

# UREĐAJ ZA KONTROLIRANO GENERIRANJE PUKOTINE

---

**Planinić, Nikola**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:759657>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-25**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**NIKOLA PLANINIĆ**

**ZAVRŠNI RAD**

**UREĐAJ ZA KONTROLIRANO GENERIRANJE  
PUKOTINE**

Split, ožujak, 2023.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Preddiplomski stručni studij Konstrukcijsko strojarstvo

**Predmet:** Izbor materijala

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Nikola Planinić

**Naslov rada:** Uređaj za kontrolirano generiranje pukotine

**Mentor:** Igor Gabrić, v.pred.

Split, ožujak 2023.

**REPUBLIKA HRVATSKA**  
**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**Sveučilišni odjel za stručne studije**

**Studij:** Konstruktivno strojarstvo  
**Predmet:** Izbor materijala  
**Nastavnik:** Igor Gabrić, v.pred.

## **ZADATAK**

**Kandidat:** Nikola Planinić

**Zadatak:** Uređaj za kontrolirano generiranje pukotine

U radu je potrebno:

- Uvodno se osvrnuti o metodi ispitivanja lomne žilavosti materijala i relevantnim standardima;
- Uvodno se osvrnuti o uređajima za kontrolirano generiranje pukotine za izradu epruveta za ispitivanje lomne žilavosti materijala;
- Metodičkim pristupom konstruirati uređaj za kontrolirano generiranje pukotine;
- Ponuditi minimalno dvije varijante;
- Prema ekonomskim i tehničkim kriterijima vrednovati varijante i odabrati najbolju varijantu;
- Izvršiti detaljnu konstrukcijsku razradu odabrane varijante (izbor materijala, proračun, dimenzioniranje, dizajn);
- Primjenom CAD programa izraditi sklopni nacrt i radioničke crteže;
- Iznijeti zaključke;
- Navesti literaturu i izvore podataka

## **Sažetak (Uređaj za kontrolirano generiranje pukotine)**

U uvodnom dijelu završnog rada dan je kratki opis metodologije ispitivanja lomne žilavosti, izgleda epruvete i naprave za generiranje pukotine na epruveti. U okviru zadatka izvršeno je metodičko konstruiranje proizvoda. Izvršena je konstrukcijska razrada uređaja za kontrolirano generiranje pukotine na epruveti za ispitivanje lomne žilavosti materijala. U svrhu izbora pogonskog motora, primjenom MS Excela izvršena je analiza potrebnog zakretnog momenta u funkciji broja okretaja. 3D model uređaja je nacrtan primjenom Autodesk Inventor programa te je izvršena modalna analiza postolja i podešavanje konstrukcije postolja kako bi se izbjegle pretjerane vibracije za vrijeme rada. Na koncu su izrađeni svi radionički i sklopni crteži potrebni za izradu uređaja.

Ključne riječi: generiranje pukotine, lomna žilavost, konstruiranje.

## **Abstract (A controlled crack generation device)**

In introduction of the final work a short description of fracture toughness testing methodology, the appearance of the specimen and device for the crack generation on the specimen is given. As part of the task, the methodical construction of the product. The design development of the device for controlled generation of crack was developed on the specimen for fracture toughness. For the purpose of choosing a drive motor, an analysis of the required torque as a function of the number of revolutions was performed using MS Excel. A 3D model of the device was drawn using Autodesk Inventor program, and adjustment of the stand construction was performed to avoid excessive vibrations during operation. At the end, all the workshop and circuit drawings necessary for the production of the device were created.

Keywords: generation of the crack, fatigue toughness, designing.

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1. Metode ispitivanja lomne žilavosti materijala.....	2
1.2. Uređaji za kontrolirano generiranje pukotina .....	4
2. METODIČKI RAZVOJ PREDMETA.....	7
2.1. Lista zahtjeva i želja .....	7
2.2. Funkcionalna struktura .....	9
2.3. Morfološka kutija .....	10
2.4. Opis varijanti .....	14
3. TEHNIČKO VREDNOVANJE VARIJANTI .....	16
4. EKONOMSKO VREDNOVANJE VARIJANTI .....	20
4.1. Ekonomsko vrednovanje prve varijante .....	20
4.2. Ekonomsko vrednovanje druge varijante .....	21
4.3. Ukupna tehnička i ekonomska dobrota prve varijante .....	24
4.4. Ukupna tehnička i ekonomska dobrota druge varijante .....	25
5. DETALJNA KONSTRUKCIJSKA RAZRADA.....	27
5.1. Izbor materijala.....	27
5.2. Proračun klina.....	30
5.3. Proračun opruge.....	30
5.4. Proračun elektromotora .....	33
5.5. Proračun vratila.....	35
5.6. Izbor ležajeva.....	42
5.7. Postolje .....	45
6. ZAKLJUČAK .....	47
7. Literatura .....	48
Prilozi .....	49

## Popis slika

SLIKA 1.1 - DIJAGRAM NAPREZANJA [1] .....	1
SLIKA 1.2 - EPRUVETE ZA ISPITIVANJE ŽILAVOSTI SA ZAREZIMA [8] .....	3
SLIKA 1.3 - CHARPY UREĐAJ ZA ISPITIVANJE ŽILAVOSTI [5] .....	4
SLIKA 1.4 - UREĐAJ ZA GENERIRANJE PUKOTINE [6] .....	5
SLIKA 1.5 - SHEMA S MEHANIZMOM UREĐAJA SA EPRUVETE ZA SAVOJNO OPTEREĆENJE[6] .....	5
SLIKA 1.6 - SHEMA UREĐAJA ZA GENERIRANJE PUKOTINE EPRUVETE ZA VLAČNO OPTEREĆENJE [6] .....	6
SLIKA 1.7 – EPRUVETE S GENERIRANOM PUKOTINOM ZA ISPITIVANJE LOMNE ŽILAVOSTI [6] .....	6
SLIKA 2.2 - CRNA KUTIJA ZADANOG UREĐAJA .....	9
SLIKA 2.3 - FUNKCIONALNA STRUKTURA .....	10
SLIKA 2.4 - VARIJANTA 1 .....	14
SLIKA 2.5 - VARIJANTA 2 .....	15
SLIKA 3.1 - TEHNIČKO VREDNOVANJE UREĐAJA .....	16
SLIKA 4.3 - UKUPNA DOBROTA VARIJANTI [14] .....	26
SLIKA 5.1- ODABRANI MATERIJAL [12] .....	27
SLIKA 5.2- DIMENZIJE EPRUVETE [12] .....	28
SLIKA 5.3 - OPTEREĆENA EPRUVETA [12] .....	28
SLIKA 5.4 - KRITIČNI POPREČNI PRESJEK [12] .....	29
SLIKA 5.5 - PRORAČUN KLINA [12] .....	30
SLIKA 5.6 - KARAKTERISTIKE OPRUGE [13] .....	31
SLIKA 5.8- MAKSIMALNI MOMENT NA ZAMAJCU[14] .....	33
SLIKA 5.9 - DIJAGRAM MOMENATA [14] .....	33
SLIKA 5.10 - GRAF SILA NA KLIZAČU [14] .....	34
SLIKA 5.11 - KONČAROV KATALOG [15] .....	35
SLIKA 5.12 - POJEDNOSTAVLJENI PRIKAZ OPTEREĆENOG VRATILA .....	35
SLIKA 5.13 - ČELICI ZA VRATILA [16] .....	36
SLIKA 5.16 - KRAJEVI CILINDRIČNIH VRATILA [16] .....	38
SLIKA 5.17 - VRATILO [12] .....	39
SLIKA 5.18 - KONTROLA ČVRSTOĆE VRATILA [12] .....	40
SLIKA 5.19 - UTOR U CENTRU PLOČE EKSCENTRA [12] .....	41
SLIKA 5.20 - IZGLED ,OSNOVNE DIMENZIJE I NOSIVOST KUGLIČNIH LEŽAJA REDA 60 [16] .....	43
SLIKA 5.21 - IZGLED, OSNOVNE DIMENZIJE I NOSIVOST VALJKASTOG LEŽAJA TIP A NU [16] .....	44
SLIKA 5.22 - MODALNA ANALIZA NEPRIČVRŠĆENOG STOLA [12] .....	45
SLIKA 5.23 - MODALNA ANALIZA PRIČVRŠĆENOG STOLA [12] .....	46
SLIKA 5.24 - 3D MODEL UREĐAJA I STOLA [12] .....	46

**Popis tablica**

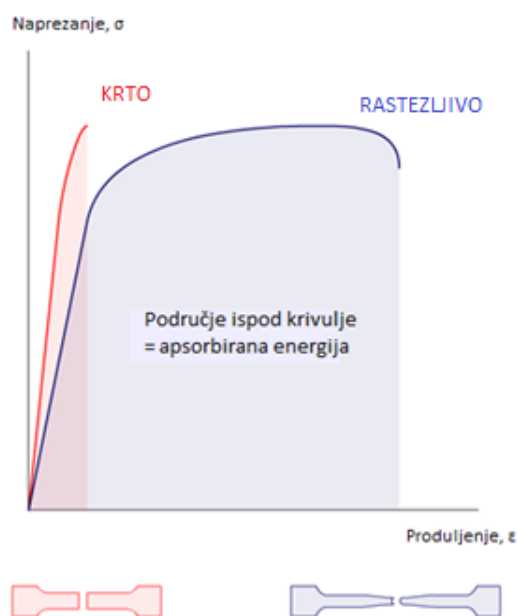
TABLICA 2.1 - LISTA ZAHTJEVA I ŽELJA [10].....	7
TABLICA 2.2 - MORFOLOŠKA KUTIJA UREĐAJA.....	10
TABLICA 3.1 - SKALA VREDNOVANJA .....	17
TABLICA 3.2 - VREDNOVANJE TEHNIČKE DOBROTE PREMA BODOVIMA .....	18
TABLICA 4.1 - EKONOMSKA DOBROTA VARIJANTE 1.....	23
TABLICA 4.2 - EKONOMSKA DOBROTA VARIJANTE 2.....	24
TABLICA 5.1 - PRORAČUN OPRUGE [14].....	32
TABLICA 5.2 - IZRAČUN POTREBNIH PROMJERA OD C DO A .....	37
TABLICA 5.3 - IZRAČUN POTREBNIH PROMJERA OD TOČKE B DO A.....	38



## 1. UVOD

U okviru završnog rada konstruirati će se uređaj za kontrolirano generiranje pukotine. Na početku rada biti će obrađen uvodni osvrt o metodi ispitivanja lomne žilavosti materijala i relevantnih standarda, te će se ujedno spomenuti i već postojeći uređaji za generiranje pukotina.

Žilavost je bitno svojstvo materijala, te ju je bitno ispitati jer je pokazatelj ispravnosti toplinske obrade, starenju materijala i drugih svojstava. Prije svega bitno je definirati to svojstvo. Žilavost je sposobnost materijala da plastičnom deformacijom razgradi naprezanja i na taj način povisi otpornost materijala na krhki lom [1]. Prije nego što dođe do loma, materijal se može plastično deformirati. Ta sposobnost materijala naziva se duktilnost. Mjera za duktilnost je maloprije opisana žilavost. Nasuprot žilavosti, postoji i krhkost, a to je sposobnost materijala da se lomi prilikom pokušaja fizičkih deformacija. To svojstvo je, svakako, negativno.



Slika 1.1 - Dijagram naprežanja [1]

Na slici 1.1 prikazan je Hookeov dijagram za dvije vrste materijala, duktilni odnosno žilavi i krhki materijal. Crvenom bojom je označena je krivulja naprežanja-deformacije za krhki materijal i vidljivo je da dolazi do loma materijala prilikom pokušaja deformacije, te je apsorbirana energija (prikazana površinom ispod krivulje, matematički se opisuje integralom)

jako mala. Plavom bojom označena je krivulja naprezanja-deformacije za duktilni materijal i vidljivo je da prilikom povećanja deformacije ne dolazi do povećanja naprezanja, što i jest osobina takvih materijala, odnosno plastičnom deformacijom neutraliziraju to naprezanje. Apsorbirana energija je puno veća nego kod krhkih materijala, zato što oni „popuštaju“ nakon značajnijeg naprezanja i apsorbirana energija je puno veća. Ovakvo ponašanje materijala nije nužno povezano sa čvrstoćom.

Ove dvije veličine preko kojih smo određivali dali je neki materijal duktilan ili krhak, povezane su Hookeovim zakonom [2].

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1.1)$$

Iz 1.1 se može vidjeti da je naprezanje proporcionalno deformaciji, tj. naprezanje je jednako umnošku deformacije i Youngova modula elastičnosti, koji je različit za različite materijale.

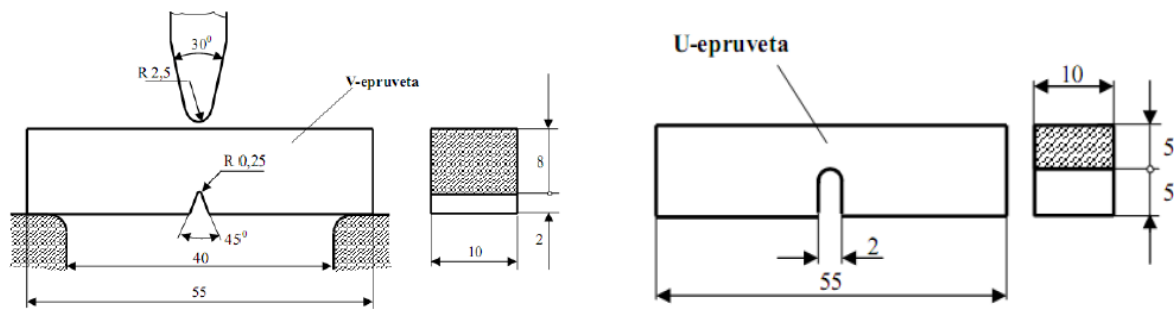
## 1.1. Metode ispitivanja lomne žilavosti materijala

Mjera za lomnu žilavost je kritični intenzitet naprezanja na vrhu nastale pukotine koji dovodi do širenja pukotine. Od svih svojstava koje određuju žilavost materijala jedino lomna žilavost može biti veličina koja se koristi u proračunima [3].

Upotreba određenih uređaja mijenjala se tokom povijesti. Tokom drugog svjetskog rata dolazilo je do potonuća brodova koji su plovili sjevernim morima, a velike promjene žilavosti otplate broda događale su se zbog niskih temperatura. Zbog toga je tada došlo do potrebe za ispitivanjem žilavosti. Također se vidjelo da je dolazilo do prijelaza iz žilavog u krto stanje pri nekoj tranzicijskoj temperaturi, te se takve promjene nisu mogle točno odrediti ispitivanjem tvrdoće ili čvrstoće. Za ispitivanje žilavosti najpoznatiji je Charpy bat, koji je dobio naziv po svom izumitelju, francuskom znanstveniku Georgesu Charpyu, najpoznatijem po Charpy testu. Određivanje utroška energije bata na lom epruvete sa zarezom je temeljni princip rada Charpy bata. Provođi se prema normi ISO 83:1976 (U zarez) i ISO 148:1983 [7]. Ranije opisane tranzicijske temperature predstavljaju jako velik problem, a ovakvim uređajem se one ne mogu precizno odrediti. Potrebno je imati više uzoraka za ispitivanje. Ispitivanje se provodi na različitim temperaturama, a same temperature imaju najveći utjecaj koji određuje žilavost

materijala. Visina težišta bata prije i nakon loma epruvete se mjere, a njihova razlika je proporcionalna količini energije utrošene na lom epruvete odnosno vrijednosti udarne žilavosti.

