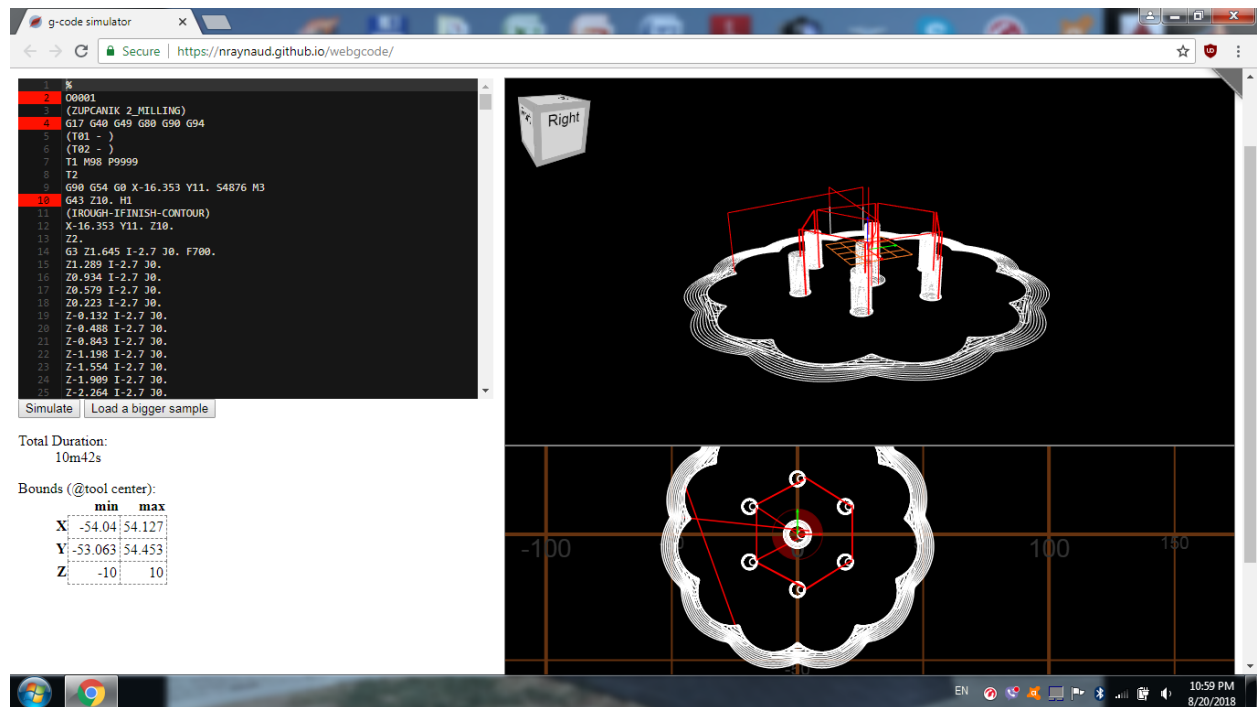
Слика 31. 3D модел циклоредуктора и његов физички модел

5. G код циклоидног озубљења

За израду главних елемената циклоредуктора било је потребно направити програм обраде припремака на CNC глодалици (G-код). Целокупни програм за израду једног циклозупчаника се састоји из пар хиљада речи. На сликама 32 и 33 је приказана путања кретања алата као и код.



Слика 32. Симулација обраде и код унутрашњег циклоидног озубљења



Слика 33. Симулација обраде и код циклзупчаника

6. Закључак

Циклоредуктори припадају новијој генерацији механичких преносника снаге. Уместо еволвентних зупчаника, користе се зупчаници са циклоидним профилем—циклозупчаници.

У оквиру овог завршног рада прво је за конкретне полазне податке у софтверу *SolidWorks* извршено моделирање овог веома сложеног преносника снаге. Затим је, коришћењем универзалних и нумеричких машина, направљен циклоредуктор.

Концепција циклоредуктора која је разматрана у оквиру овог завршног рада се разликује од стандардне концепције. Наиме, уместо централних ваљака непокретног централног зупчаника направљен је сегмент са унутрашњим циклоидним озубљењем и на тај начин је треће котрљања замењено трењем клизања.

У наредном раду потребно је испитати како се ова концепција понаша у погледу степена искоришћења, као и динамичке стабилности рада циклоредуктора.

7. Литература

3. Б.Стојановић, М. Благојевић: Механички преносници, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2015;
4. М. Благојевић: Кинематичка и динамичка анализа једностепеног циклоредуктора, Магистарска теза, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003;
5. www.cyberspaceandtime.com/24/06/2018/(24.06.2018.);
6. М. Благојевић : Компјутерско моделирање и симулације машинских елемената и конструкција (скрипта), Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2018;
7. Б. Недић, М. Лазић: Производне технологије - обрада метала резањем, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2007.