Za ispitivanje udarne radnje loma najčešće se koriste dvije vrste epruveta. Na slici 1.2 pod a) prikazana je epruveta s „U“ utorom (DVM epruveta) dubine 3 mm, dok je pod b) epruveta s „V“ utorom (ISO –V epruveta) dubine 2 mm.



Slika 1.2 - Epruvete za ispitivanje žilavosti sa zarezima [8]

Druga metoda za ispitivanje žilavosti je metoda Izod, nazvana po engleskom znanstveniku E.G. Izodu. Ova metoda uvelike slična prethodno opisanoj metodi, a princip mjerenja je utrošak rada bata pri lomljenju testnog uzorka. Razlika od prethodne metode je način učvršćivanja epruvete, što je skoro zanemarivo. Epruveta je postavljena vertikalno gdje je jedan kraj epruvete ukliješten, drugi slobodan. Prema normi ASTM D256A, na uzorku duljine 3,2 mm, određuje se udarni rad loma za polimerne materijale. Slika 1.3 prikazuje Charpy bat gdje je epruveta horizontalno oslonjena.



Slika 1.3 - Charpy uređaj za ispitivanje žilavosti [5]

## 1.2. Uređaji za kontrolirano generiranje pukotina

Kritični intenzitet naprezanja na vrhu nastale pukotine koja dovodi do širenja je mjera ta lomnu žilavost. Lomna žilavost je svojstvo materijala koje se može koristiti u svrhu dimenzioniranja konstrukcija što nije slučaj sa svojstvom udarne i žilavosti. Lomna žilavost se ispituje na uzorcima koji ima umjetno generiranu pukotinu nastalu umaranjem.

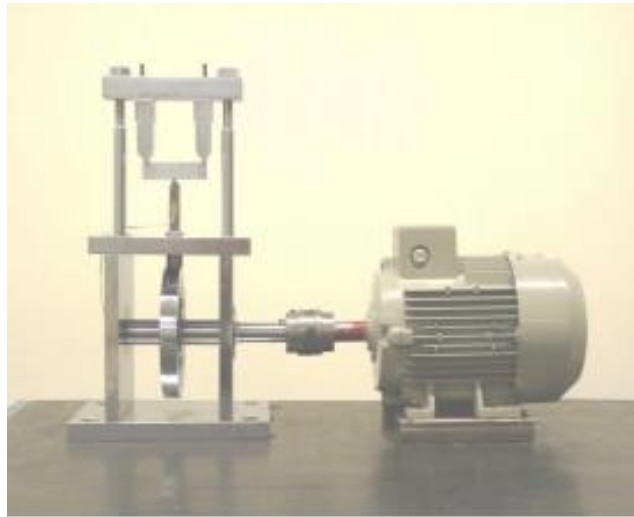
Mehanika loma kroz niz studija nudi metode i alate koje dopuštaju provođenje analize, projektiranja i procjene napuknutih materijala. Od velike važnosti pri proučavanju ponašanja materijala su parametri  $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$ ,  $CTOD$ .

$K_{IC}$  parametar, koji je i označen kao žilavost na lom pri linearno-elastičnoj deformaciji, je svojstvo materijala koji kvantificira otpornost na nestabilno širenje pukotine. Faktor intenziteta naprezanja,  $K$ , definira intenzitet naprezanja na vrhu pukotine. Ako je  $K < K_{IC}$ , neće doći do nestabilnog širenja pukotine [6].

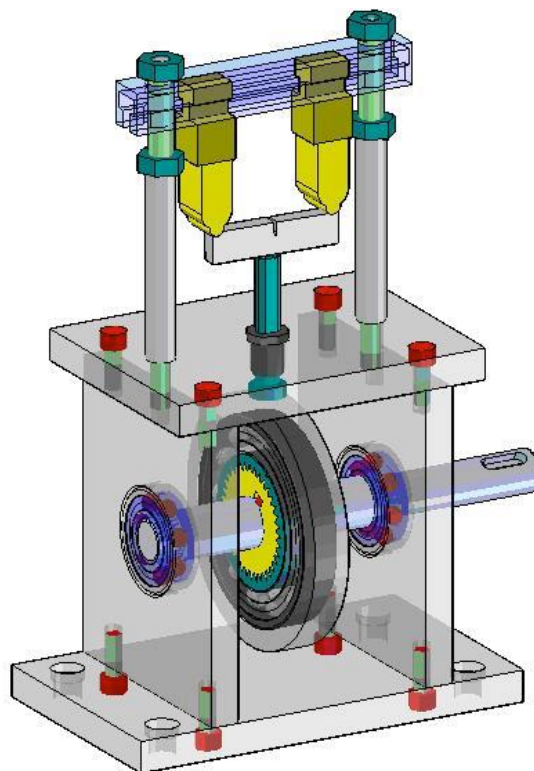
$CTOD$  parametar je najlakše odrediti od prethodno opisanih parametara, te omogućuje provođenje analiza elastične linearne mehanike loma i mehanike elastoplastičnog loma. Metoda je povoljna kada postoji visoka duktilnost i mala količina materijala na raspolaganju.

Na slici 1.4, 1.5 i 1.6 prikazan je primjer uređaja za generiranje pukotine zamorom. Prikazani uređaj je izrađen u Kolumbiji u okviru rada pod nazivom „*Design and construction of a*

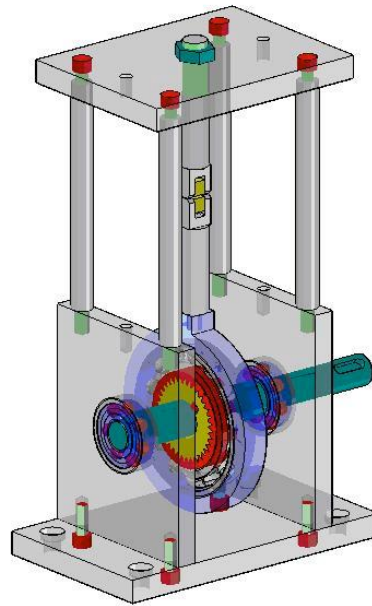
*precracking for fatigue for the termination of fracture toughness*“ [6]. Slični uređaji su od velike koristi pri provođenju analize, projektiranju i ocjenjivanju komponenti u okviru koncepta mehanike loma. Obzirom na to da olakšava određivanje mehaničkih parametara loma  $K_{IC}$ ,  $J_{IC}$  i  $CTOD$  koji se koriste za određivanje integriteta strukture.



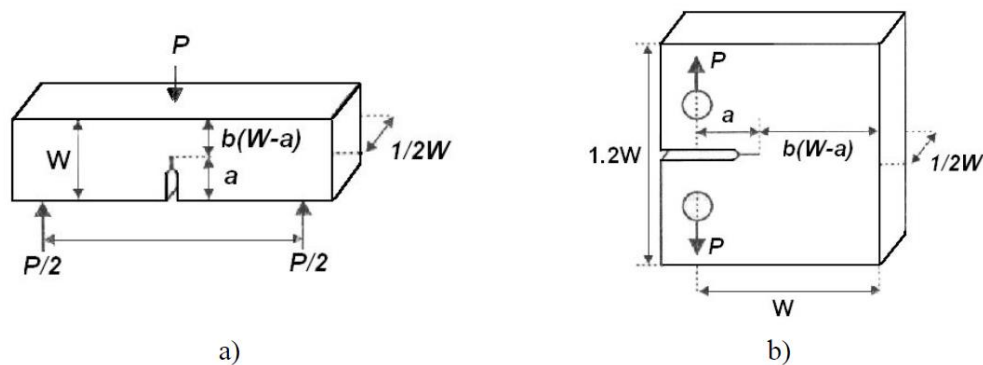
Slika 1.4 - Uređaj za generiranje pukotine [6]



Slika 1.5 - Shema s mehanizmom uređaja sa epruvete za savojno opterećenje[6]



Slika 1.6 - Shema uređaja za generiranje pukotine epruvete za vlačno opterećenje [6]



Slika 1.7 – Epruvete s generiranom pukotinom za ispitivanje lomne žilavosti [6]

Slika 1.7 prikazuje epruvete sa pukotinom za ispitivanje lomne žilavosti. Pod a) je epruveta za ispitivanje pomoću savijanja SE (B) dok je pod b) kompaktna vlačna epruveta C (T).

Postupak ispitivanja se vrši u dvije faze [9]

- Stvaranjem realne pukotine promjenjivim naprezanjem na umaralici (pulzatoru)
- Statičko ispitivanje epruvete do loma uz snimanje dijagrama sila-proširenje pukotine na univerzalnoj kidalici

## 2. METODIČKI RAZVOJ PREDMETA

Metodički gledano, konstruiranje je proces optimizacije određen zadanim ciljem, a koji se odvija u okviru više djelomično kontradiktornih zahtjeva koji se s vremenom mijenjaju.

Metodičkim pristupom će u nastavku biti izrađena lista zahtjeva i želja, funkcionalna struktura proizvoda, morfološka kutija te razrada varijanti.

### 2.1. Lista zahtjeva i želja

Prije početka razvoja uređaja, mora se pobliže razjasniti zadatak. Zadatak mora biti jasan, kako bi se kasnije dopune i ispravci tijekom konstruiranja smanjili na minimum. Proučavanjem literature sakupljene su informacije o tome koje sve zahtjeve proizvod mora ispuniti. Rezultat toga je izrada liste zahtjeva i želja (tablica 2.1) koja je temelj za daljnji razvoj koncepta. [10]

Tablica 2.1 - Lista zahtjeva i želja [10]

SVEUČILIŠTE U SPLITU		LISTA ZAHTJEVA I ŽELJA	ODSJEK STROJARSTVA	
Sveučilišni odjel za stručne studije		Uređaj za kontrolirano generiranje pukotine		
Red. br	Z/Ž	Lista zahtjeva i želja	Datum	Odgovorna osoba
				Nikola Planinić
		1. GEOMETRIJA		
	Z Z Z	Maksimalni gabariti uređaja: $D / \check{S} / V = 500/500/500$ mm Dimenzije ispitnog uzorka prema ASTM E399 standardu za SE(B) I C(T) uzorke		
		2. KINEMATIKA		
	Z Z Z	Generiranje pukotine rotacijom Savijanje Aksijalno gibanje		
		3. SILE		
	Z Z Ž	Pritezanje uzorka Potrebno opterećenje (sila ) epruvete: 0 – 1000N Broj ciklusa po min $n > 1000$		
		4. ENERGIJA		
	Z	Električna energija, Mehanička energija		
		5. MATERIJALI		

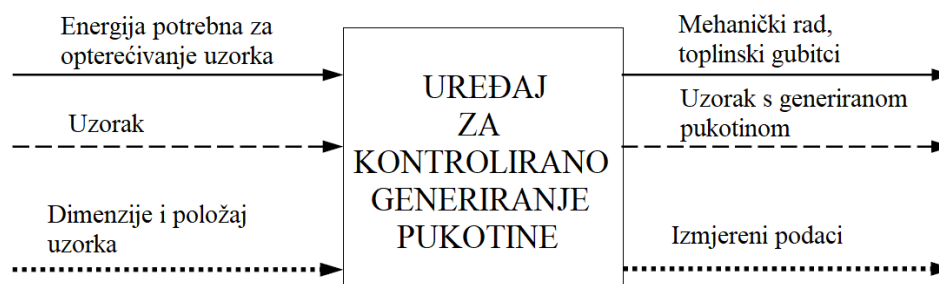
	Z	Materijali uređaja (metodički izbor)		
	Z	Materijal ispitnog uzorka		
	Z	Ekološki prihvatljivi materijali		
	Z	Materijali dostupni kod lokalnih dobavljača		
		6. SIGNALI		
	Z	Mjerenje sile		
	Ž	Upravljanje putem računala		
	Z	Mjerenje broja ciklusa		
	Ž	Mjerenje procjena propagacije pukotine		
		7. SIGURNOST		
	Z	Sigurnosni prekidač za izravno gašenje uređaja		
	Z	Zaštita od električnog udara prema standardu		
	Z	Zaštitna metalna mreža		
		8. ERGONOMIJA		
	Z	Jednostavno postavljanje i uklanjanje ispitivanih uzoraka		
		9. PROIZVODNJA		
	Z	Minimalan broj dijelova		
	Z	Jednostavno sklapanje		
	Z	Standardni dijelovi		
		10. KVALITETA I KONTROLA		
	Z	Detaljna testiranja nakon izrade		
		11. MONTAŽA		
	Z	Na predviđenom mjestu za uređaj (prema uputstvu)		
		12. TRANSPORT		
	Z	Prenosivost uređaja (masa do 50 kg)		
		13. UPOTREBA		
	Z	Prema uputama datim u standardima ASTM E399, ISO 12135, ASTM E1820,		
	Z	ASTM E740 Prema posebno izrađenom uputstvu		
		14. ODRŽAVANJE		
	Ž	Minimalni zahtjevi na održavanje – ciklus održavanja (jednom godišnje)		
		15. RECIKLAŽA		
	Z	Zaštita okoliša: ISO 14000		
	Z	Životni ciklus: ISO 14040 - 14043		
		16. TROŠKOVI		
	Z	Max. dopušteni proizvodni troškovi $c_1 =$		
	Z	12.000,00 HRK Max. dopušteni investicijski troškovi $c_2 =$		
		13.000,00 HRK		
		17. TERMINI		



	Z	Detaljna konstrukcijsko tehnološka razrada završena do 01.05.2023.		
--	---	--------------------------------------------------------------------	--	--

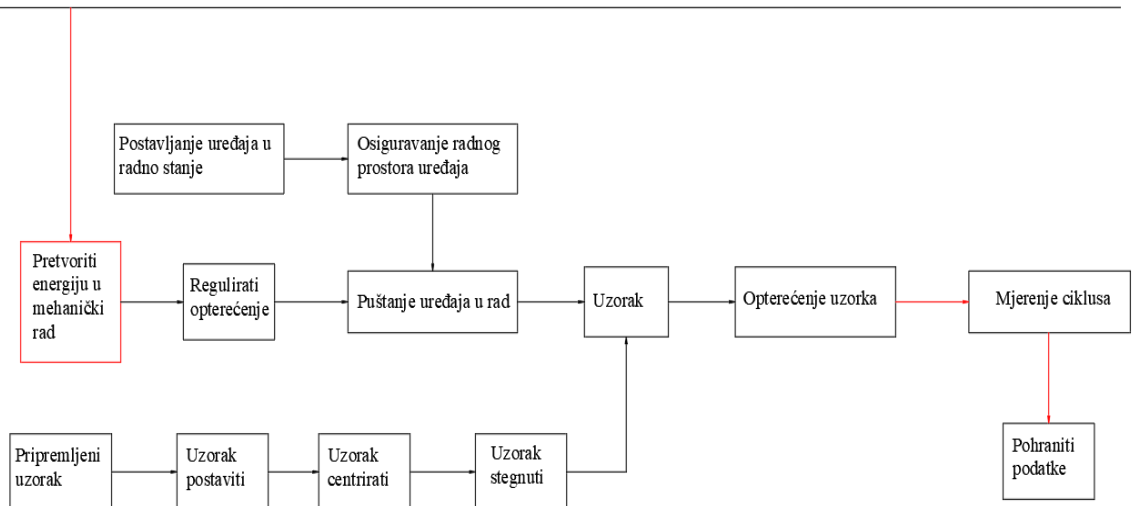
## 2.2. Funkcionalna struktura

Slika 2.1 prikazuje crnu kutiju uređaja to jest ukupnu funkciju. Na ulazu energije je energija potrebna za opterećenje uzorka a na izlazu mehanički rad te toplinski gubitci. Zatim na ulazu za materijal dolazi uzorak te se na izlazu dobije uzorak s generiranom pukotinom. Za signal na ulazu su uzete dimenzije te položaj uzorka a na izlazu su izmjereni podaci. Kako bi ukupna funkcija bila jasnija pravi se funkcionalna struktura prikazana na slici 2.2



Slika 2.1 - Crna kutija zadanog uređaja

Dostaviti energiju



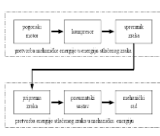

Slika 2.2 - Funkcionalna struktura

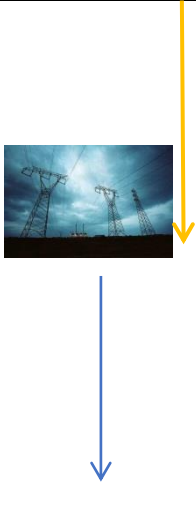
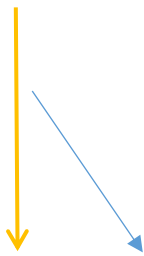

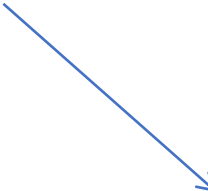



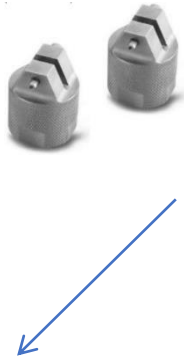
Prvo je potrebno pripremljeni uzorak postaviti, centrirati te pritegnuti. Zatim se uređaj postavlja u radno stanje, te se osigurava radni prostor oko njega. Energija se dostavlja iz gradske mreže, zatim se pretvara u mehanički rad. Tokom puštanja uređaja u rad potrebna je mogućnost regulacije opterećenja. Uzorak se opterećuje dinamički sve do puknuća. Mjeri se deformacija i snaga opterećenja te se ti podaci pohranjuju.







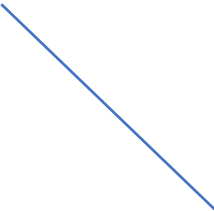








### 2.3. Morfološka kutija

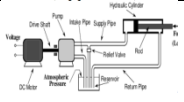



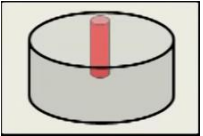





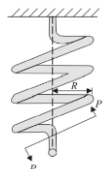








Tablici 2.1. prikazuje morfološku kutiju uređaja. Morfološka kutija uređaja prikazat će tehnička rješenja parcijalnih funkcija iz funkcionalne strukture.



Tablica 2.2 - Morfološka kutija uređaja

	Varijanta	RJEŠENJA			
	Parcijalna funkcija	1	2	3	4
1	Dostaviti energiju	Električna energija	Pneumatska energija 	Hidraulična energija 	

					
2	Postavljanje uzorka	Ručno 	Automatski		
3	Pozicioniranje uzorka	Ručno 	Oblikom 		
4	Pritezanje uzorka	Hidraulički 	Mehanički 	Pneumatski 	Oblikom 

5	Glavni pogon uređaja	Pneumatski motor 	Elektromotor   	Hidraulički motor 	
7	Osiguravanje radnog prostora uređaja	Zaštitna mreža  	Pleksiglas pregrada 	Metalna pregrada 	
8	Puštanje uređaja u rad	Hidraulički (razvodnik) 	Pneumatski (razvodnik) 	Digitalno (releji) 	Električni (prekidač)   
9	Pretvoriti energiju u mehanički rad	Servo-hidraulični sustav (klip pod tlakom)	Elektromehanički (navojno vreteno)		

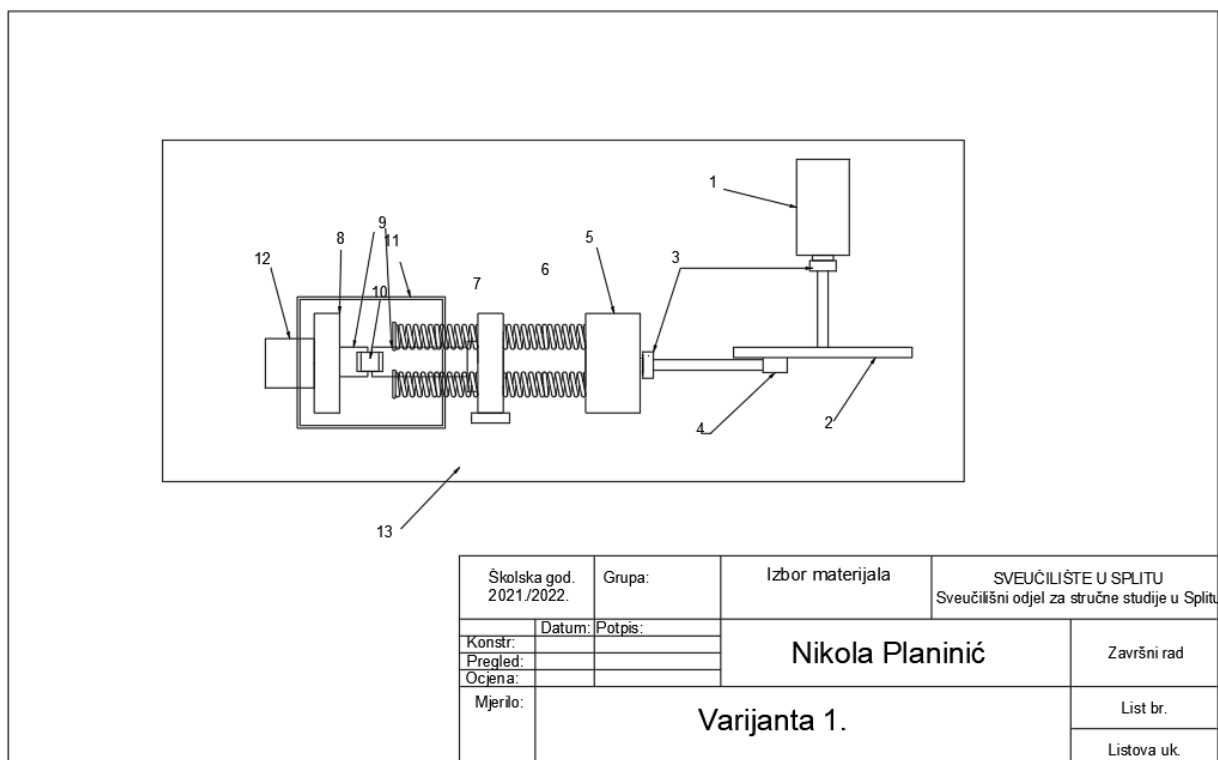
		 	 		
10	Regulacija opterećenja	<p>Ekscentar</p>  	<p>Hidraulični razvodnik</p>  	<p>Pneumatska kočnica</p> 	
11	Opteretiti uzorak	<p>Uteg</p> 	<p>Opruga</p>  	<p>Hidraulički cilindar</p>  	
12	Mjerenje broja ciklusa	<p>Mjerna ćelija</p>  	<p>Digitalni tahometar (magnetni davač)</p> 	<p>Frekvencijski pretvarač</p>  	

13	Pohraniti podatke	Računalni program 	SD kartica 	Nije potrebno	
----	-------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------	--

## 2.4. Opis varijanti

### 2.4.1. Varijanta 1

Na slici 2.4 prikazana je prva varijanta uređaja za kontrolirano generiranje pukotine. Na radnom stolu (13) nalazi se prva varijanta. Ispitna epruveta (10) se nalazi između dvije čeljusti od koje je jedna nepokretna (8) a druga je pokretna (7). Epruveta se pozicionira ručno te se steže oblikom (9). Na pokretnoj čeljusti je prikačena opruga velike krutosti (7) koja bi vršila oscilatorno gibanje na epruvetu (10). Elektromotor (1) je na postolju povezan okomito na ploču (2) s ekscentar masom (4). Ekscentar masa je povezana klipnjačom na osovinu koja je spojena sa blokom sa oprugom. Kružnim okretanjem ekscentra opruga se rasteže te se tako ostvaruju sile na epruvetu. Prije puštanja u rad, prostor se osigurava zaštitnom mrežom (11).

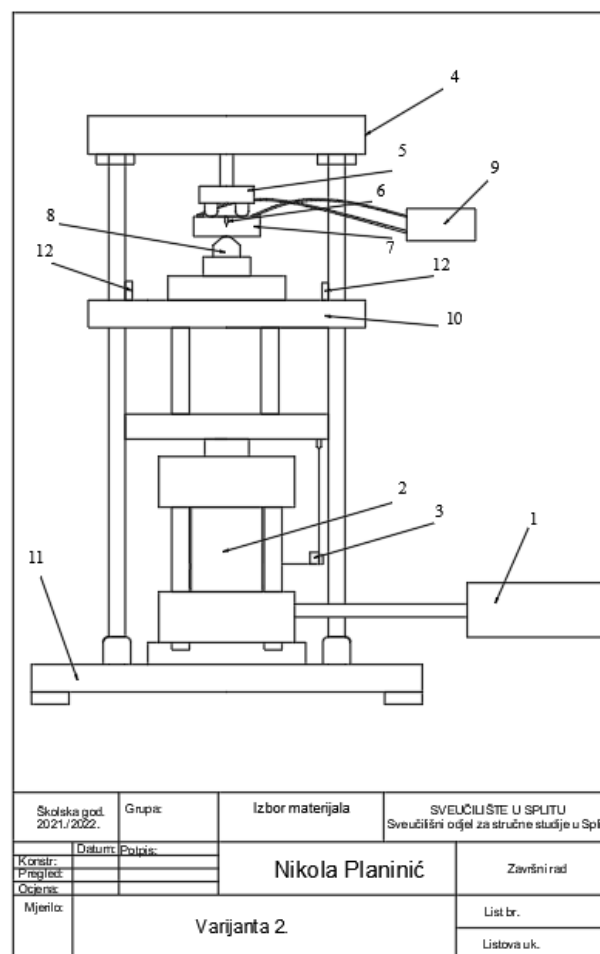


Slika 2.4 - Varijanta 1

### 2.4.2. Varijanta 2

Kod druge varijante, slika 2.5, uzorak se pozicionira ručno te se oblikom steže. Glavni pogon je hidraulična pumpa (1) koja naizmjenično tlači ulje ispod i iznad klipa koji se nalazi u cilindru (2). Na taj način se osigurava promjenjivo opterećenje potrebno za generiranje pukotine. Pokretni nosač (10) i postolje imaju čeljusti za stezanje (5) ispitnog uzorka ili epruvete (7), koja će se uslijed osciliranja gornjeg nosača biti dinamički opterećena. Zahtjev da se uređajem mogu generirati pukotine na oba tipa uzoraka (SE(B) i C(T)) se osigurava primjenom promjenjivih steznih čeljusti. Mjerenje broja ciklusa promjene opterećenja se vrši primjenom odgovarajućeg senzora (9).

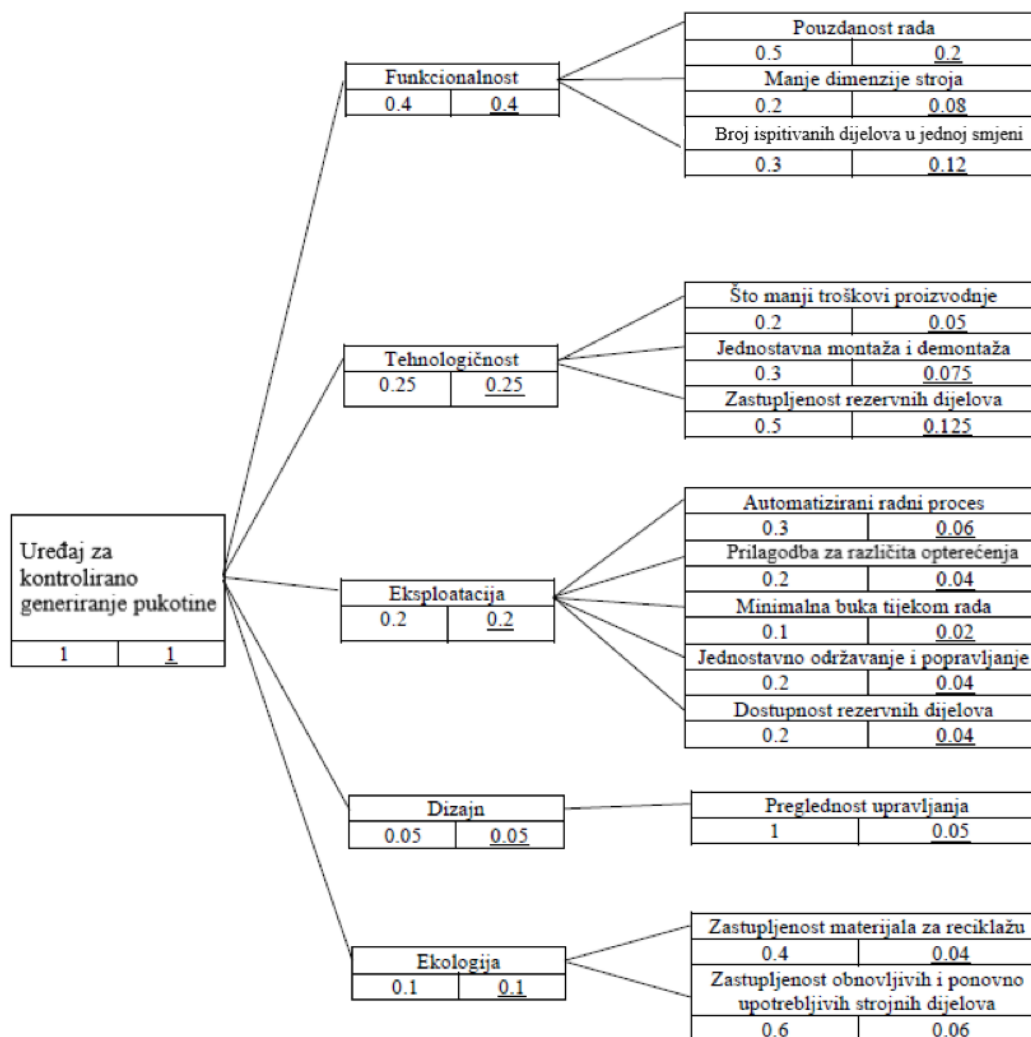
Prije puštanja u rad, radni prostor se osigurava pleksiglas pregradom. Tokom dinamičkog opterećenja uzorka obavljaju se mjerenja pomaka pomoću senzora pomaka. Podatci se spremaju na SD karticu .



Slika 2.5 - Varijanta 2

### 3. TEHNIČKO VREDNOVANJE VARIJANTI

Slika 3.1 prikazuje tehničko vrednovanje za uređaj. Za zadani uređaj tehnički kriteriji su funkcionalnost, tehnološkičnost, eksploatacija, dizajn te ekologija. Ukupna ocjena to jest zbroj kriterija mora bit jednak jedan. Najvažniji kriterij bi bila funkcionalnost uređaja te se zbog toga ocjenjuje s 0.4, zatim tehnološkičnost 0.2, eksploatacija 0.2, ekologija uređaja 0.1 te najmanje bitan dizajn 0.05.



Slika 3.1 - Tehničko vrednovanje uređaja



U tablici 3.3 prikazana je tablica vrednovanja tehničke dobrote prema bodovima. Za bodove se koristi skala vrednovanja od 1-10 (tablica 3.2.).

Tablica 3.1 - Skala vrednovanja

SKALA VREDNOVANJA PREMA ANALIZI KORISNOSTI	
Ocjena $W_1, W_2, \dots, W_n$	Značenje
0	Potpuno neprihvatljivo rješenje
1	Rješenje s puno nedostataka
2	Loše rješenje
3	Podnošljivo rješenje
4	Srednje podnošljivo rješenje
5	Zadovoljavajuće rješenje
6	Dobro rješenje
7	Vrlo dobro rješenje
8	Rješenje koje prelazi postavljeni cilj
9	Rješenje koje daleko prelazi postavljeni cilj
10	Idealno rješenje

Tablica 3.2 - Vrednovanje tehničke dobrote prema bodovima

Vrednovanje konceptijskih varijanti											
Kriterij vrednovanja				Veličina svojstva		Varijanta 1			Varijanta 2		
	Br.		Faktor težine značaja $g$		Mj. Jed.	$e_1$	$W_1$	$W_{1g1}$	$e_2$	$W_2$	$W_{2G2}$
Funkcionalnost	1	Pouzdanost rada	0.2	Razina pouzdanosti	N/D	Visoka	9	1.8	Visoka	8	1.6
	2	Manje dimenzije stroja	0.08	Zauzeti prostor	$m^2$	1.5	8	0.64	1	6	0.8
	3	Broj ispitanih uzoraka u jednoj smjeni	0.12	Broj ispitanih uzoraka	kom	$\approx 90$	9	1.08	$\approx 90$	9	1.08
Tehnoloičnost	4	Što manji troškovi proizvodnje	0.05	Razina troškova	N/D	Niska	6	0.3	Visoka	4	0.2
	5	Jednostavna montaža i demontaža	0.075	Razina jednostavnosti	N/D	Visoka	8	0.6	Niska	6	0.45
	6	Zastupljenost rezervnih dijelova	0.125	Razina dostupnosti	N/D	Visoka	8	1	Srednja	6	0.75
Eksploatacija	7	Automatizirani radni proces	0.06	Postotak automatskog rada	%	90	7	0.42	90	7	0.42
	8	Neprekidni rad (više od 8 sati)	0.04	Broj sati rada	h	8	10	0.4	8	10	0.4
	9	Minimalna buka tijekom rada	0.02	Razina buke	dB	60-65	7	0.14	65-70	6	0.12
	10	Jednostavno održavanje i popravljanje	0.04	Težina održavanja i popravaka	N/D	Niska	9	0.36	Niska	8	0.32
	11	Dostupnost rezervnih dijelova	0.04	Razina dostupnosti	N/D	Visoka	9	0.36	Srednja	7	0.28
Dizajn	12	Preglednost upravljanja	0.05	Razina ergonomičnosti	N/D	Visoka	8	0.4	Visoka	7	0.35

Ekologija	13	Zastupljenost materijala za reciklažu	0.04	Postotak recikliranja	%	80	8	0.32	80	8	0.32		
	14	Zastupljenost obnovljivih i ponovo upotrebljivih strojnih dijelova	0.06	Postotak obnove	%	80	8	0.48	80	8	0.48		
Ukupno							$(\Sigma):$	$g=1$					
$W_{max} = 14 \cdot 10 = 140$									$W_1=14$	$W_{1g1}=8$		$W_2=102$	$W_{2g2}=7.57$
									$W_1 = 83\%$			$W_2 = 75.7\%$	

Ovisno o kvaliteti tehničkog rješenja nekog cilja tome rješenju ili varijanti se daju ocjene. U ovom slučaju (tablica 3.3.) idealna varijanta prema tehničkom vrednovanju je **Varijanta 1.**

## 4. EKONOMSKO VREDNOVANJE VARIJANTI

### 4.1. Ekonomsko vrednovanje prve varijante

1. Najniža cijena sličnog proizvoda na tržištu ili cijena koja se može postići za razvijeni proizvod:

$$C_t = 5.300,00 \text{ €} \quad (4.1)$$

2. Troškovi i zarada trgovca (neto cijena)

$$C_{t,net} = C_k \cdot 0,8 = 4.240,00 \text{ €} \quad (4.2)$$

3. Bruto prodajna cijena trgovcu:

$$BPC = C_{t,net} \quad (4.3)$$

4. Neto prodajna cijena:

$$NPC = BPC - \text{troškovi transporta, pakiranja, osiguranja} \quad (4.4)$$

Troškovi pakiranja, transporta, osiguranja = 265,00 €

$$NPC = 4.240,00 - 265,00 = 4.040,00 \text{ €} \quad (4.5)$$

5. Zarada proizvođača i vlastiti troškovi proizvoda. Zarada se računa u % na vlastite troškove proizvoda

$$NPC = VTP + Z = VTP + 0.1VTP \quad (4.6)$$

Vlastiti troškovi proizvoda:

$$VTP = \frac{NPC}{1.1} = 3.672,73 \text{ €} \quad (4.6)$$

$$Z = 0.1 \cdot VTP = 0.1 \cdot 3.672,73 = 367,27 \text{ €} \quad (4.7)$$

6. Dopušteni troškovi za izradu proizvoda:

$H_{dop}$  = VTP - troškovi istraživanja i razvoja, troškovi uprave, administracije, opći troškovi prodaje, drugi opći troškovi

Ovi troškovi se mogu uzeti kao faktorom tvrtke  $\alpha$ .  $\alpha$  ovisi o djelatnosti i načinu organiziranja tvrtke. Može se uzeti  $\alpha = 1,25 - 4$  pri čemu manje vrijednosti odgovaraju tvrtkama s jednostavnijom organizacijom (obrti)

$$H_{dop} = \frac{VTP}{\alpha} = \frac{3.672,73}{1,25} = 2.938,18\text{€} \quad (4.7)$$

## 4.2. Ekonomsko vrednovanje druge varijante

1. Najniža cijena sličnog proizvoda na tržištu ili cijena koja se može postići za razvijeni proizvod:

$$C_t = 9.300,00 \text{ €} \quad (4.8)$$

2. Troškovi i zarada trgovca (neto cijena):

$$C_{t,net} = C_t \cdot 0,8 = 9.300,00 \cdot 0,8 = 7.440,00\text{€} \quad (4.9)$$

3. Bruto prodajna cijena trgovcu :

$$BPC = C_{t,net} \quad (4.10)$$

4. Neto prodajna cijena:

$$NPC = BPC - \text{troškovi pakiranja, transporta, osiguranja} \quad (4.11)$$

$$NPC = 7.175,00 \text{ €} \quad (4.12)$$

5. Zarada proizvođača i vlastiti troškovi proizvoda:

$$VTP = \frac{NPC}{1.1} = \frac{7.175,00}{1.1} = 6.522,73 \text{ €} \quad (4.13)$$

6. Dopušteni troškovi za izradu proizvoda:

$$H_{dop} = \frac{VTP}{\alpha} = \frac{6.522,73}{1,25} = 5.218,18 \text{ €} \quad (4.14)$$

**4.2.1. Ekonomska dobrota varijante 1**

Tablica 4.1 - Ekonomska dobrota varijante 1

<b>INVESTICIJSKI TROŠKOVI VARIJANTE 1</b>			
Trošak materijala:	Količina [kg]	Cijena po [kg] u €	Ukupna cijena [€]
Aluminij	5	4	20
Čelik	180	1,33	239,4
Ostali materijali	20	1,33	26,6
			Σ 289
Trošak kupljenih dijelova	Količina [kom]	Cijena po [kom] u €	Ukupna cijena [€]
Elektromotor	1	282	282
Ploča s ekscentrom	1	200	200
Opruga	8	25	200
Mjerna ćelija	1	660	660
Ležajevi	2	39	78
Zaštitno staklo	1	150	150
Računalo	1	464,5	464,5
			Σ 2.034,5
Trošak oblikovanja	Vrijeme rada [h]	Cijena po h	Ukupna cijena [€]
Rezanje	3	22	66
Bojanje	3	22	66
Zavarivanje	4	11	44
			Σ 176

Ukupni troškovi prve varijante su 2.499,50 €

### 4.2.2. Ekonomska dobrota varijante 2

Tablica 4.2 - Ekonomska dobrota varijante 2

INVESTICIJSKI TROŠKOVI VARIJANTE 2			
Trošak materijala:	Količina [kg]	Cijena po [kg] u €	Ukupna cijena [€]
Aluminij	10	4	40
Čelik	200	1,33	266
Ostali materijali	20	1,33	26,6
			Σ 332,6
Trošak kupljenih dijelova	Količina [kom]	Cijena po [kom] u €	Ukupna cijena [€]
Servo-hidraulični sustav	1	1330	1330
Hidraulična pumpa	1	680	680
Hidraulični ventil	1	100	100
Cilindar	1	60	60
Čeljusti za stezanje	2	40	80
Ekstenzometar	1	1592,67	1592,67
Pleksiglas pregrada	1	36	36
SD kartica	1	265,45	265,45
			Σ 4.144,12
Trošak oblikovanja	Vrijeme rada [h]	Cijena po h	Ukupna cijena [€]
Rezanje	4	22	88
Bojanje	3	22	66
Zavarivanje	5	11	55
			Σ 209

Ukupna cijena druge varijante je 4.685,72 €

### 4.3. Ukupna tehnička i ekonomska dobrota prve varijante

1. Idealni troškovi za izradu proizvoda. Za idealne troškove uzima se 70% dopuštenih troškova

$$H_{id} = 0,7 \cdot H_{dop} = 0,7 \cdot 2.938,18 = 2.056,73 \text{ €} \quad (4.15)$$

2. Troškovi za izradu proizvoda (H) po konceptijskom rješenju izračunavaju temeljem procijenjenih troškova materijala, komponenti i usluga koje se kupuju te troškova obrade (proizvodnje i montaže), pri ovome mora biti:



$$H < H_{dop} \Rightarrow 2.499,50 < 2.938,18 \quad (4.16)$$

3. Stupanj ekonomske dobrote

$$y_2 = \frac{H_{id}}{H} = \frac{2.056,73}{2.499,50} = 0,82 \quad (4.17)$$

#### 4.4. Ukupna tehnička i ekonomska dobrota druge varijante

1. Idealni troškovi za izradu proizvoda:

Za idealne troškove uzima se 70% dopuštenih troškova

$$H_{id} = 0,7 \cdot H_{dop} = 0,7 \cdot 5.218,18 = 3.652,73 \text{ €} \quad (4.18)$$

2. Troškovi za izradu proizvoda (H) po konceptijskom rješenju izračunavaju temeljem procijenjenih troškova materijala, komponenti i usluga koje se kupuju te troškova obrade (proizvodnje i montaže), pri ovome mora biti:

$$H < H_{dop} \Rightarrow 4.685,72 < 5.218,18 \text{ €} \quad (4.19)$$

3. Stupanj ekonomske dobrote

$$y_2 = \frac{H_{id}}{H} = \frac{3.652,73}{4.685,72} = 0,78 \quad (4.20)$$

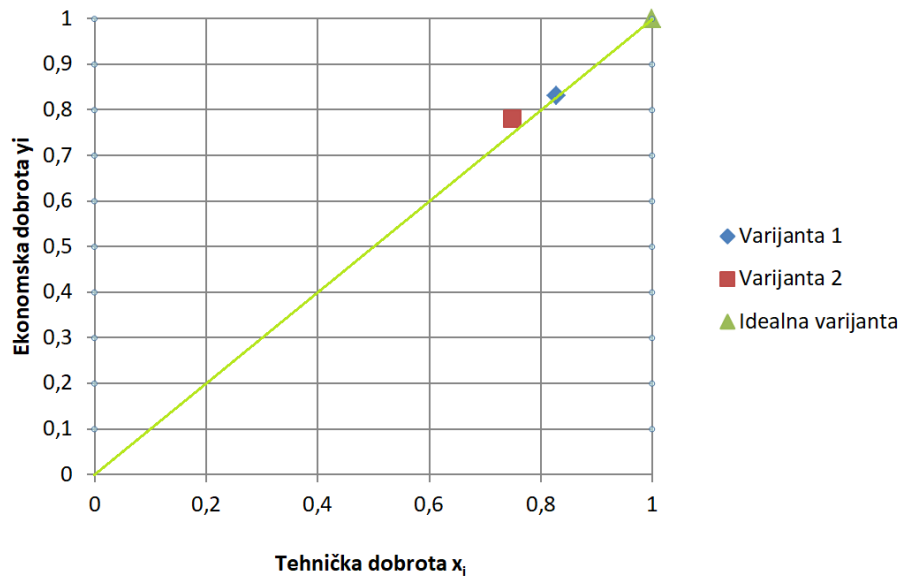
Ukupna tehnička i ekonomska dobrota za varijantu 1:

$$G_1 = \sqrt{x_1 \cdot y_1} = \sqrt{0,83 \cdot 0,93} = 0,88 \quad (4.21)$$

Ukupna tehnička i ekonomska dobrota za varijantu 2:

$$G_2 = \sqrt{x_2 \cdot y_2} = \sqrt{0,75 \cdot 0,78} = 0,76 \quad (4.22)$$

Preporuča se tehničku i ekonomsku dobrotu zajedno prikazati u dijagramu. Tako se utvrđuje ukupna dobrota. Idealan slučaj je kada su ekonomska i tehnička dobrota jednake i što bliže jedinici.



Slika 4.1 - Ukupna dobrota varijanti [14]

Sa slike 4.1 se vidi da je varijanta 1 povoljnija za konačan proizvod, stoga se može započeti sa konstruiranjem i dizajniranjem ove varijante.

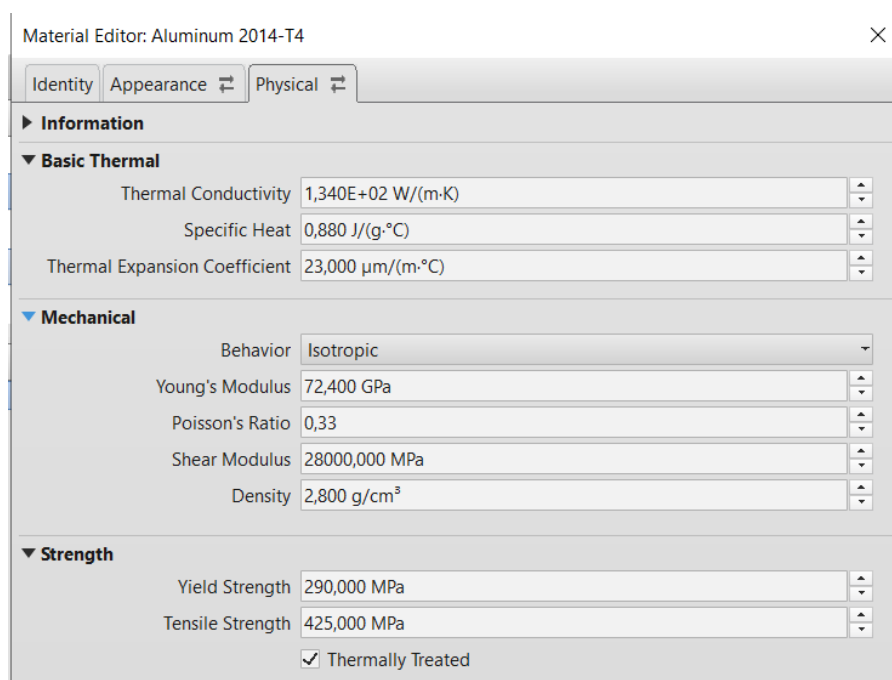
## 5. DETALJNA KONSTRUKCIJSKA RAZRADA

### 5.1. Izbor materijala

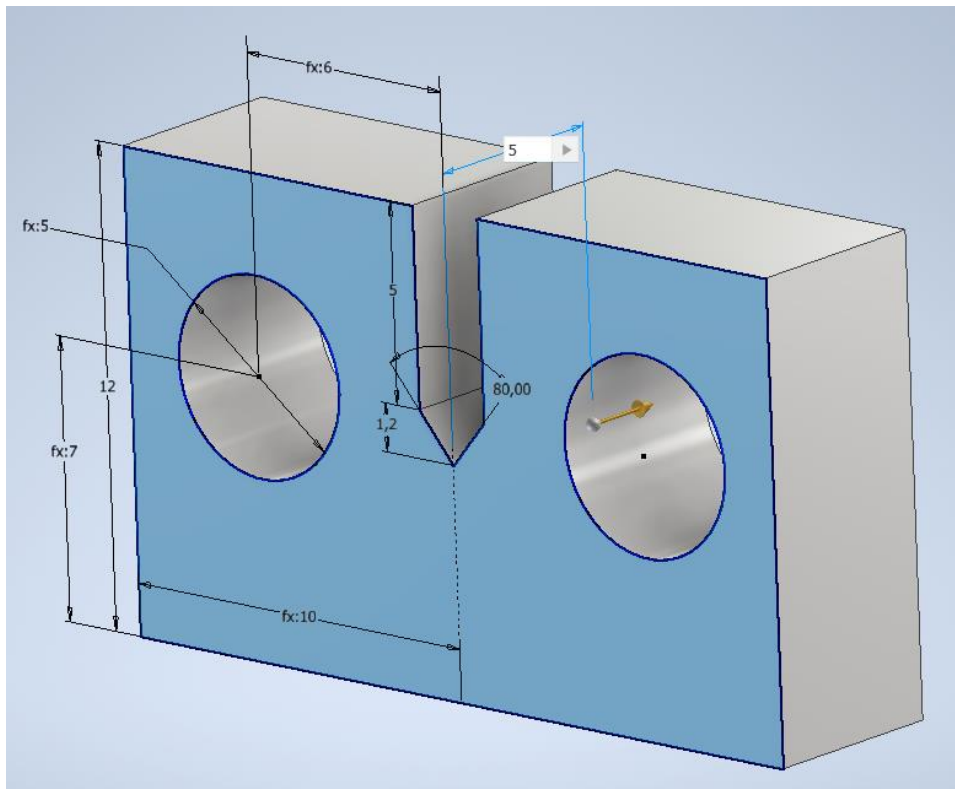
Kod dinamičkih ispitivanja bitno je odrediti koja će se vrsta materijala ispitivati iz razloga što se na osnovi njih dimenzioniraju dijelovi strojeva i uređaja. Rezultatima takvih ispitivanja se ocjenjuje kvaliteta materijala koja bi se koristila pri izradi željenog dijela ili uređaja koji je u ovom završnom radu uređaj za kontrolirano generiranje pukotina.

Pravilan izbor materijala je nužan uvjet kako bi se postigao kvalitetniji i bolji proizvod. Izbor materijala je važan korak koji nastupa u ranijoj fazi projektiranja proizvoda.

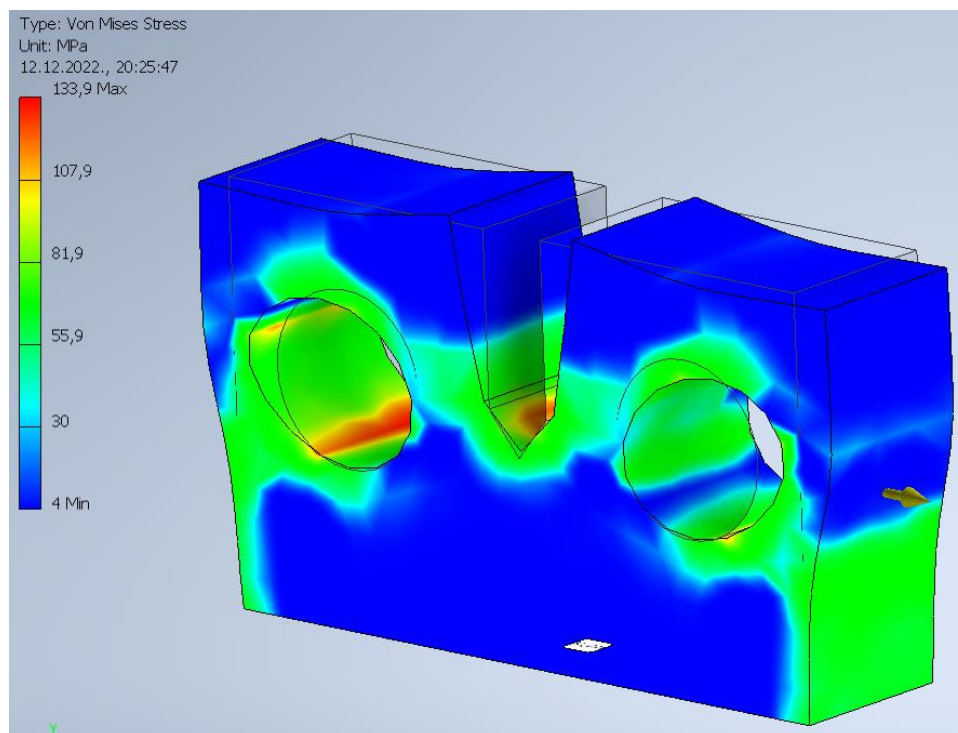
Za epruvetu dimenzija prema slici 5.1 korišten je materijal aluminijska legura 2014-T4 (dural). Maksimalna sila koja djeluje na epruvetu iznosi 1000 N. Maksimalno naprezanje pod djelovanjem sile od 1000 N je određeno analizom naprezanja u programu Autodesk Inventor po Von Misesu (slika 5.3).



Slika 5.1- Odabrani materijal [12]



Slika 5.2- Dimenzije epruvete [12]



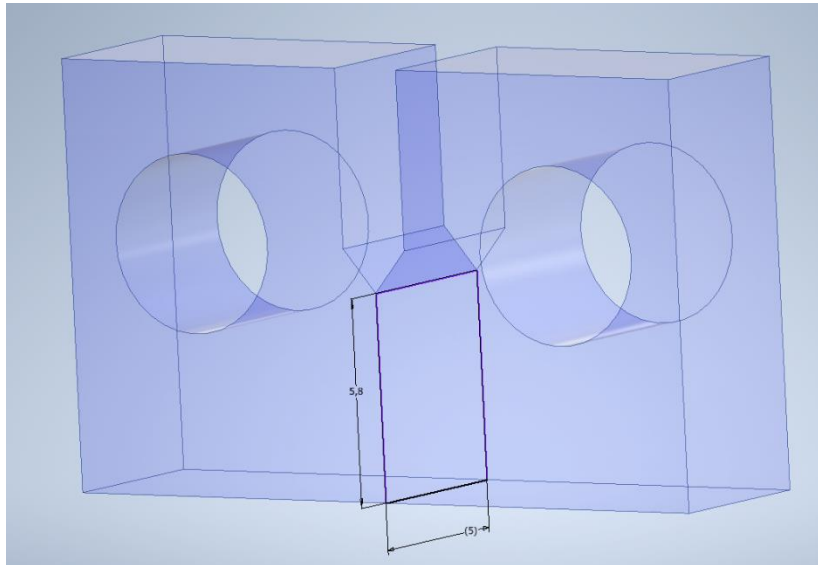
Slika 5.3 - Naprezanje u epruveti [12]

Maksimalno naprezanje koje se nalazi u vrhu „V“ žlijeba prema analizi iznosi 133,9 MPa.

Zatim je potrebno odrediti odnos maksimalne i nominalne sile. Aksijalna sila korištena za opterećenje epruvete podijelit će se sa površinom poprečnog presjeka gdje je koncentracija naprezanja.

$$\sigma_N = \frac{F}{A}, \text{ MPa} \quad (5.1)$$

gdje je: A - površina kritičnog poprečnog presjeka (slika 5.4)



Slika 5.4 - Kritični poprečni presjek [12]

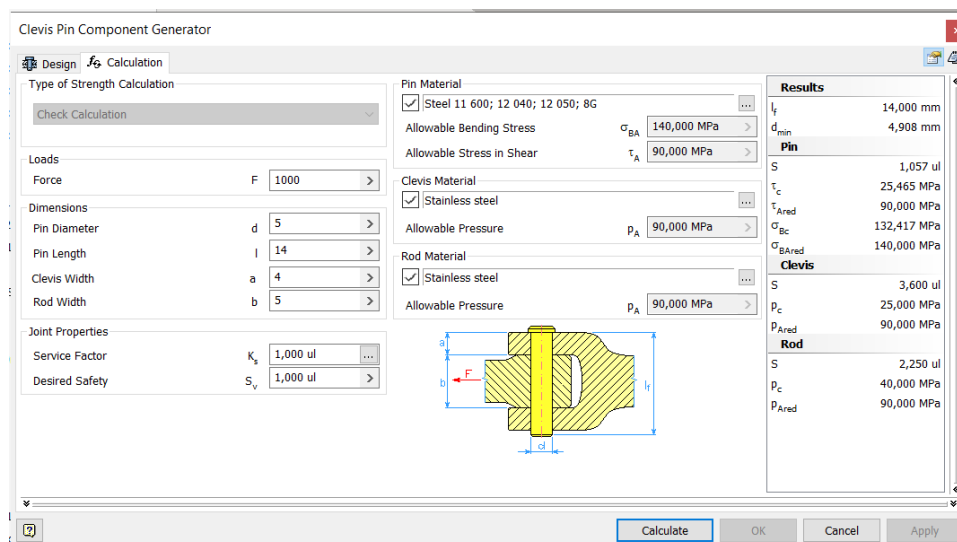
$$A = 5 \cdot 5,8 = 29 \text{ mm}^2 \quad (5.2)$$

$$\sigma_N = \frac{1000}{29} = 34,48 \text{ MPa} \quad (5.3)$$

Faktor koncentracije naprezanja  $K$  je upravo taj odnos maksimalnog i nominalnog naprezanja

$$K = \frac{\sigma_N}{A} = \frac{34,48}{29} = 1,19 \text{ N} \quad (5.1)$$

## 5.2. Proračun klina



Slika 5.5 - Proračun klina [12]

Dva klina koja fiksiraju epruvetu za ručice potrebno je proračun da ne bi pukla usred ispitivanja na maksimalnu silu. Materijal korišten za izradu klinova je čelik te dimenzije prikazane na slici 5.5. Materijal ručica je nehrđajući čelik. Rezultati prikazuju da neće doći do puknuća tokom ispitivanja a prikazani su u desnom stupcu slike.

## 5.3. Proračun opruge

Za izradu naprave će se koristiti 8 zavojnih opruga od kojih bi 4 preuzimale opterećenje za slučaj tlačne sile u epruveti, a 4 za slučaj vlačne sile. Dimenzioniranje opruga (slika 5.6) vrši se prema sili koju je potrebno ostvariti na epruveti.

- Materijal odabran za izradu opruga: DIN 58 CrV 4

$$\sigma_M = 1500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \sigma_T = 1350 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, E = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2},$$

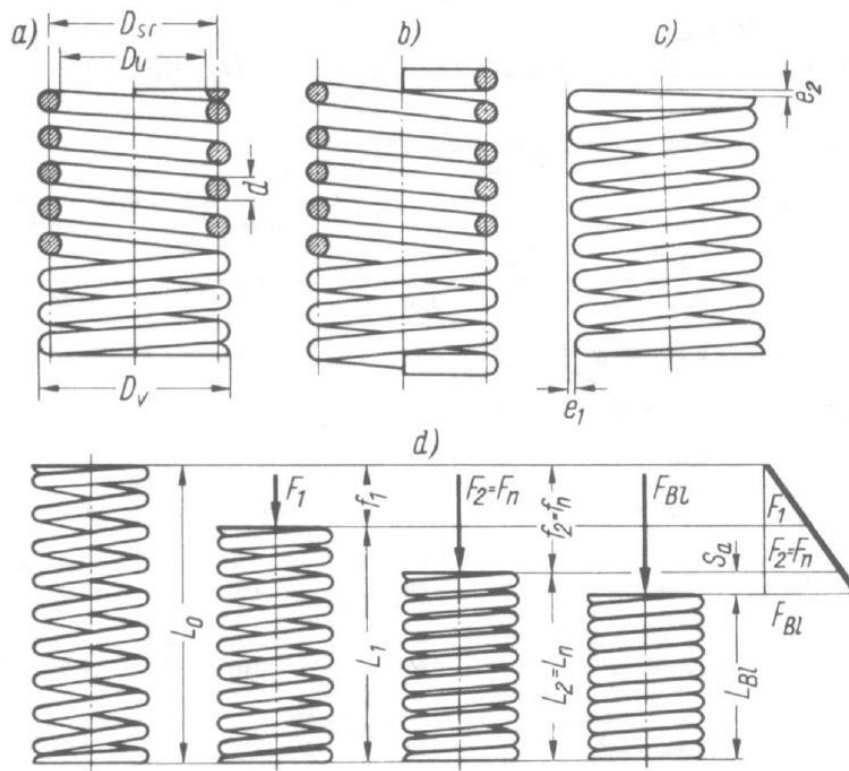
$$E = 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, G = 83000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

- žica za opruge DIN 17223 okruglog poprečnog presjeka, oznake C

Područje promjera 0.07...17 mm,

usvojeno je:  $d = 5 \text{ mm}$ ,  $D_{sr} = 25 \text{ mm}$ ,  $D_v = 30 \text{ mm}$ ,  $D_u = 20 \text{ mm}$ ,  $i_f = 5,5$ ,

$$L_0 = 100 \text{ mm}$$



Slika 5.6 - Karakteristike opruge [13]

$$F = \frac{G \cdot d^4 \cdot f}{8 \cdot D_{sr}^3 \cdot i_f} \rightarrow , \text{ mm [13]} \quad (5.5)$$

gdje je:

$f$ , mm – hod opruge ,

$G$ , N/mm<sup>2</sup> – modul smicanja materijala opruge,

$i_f$  - broj navoja s opružnim djelovanjem,

$D_{sr}$ , mm – srednji promjer navoja,

$d$ , mm – promjer žice,

$L_0$ , mm – duljina opruge.

$$c = \frac{F}{f} = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D_{sr}^3 \cdot i_f}, \text{ N/mm - krutost opruge [13]} \quad (5.6)$$

Dopuštena naprezanja pri promjenjivoj sili iznose:

$$\sigma_{dop} = 0,2 - 0,25\sigma_M \quad (5.7)$$

Potrebno je odrediti krutost opruge  $c$ , maksimalno naprezanje u opruzi te pomak opruge  $f$  (tablica 5.1). Osjenčeno su označeni ulazni parametri u jednadžbe.

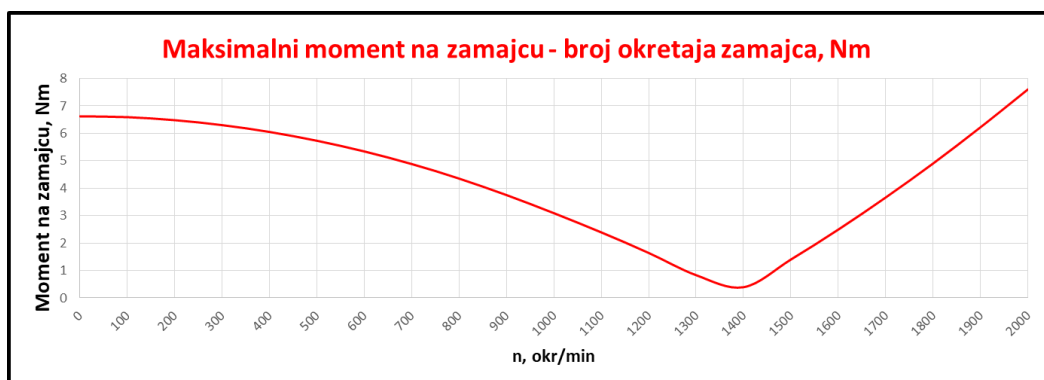
Tablica 5.1 - Proračun opruge [14]

Promjer žice $d$	5 mm
Srednji promjer $D_{sr}$	25 mm
Vanjski promjer $D_v$	30 mm
Unutarnji promjer $D_u$	20 mm
Broj navoja $i_f$	5,5
Sila $F$	1000 N
Modul smicanja $G$	83000 N/mm <sup>2</sup>
Modul elastičnosti $E$	210000 N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća $\sigma_M$	1500 MPa
Hod opruge $f$	13,25 mm
Krutost opruge $c$	75,45 N/mm
Dopušteno naprezanje $\sigma_{dop}$	375 MPa



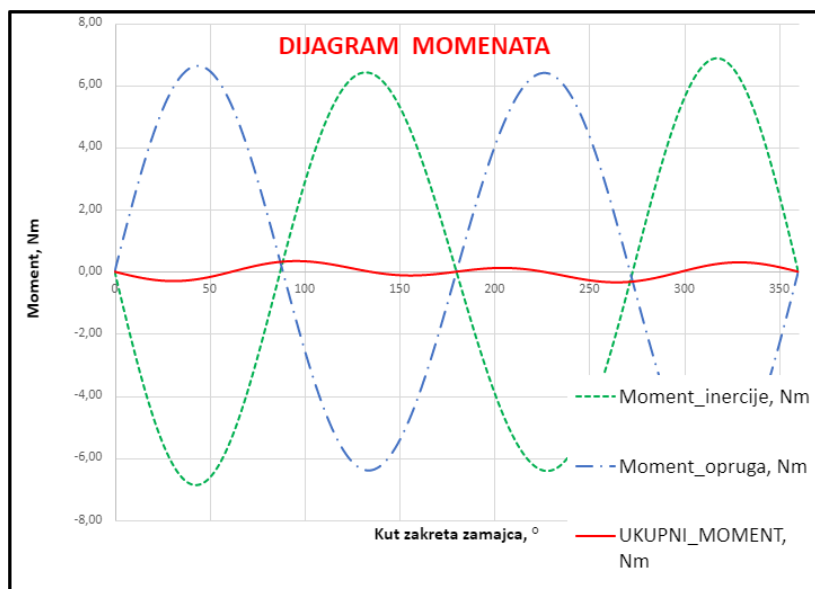
## 5.4. Proračun elektromotora

Elektromotor potreban za pokretanje uređaj treba imat potreban moment te broj okretaja za pokretanje opruga ali i ne prevelik da se ne bi zagrijavao. Primjenom MS Excela [14] generirana je tablica promjene momenta na zamajcu s brojem okretaja pogonskog motora (slika 5.7). Pored sila u opruzi javljaju se i inercijske sile koje stvaraju gibanje pokretnih dijelova.



Slika 5.7- Maksimalni moment na zamajcu[14]

Slika 5.8. prikazuje ukupni moment koji predstavlja moment na zamajcu. Uzet je u obzir i moment na opruzi koji se prikazan plavom iscrtkanom krivuljom a računa se pomoću izraza (5.8). Moment inercije prikazan je zelenom iscrtkanom krivuljom te dobio se uvrštavanjem u izraz (5.9).



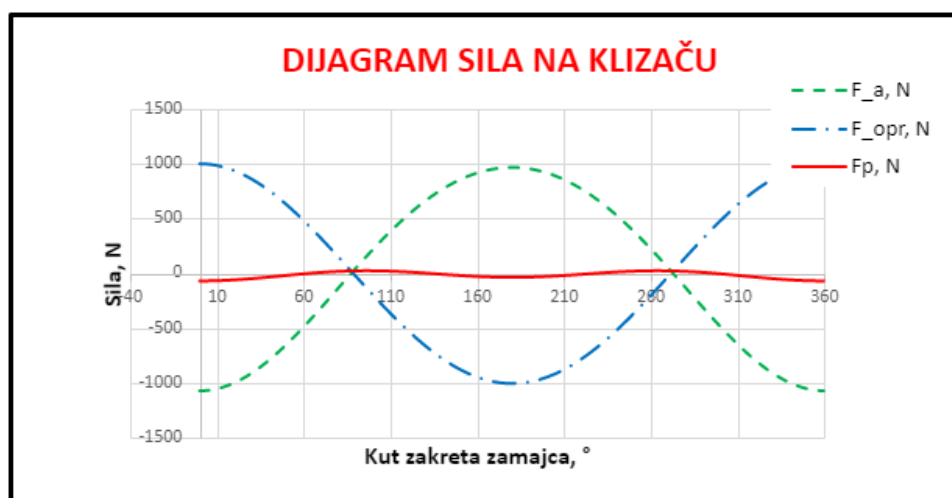
Slika 5.8 - Dijagram momenata [14]

$$M_{opr} = F_p \cdot R \cdot \left[ \sin\theta + \frac{\sin 2\theta}{2 \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2\theta}} \right], [19] \quad (5.8)$$

$$M_{in} = M_{REC} \cdot r^2 \cdot \omega^2 \cdot \left[ \frac{R}{4l} \cdot \sin\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta - \frac{3r}{4l} \sin 3\theta \right], [19] \quad (5.9)$$

R – udaljenost ekscentra od simetrale vratila elektromotora

Sila na klizaču  $F_p$  u izrazu (5.8) dobila se isto generiranjem grafa sila -kut zakreta zamajca (slika 5.9.) primjenom MS Excela [14]. U obzir su uzete aksijalne sile te sile na opruzi.



Slika 5.9 - Graf sila na klizaču [14]

$\theta$ - trenutni položaj ekscentra (kut)

n - odnos duljine klipnjače i hoda opruge

U izrazu 5.9  $M_{REC}$  predstavlja približnu masu klizača i  $\frac{2}{3}$  mase klipnjače.

L – duljina klipnjače

$\omega$  – kutna brzina

$$\omega = \frac{\pi \cdot \text{broj okretaja}}{60} \quad (5.10)$$

Potreban potezni moment na 0 okretaja ispada 6,63 Nm te prema tom momentu se određuje iz Končarovog kataloga (slika 5.10.) elektromotor nazivne snage 0,75kW oznake **5AZ 80B-4**.

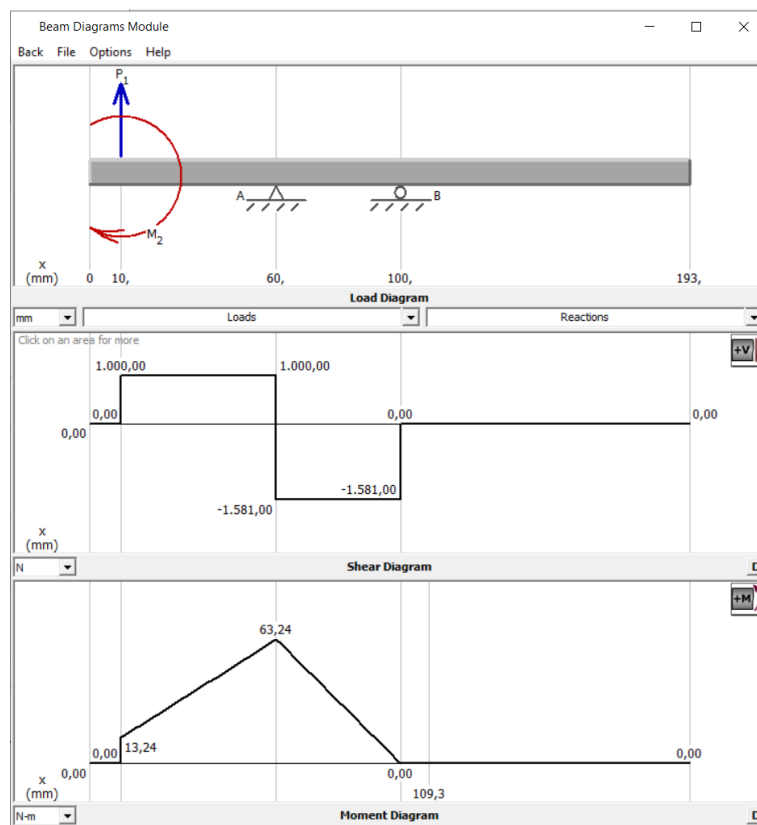
2p=4		1500 min <sup>-1</sup>			400V / 50Hz					B3	440V/60Hz/1800 min <sup>-1</sup>			
P (kW)	Motor type	n (min <sup>-1</sup> )	η (%)	cos φ	I <sub>n</sub> (A)	I <sub>k</sub> / I <sub>n</sub>	M <sub>n</sub> (Nm)	M <sub>k</sub> / M <sub>n</sub>	M <sub>max</sub> / M <sub>n</sub>	J (kgm <sup>2</sup> )	m (kg)	P (kW)	n (min <sup>-1</sup> )	I <sub>n</sub> (A)
0.06	5AZ 56A-4	1415	58	0.62	0.25	2.8	0.4	2.1	2.1	0.0001791	3.1	0.06	1700	0.25
0.09	5AZ 56B-4	1400	58	0.6	0.38	2.6	0.6	1.9	1.9	0.0001791	3.1	0.09	1680	0.35
0.12	5AZH 56B-4	1350	58	0.7	0.41	3	0.85	1.9	1.9	0.0001791	3.2	0.12	1620	0.41
0.12	5AZ 63A-4	1360	58	0.75	0.44	3	0.85	2	2.1	0.0002211	3.4	0.12	1630	0.44
0.18	5AZ 63B-4	1370	60	0.72	0.6	3.3	1.3	2.2	2.4	0.0002948	4.2	0.2	1640	0.6
0.25	5AZH 63B-4	1310	59	0.78	0.8	2.7	1.8	1.8	1.8	0.0002948	4.2	0.3	1570	0.8
0.25	5AZ 71A-4	1370	59	0.71	0.82	3.3	1.75	2	2.2	0.0005	4.8	0.3	1640	0.82
0.37	5AZ 71B-4	1370	66	0.73	1.1	3.4	2.5	2	2.2	0.0006	5.6	0.4	1640	1.1
0.55	5AZ 80A-4	1390	70	0.74	1.5	4	3.8	2	2.2	0.0010	8	0.6	1670	1.5
0.75	5AZ 80B-4	1390	72.1	0.75	1.9	4.3	5.1	2.3	2.4	0.0013	9.2	0.8	1670	1.9
1.1	5AZ 90S-4	1385	75	0.81	2.6	4.2	7.6	2.2	2.4	0.0024	11.3	1.2	1660	2.7

Slika 5.10 - Končarov katalog [15]

Spoj vratila iz elektromotora i vratila sa ekscentra omogućen je dvama prirubnicama uzetih iz po standardu DIN 2501 T1/72. Prirubnice su dimenzija DN 25 PN 40. Radi jednostavnosti crteža u radu je prikazano samo vratilo elektromotora.

## 5.5. Proračun vratila

Za proračun vratila (slika 5.11) potrebno je odrediti materijal, sile u osloncima te amplitudno naprezanje.



Slika 5.11 - Pojednostavljeni prikaz opterećenog vratila

Materijal izabran za izradu vratila je Č1330 uzet je sa slike 5.12. Trajna dinamička čvrstoća pri naizmjeničnom savijanju ( $r = -1$ ):

Tabela 1. Čelici za vratila s podacima statičke i dinamičke čvrstoće

Redni broj	Oznaka čelika	Čvrstoća $R_m$ MPa	Granica plastičnosti $R_{p0.2}$ , $R_{p0.2}$	Jednosmjerna čvrstoća ( $r=0$ ) (MPa)			Naizmjenična čvrstoća ( $r=-1$ ) (MPa)		
				Vlak $R_t$	Savijanje $R_b$	Uvijanje $R_w$	Vlak $R_{-1}$	Savijanje $R_{-1}$	Uvijanje $R_{-1}$
Opći konstrukcijski čelici									
1.	Č.0460	420	240	240	300	150	130	190	110
2.	Č.0545	500	280	280	350	170	160	220	130
3.	Č.0645	600	320	320	400	200	200	280	160
4.	Č.0745	700	350	350	430	220	220	300	170
Poboljšani čelici									
5.	Č.1330	500	300	280	380	200	160	220	130
6.	Č.1430	550	330	330	470	220	200	270	160
7.	Č.1530	630	380	360	520	230	220	300	180
8.	Č.1630	710	430	400	560	260	230	320	170
9.	Č.1730	750	460	420	590	280	240	340	200
10.	Č.3130	700	450	450	630	290	260	360	210
11.	Č.3135	650	450	400	560	270	230	320	180
12.	Č.4130	700	470	450	630	250	260	360	210
13.	Č.4131	800	570	500	700	280	290	400	230
14.	Č.4132	600	350	360	490	220	210	280	170
15.	Č.4134	750	520	440	610	280	250	350	210
16.	Č.4730	700	470	400	560	270	230	320	180
17.	Č.4731	800	570	450	660	280	280	380	220
18.	Č.4732	900	650	550	800	340	320	460	270
19.	Č.4733	900	700	600	870	370	370	500	290
20.	Č.4734	1100	900	650	900	430	370	520	300
21.	Č.5430	900	700	550	890	340	340	480	270
22.	Č.5431	1000	800	600	870	370	360	500	290

Slika 5.12 - Čelici za vratila [16]

$$\sigma_{dop} = 0,2 \cdot R_{-1s} = 0,2 \cdot 220 = 44 \text{ MPa} \quad (5.11)$$

Dopušteno naprezanje vratila računa se po formuli (5.8). Potrebni moment za savladavanje sile u opruzi tj. za pokretanje elektromotora je  $M_t = 6,620 \text{ Nm}$ . Proračun moment je izvršen korištenjem MS Excel tablice [14]. Potrebno je odrediti amplitudno naprezanje na vratilu na dijelu vratila koji se spaja s ekscentar pločom.

Moment savijanja  $M_{sx}$  na udaljenosti  $x$ :

$$M_{sx} = R_A \cdot x \quad (5.12)$$

Naprezanje na savijanje  $\sigma_{sx}$  na udaljenosti  $x$ :

$$\sigma_{sx} = \frac{M_{sx}}{W} = \frac{M_{sx}}{\frac{d^3 \pi}{32}} \leq \sigma_{dop} \rightarrow d_x^3 \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{sx}}{\pi \cdot \sigma_{dop}}} \quad (5.13)$$

Tablica 5.2 - Izračun potrebnih promjera od C do A

x	M <sub>sx</sub>	d <sub>x</sub>
10 mm	1665,5 Nm	7,28 mm
40 mm	66,620 Nm	24,89 mm

Na ležajnom mjestu B pojavljuje se složeno opterećeno na savijanje i torziju te je potrebno izračunati ekvivalentni moment (5.9) i promjeri vratila.

$$M_{ekv} = \sqrt{M_s^2 + \left(\frac{\alpha}{2} \cdot M_t\right)^2}, [16] \quad (5.14)$$

M<sub>s</sub> – moment savijanja

$$\alpha = \frac{R_{-1s}}{R_{p0,2}} \cdot \sqrt{3} = \frac{130}{330} \cdot \sqrt{3} = 0,75 \quad (5.15)$$

α - omjer normalne i posmične čvrstoće za naizmjenično savijanje (r = -1)

$$M_{sx} = R_B \cdot y \quad (5.16)$$

y - udaljenost od točke A .

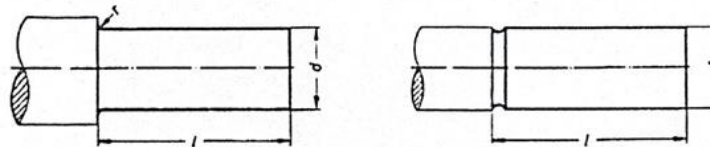
$$\sigma_{ekv} = \sigma_{sx} = \frac{M_{ekv}}{W} = \frac{M_{ekv}}{\frac{d^3 \pi}{32}} \leq \sigma_{dop} \rightarrow d_y^3 \geq \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{ekv}}{\pi \cdot \sigma_{dop}}} \quad (5.17)$$

d<sub>x</sub> – potreban promjer vratila na udaljenosti x od sredine oslonca C

Tablica 5.3 - Izračun potrebnih promjera od točke B do A

y	$M_{sx}$	$M_t$	$M_{ekv}$	$d_x$
20	53,310 Nm	6,620 Nm	53,367 Nm	23,12 mm
40	106,620 Nm	6,620 Nm	106,648 Nm	29,12 mm

Kraj cilindričnog vratila



Primjer označavanja kraja vratila promjera  $d = 65$  mm i duljine  $l = 140$  mm:

Kraj vratila 65x140 DIN 748

d	Toler.	l		r	D d			l			r	d			l			r
		Dugi	Kratki		Niz 1	Niz 2	Toler.	Dugi	Kratki	max		Niz 1	Niz 2	Toler.	Dugi	Kratki	max	
6	j6	16	-	0,6	48	-	k6	110	82	1,6	220	-	m6	350	280	6		
7					50	-					-	240					410	330
8		20	-		55	-		140	105		250	-		470	380			
9					60	-					-	260						
10		23	15		65	-		170	130		280	-		550	450			
11					70	-					-	300						
12		30	18		75	-		210	165		320	-		650	540			
14					80	-					-	340						
16		40	28		85	-		250	200		360	-		800	680			
19					90	-					-	380						
20	50	36	95	-	300	240	400	-	800	680								
22			100	-			-	420										
24	60	42	110	-	350	280	440	-	800	680								
25			120	-			-	450										
28	80	58	-	130	4	6	-	460	800	680								
30			140	-			-	480										
32	k6	80	58	-	1	1	500	-	800	680								
35				160			-	-			530							
38	110	82	-	170	300	240	560	-	800	680								
40			180	-			-	600										
42	110	82	-	190	350	280	630	-	800	680								
45			200	-			-	-										

Slika 5.13 - Krajevi cilindričnih vratila [16]

Kraj vratila je uzet 25x60 DIN 748 po slici 5.13.

Prema tablicama 5.3 i 5.4 te slike 5.13 stupnjevano je vratilo na slici 5.14.

Stupnjevanje vratila:

$$d_1 = 20 \text{ mm}$$

$$d_2 = 20 - 25 \text{ (konus)}$$

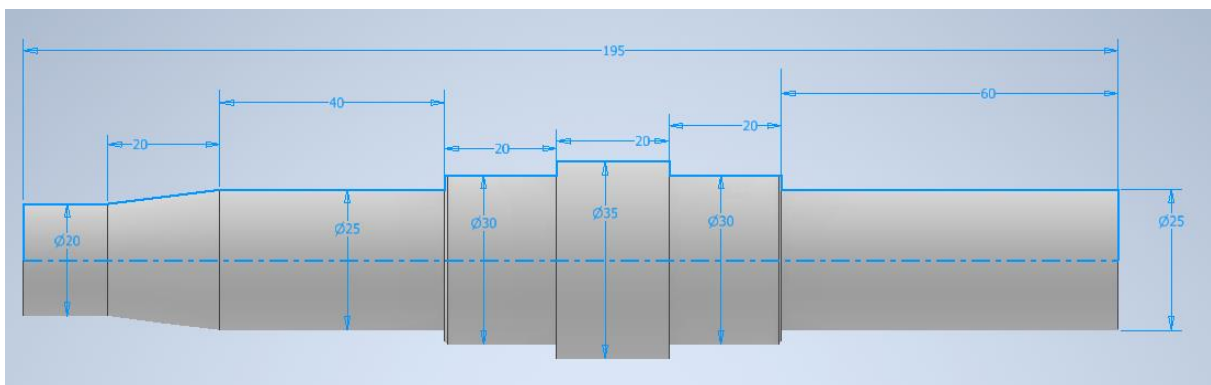
$$d_3 = 25 \text{ mm}$$

$$d_4 = 30 \text{ mm}$$

$$d_5 = 35 \text{ mm}$$

$$d_6 = 30 \text{ mm}$$

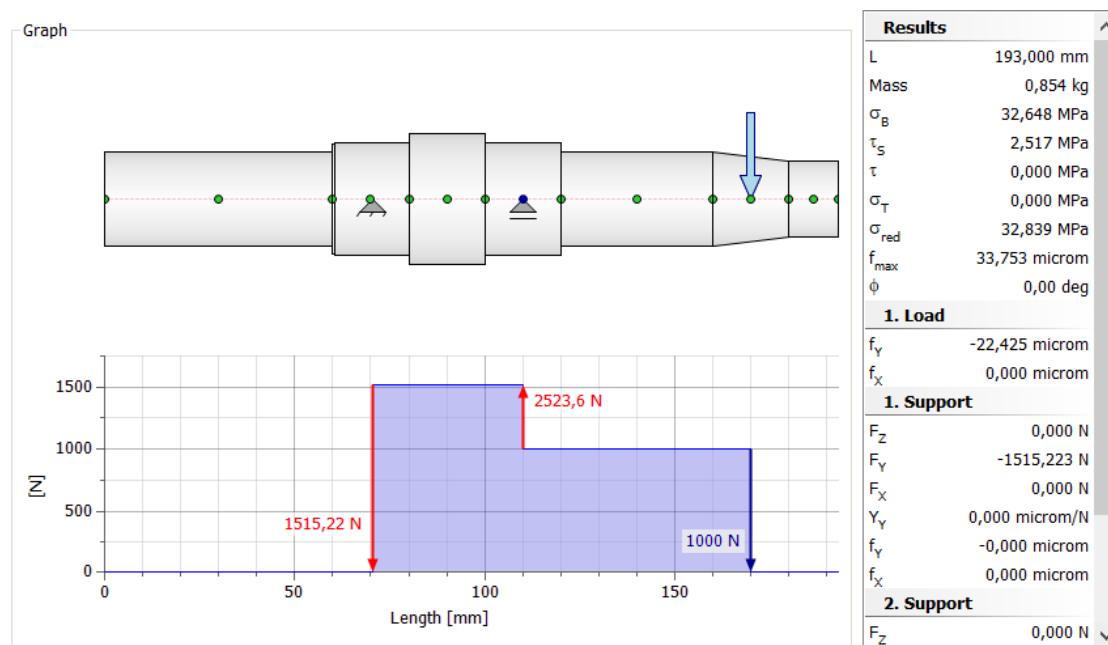
$$d_7 = 25 \text{ mm (kraj vratila)}$$



Slika 5.14 - Vratilo [12]

### 5.5.1. Kontrola čvrstoće vratila

Kontrola čvrstoće vratila izvršila se pomoću programa [12]. Rezultati su prikazani na slici 5.18. Uvjet čvrstoće se vršio po HMH teoriji.



Slika 5.15 - Kontrola čvrstoće vratila [12]

Sa slike u desnoj tablici su generirana maksimalna naprezanja.  $\sigma_B = \sigma_{max}$ . Uvjet čvrstoće vratila glasi

$$\sigma_{dop} \geq \sigma_{max} \quad (5.17)$$

$$44 \text{ MPa} \geq 32,648 \text{ MPa} \quad (5.18)$$

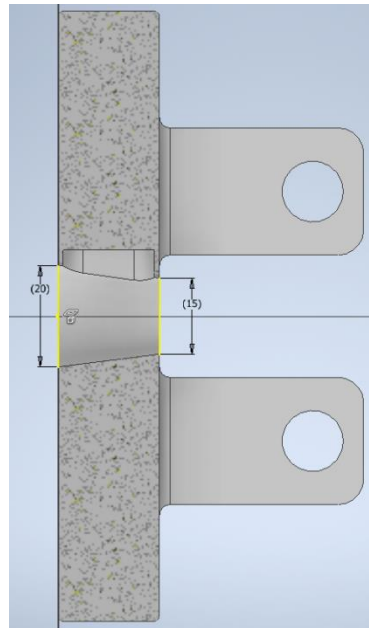
Uvjet zadovoljava

### 5.5.2. Provjera samokočnosti konusa na koji se učvršćuje ekscentar ploča

Spoj vratila s ekscentar pločom izvedeno je pomoću konusa i pera. Za konus je izračunat uvjet samokočnosti. Određen je kut nagiba  $\alpha$  kojim se postiže samokočnost.

$\rho$  - kut trenja između vratila i ekscentra





Slika 5.16 - Utor u centru ploče ekscentra [12]

$$\alpha < 2\rho \text{ - uvjet samokočnosti} \quad (5.19)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{2,5}{20} \rightarrow \frac{\alpha}{2} = 7^{\circ}7'30'' \rightarrow \alpha = 14^{\circ}15'' \quad (5.20)$$

$$\mu = 0,20 \text{ - standardni koeficijent trenja uzet za čelike} \quad (5.21)$$

$$\mu = \operatorname{tg} \rho \text{ - kut trenja} \quad (5.22)$$

$$\rho = 11^{\circ}18'36'' \rightarrow 2\rho = 22^{\circ}37'16'' \quad (5.23)$$

$$\alpha < 2\rho \text{ - uvjet samokočnosti zadovoljava} \quad (5.24)$$

## 5.6. Izbor ležajeva

Izbor ležajeva će ovisiti o iznosima reakcija na tim mjestima. Ležajevi se odabiru i provjeravaju na temelju dinamičke nosivosti. Ležajno mjesto A bit će čvrsto ležajno mjesto (prima aksijalne i radijalne sile) zato što se nalazi na mjestu veće radijalne reakcije, a drugo se izvodi kao slobodno ležajno mjesto (prima samo radijalne sile).

Preporuča se slobodno ležajno mjesto (mjesto A) jednoredni valjkasti ležaj s radijalnim dodirom oznake ISO standardu NU (10, 2, 3, 4) odnosno HRN niz RU (10, 02, 03, 04).

Za čvrsto ležajno mjesto (mjesto B) preporuča se postaviti jednoredni kuglični ležaj oznake niza ISO standardu 60 62 63 odnosno prema HRN niz BC (10, 02, 03, 04).

Oba ležaja osigurati će se uskočnikom na vratilu te s kućištem sa vanjskim uskočnikom.

$$\sum M_B = 0: -R_A \cdot 40 + F \cdot 60 + M_t = 0 \quad (5.25)$$

$$-R_A \cdot 40 + 1000 \cdot 60 + 6620 = 0$$

$$R_A = 1665,5 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0: R_A - R_B + F = 0 \quad (5.26)$$

$$1665,5 - R_B + 1000 = 0$$

$$R_B = 2665,5 \text{ N}$$

Izbor radijalno-aksijalnog ležaja za oslonac B. Potrebna dinamička nosivost ležaja je [16]:

$$C_{pot} = \frac{f_L}{f_n \cdot f_t} \cdot R_B, \text{ kN} \quad (5.27)$$

$f_L$ - faktor trajnosti

$$f_L = \sqrt{\frac{\varepsilon L_h}{500}} \quad (5.28)$$

$L_h = 7000-8000$  - željeni vijek trajanja, h

$\varepsilon = 3$  - eksponent vijeka trajanja za kuglične ležajeve

$$f_L = \sqrt[\varepsilon]{\frac{8000}{500}} = 2,52 \quad (5.29)$$

$f_n$  – faktor brzine vrtnje

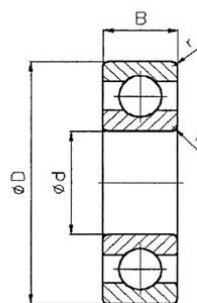
$$f_n = \sqrt[\varepsilon]{\frac{33,3}{n}} = \sqrt[3]{\frac{33,3}{1390}} = 0,29 \quad (5.30)$$

$f_t$ - faktor utjecaja temperature

$$t \leq 120^\circ\text{C} \rightarrow f_t = 1$$

$$C_{pot} = \frac{2,52}{0,29 \cdot 1} \cdot 1665,63 = 14473,75 \text{ N} = 14,47 \text{ kN}$$

Oznaka ležaja	Glavne mjere (mm)				Nosivost (kN)	
	d	D	B	r	Dinamička C	Statička $C_0$
60 04	20	42	12	1	9,3	5
60 05	25	47	12	1	10	5,85
60 06	30	55	13	1,5	12,7	8
60 07	35	62	14	1,5	16,3	10,4
60 08	40	68	15	1,5	16,6	11,6
60 09	45	75	16	1,5	20	14,3
60 10	50	80	16	1,5	20,8	15,6
60 11	55	90	18	2	28,5	21,2
60 12	60	95	18	2	29	23,2
60 13	65	100	18	2	30,5	25
60 14	70	110	20	2	39	31,5
60 15	75	115	20	2	40	34
60 16	80	125	22	2	47,5	40
60 17	85	130	22	2	49	43
60 18	90	140	24	2,5	58,5	50
60 19	95	145	24	2,5	60	54
60 20	100	150	24	2,5	60	54
60 21	105	160	26	3	71	64



Slika 5.17 - Izgled, osnovne dimenzije i nosivost kugličnih ležaja reda 60 [16]

Iz tablice 5.2 odabran je ležaj: **60 07**

Izbor radijalnog ležaja za oslonac B. Potrebna dinamička izdržljivost ležaja A je:

$$C_{pot} = \frac{f_L}{f_n \cdot f_t} \cdot R_B, \text{ kN} \quad (5.31)$$

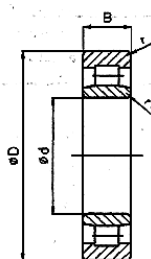
$$\varepsilon = \frac{10}{3} = 3,33 - \text{eksponent za valjkaste ležajeve} \quad (5.32)$$

$$f_L = \sqrt[3,33]{\frac{8000}{500}} = 2,23 \quad (5.33)$$

$$f_n = \sqrt[\varepsilon]{\frac{33,3}{n}} = \sqrt[3,33]{\frac{33,3}{1390}} = 0,33 \quad (5.34)$$

$$t \leq 120^\circ\text{C}, f_t = 1$$

$$C_{pot} = \frac{2,23}{0,33 \cdot 1} \cdot 2665,5 = 18012,32 \text{ N} = 18,01 \text{ kN} \quad (5.35)$$



Oznaka ležaja	Glavne mjere (mm)						Nosivost (kN)	
	d	D	B	r	r <sub>1</sub>	F	Dinamička C	Statička C <sub>0</sub>
NU 10 05	25	47	12	1	0,5	30,5	13,4	12
NU 10 06	30	55	13	1,5	0,8	36,5	16,6	16
NU 10 07	35	62	14	1,5	0,8	42	24,5	26
NU 10 08	40	68	15	1,5	1	47	29	32
NU 10 09	45	75	16	1,5	1	52,5	34,5	39
NU 10 10	50	80	16	1,5	1	57,5	36	41,5
NU 10 11	55	90	18	2	1,5	64,5	41,5	50
NU 10 12	60	95	18	2	1,5	69,5	44	55
NU 10 13	65	100	18	2	1,5	74,5	45	58,5
NU 10 14	70	110	20	2	1,5	80	64	81,5
NU 10 15	75	115	20	2	1,5	85	65,5	85

Slika 5.18 - Izgled, osnovne dimenzije i nosivost valjkastog ležaja tipa NU [16]

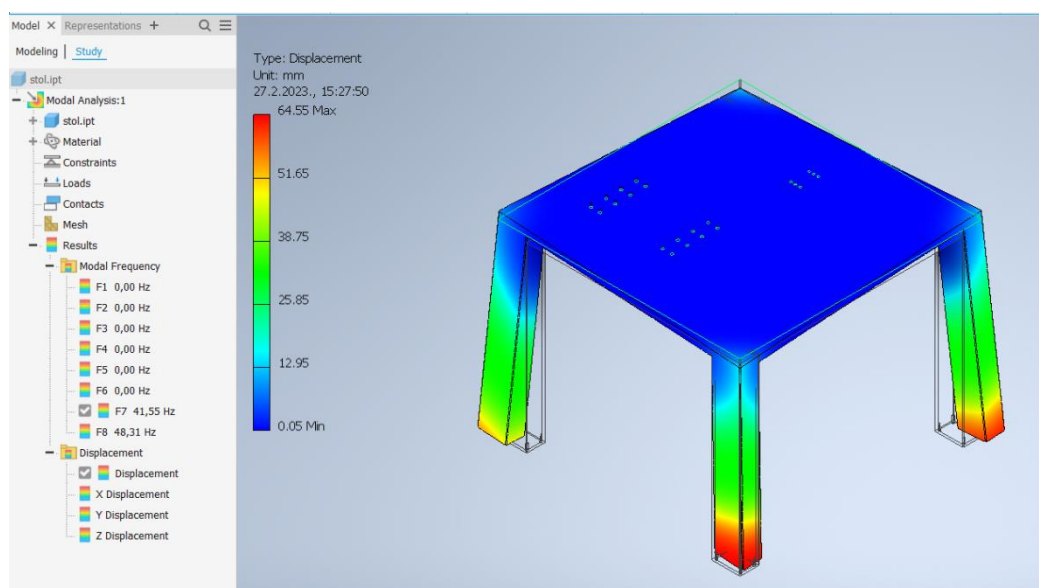
Iz tablice 5.3 odabran je ležaj: **NU 10 07**

Za osiguranje oba ležaja uzimaju se isti uskočnici DIN 471 30x1,5.

Za dodatno osiguranje koristit će se kućište ležajeva u kojima će bit 2 utora za vanjske uskočnike. Uskočnici su automatski generirani za ležajeve. Dobiveni i ugrađena su dva uskočnika DIN 471 56x2.

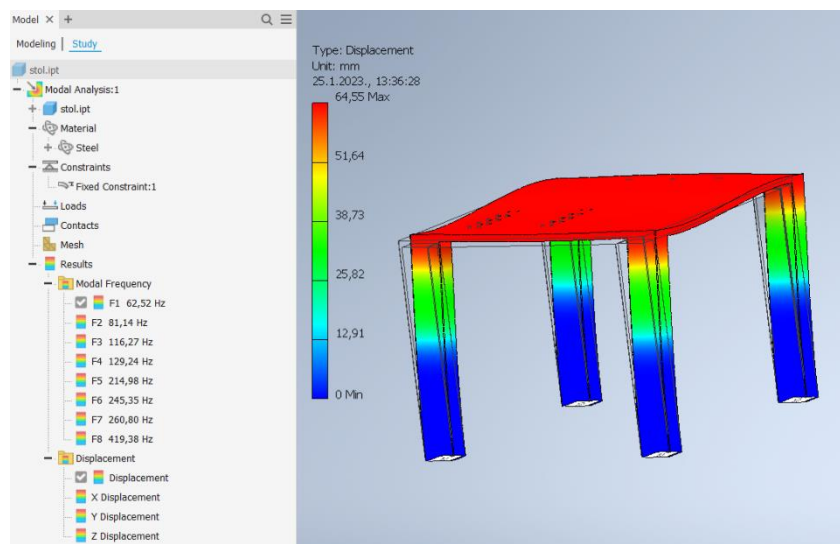
## 5.7. Postolje

Stol je potrebno dimenzionirati da sve stanje na njega i da tokom rada ne dođe do rezonancije i većih amplituda vibriranja. Napravljena je modalna analiza [12] kako bi se odredile vlastite frekvencije vibriranja postolja. Na slici 5.22 prikazane su vlastite frekvencije postolja kada ono nije pričvršćeno za pod. Najniža vlastita frekvencija je 41,63 Hz što odgovara pojavi rezonancije pri broju okretaja vratila od 3360 okr/min. Obzirom da je broj okretaja elektromotora 1390 okr/min neće doći do pojave rezonancije ni pri radnom broju okretaja niti pri pokretanju od 0 do 1390 okr/min (slika 5.12.).



Slika 5.19 - Modalna analiza nepričvršćenog stola [12]

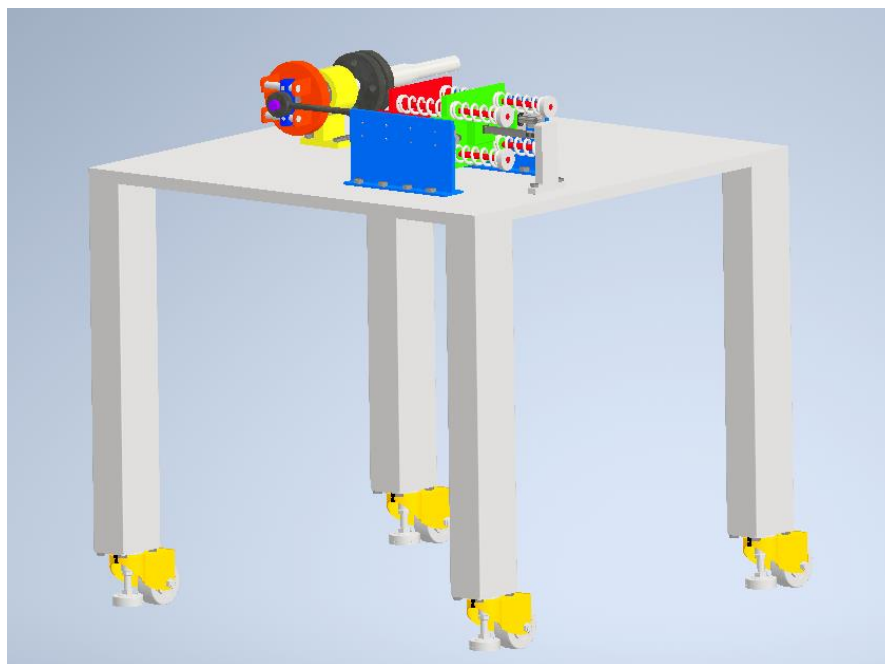
Na slici 5.23 prikazani su rezultati modalne analize za slučaj pričvršćenih nogu postolja za podlogu. U tom slučaju raste minimalna vrijednost vlastite frekvencije koja iznosi 62,52 Hz pri kojoj se javlja rezonancija na 3750 okr/min što znači da bi se mogli koristiti i asinkroni elektromotori s većim brojem okretaja od odabranog. Stol također ima kotače ukoliko ga je potrebno premjestiti, no tokom rada nisu pričvršćeni za pod nego podignuti da ne bi pukli.



Slika 5.20 - Modalna analiza pričvršćenog stola [12]

Slika 5.23. Očito je da bi se (za postojeću konstrukciju postolja) izborom asinkronog elektromotora odgovarajuće karakteristike i broja okretaja 2860 okr/min smanjilo vrijeme do postizanja željene veličine pukotine za dva puta, a bez opasnosti od pojave rezonancije i to za slučaj slobodnih i učvršćenih nogica za podlogu. Učvršćivanjem nogica stola za pod dobiva se čvršći stol te veća vlastita frekvencija koju uređaj ne može dostići tijekom rada.

Na slici 5.24 prikazan je 3D model uređaja sa stolom.



Slika 5.21 - 3D model uređaja i stola [12]

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu konstruiran je i proračunat uređaj za kontrolirano generiranje pukotine. Ovaj uređaj od velike je koristi pri provođenju analize, projektiranja i vrednovanja komponenata prema konceptu mehanike loma.

Metodičkim razvojem proizvoda odabrane su dvije varijante te je nakon provedene tehničke i ekonomske analize izabrana najpovoljnija varijanta za konačan proizvod. Također je odrađena detaljna konstrukcija razrada te proračun svih potrebnih dijelova. Uređaj je dimenzioniran za ispitivanje epruvete materijala aluminijske legure 2014-T4 (dural). Maksimalnu silu od 1000 N održava se primjenom 8 opruga i to 4 vlačne i 4 tlačne opruge. Veličina sila od 1000 N je dobivena analizom maksimalnih napreznja epruvete u području koncentratora u središnjem dijelu. Tom silom se dobije potrebno napreznje za pojavu pukotine uslijed zamora materijala. Kao materijal za izradu opruga je odabran niskolegirani čelik DIN 50CrV 4. Prema veličini sile te poteznom momentu od 1390 okr/min određen je elektromotor snage 0,75 kW. Također je izvršeno dimenzioniranje vratila, te kontrola čvrstoće istog korištenjem programa Autodesk Inventor. Dimenzionirano je postolje uređaja dimenzije 800x800x20 sa 600 mm dugim nogama koje podržavaju masu od 35 kg koliko teži uređaj dok je masa stola 18 kg. Izvršena je i modalna analiza postolja čime je utvrđeno da odabrani motor neće izazvati pojavu rezonancije. Također je utvrđeno i da bi se pričvršćenjem nogu postolja za podlogu broj okretaja motora mogao udvostručiti bez pojave rezonancije što bi skratilo vrijeme generiranja pukotine za dva puta tj. frekvencija do koje bi došlo do rezonancije je 62 Hz (3720 okr/min).

U prilogu su prikazani svi potrebni radionički i sklopni crteži za izradu uređaja.

## 7. Literatura

1. Wikimedia commons, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brittle\\_v\\_ductile\\_stress-strain\\_behaviour.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Brittle_v_ductile_stress-strain_behaviour.png), 9.2022.
2. Rešković,S.: *Ispitivanje materijala*, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
3. Boston University, Mechanical Engineering, *Mechanics of Slender Structures*. Dostupno na <https://www.bd.edu/moss/mechanics-of-materials-strain/>, 12.2022.
4. Strojarski fakultet u Slavskom Brodu, *Materijali za ispitivanje udarne radnje loma*, Slavonski Brod. Dostupno na : <http://brod.sfsb.hr/~ikladar/Materijali%20I/Ispitivanje%20udarne%20radnje%20loma>, 12.2022.
5. Indiamart , <https://www.indiamart.com/proddetail/pendulum-impact-testing-machine-21162642597.html>, 9. 2022.
6. Suarez,H., Sanchez,N.,A., *Design and construction of a precracking for fatigue for the determination of fracture toughness*, SAD, 2006.
7. ISO norme, dostupno na: <https://www.iso.org/standard/3977.html>,<https://www.iso.org/standard/3733.html>, 12.2022.
8. Gabrić I; Slaven,Š : *Materijali 1*, Sveučilište u Splitu, 2012
9. Franz, M: *Mehanička svojstva materijala*, Zagreb, 1998
10. Križan, B: *Metodičko konstruiranje*, Sveučilište u Rijeci, 2007
11. Filetin, T.: *Izbor materijala pri razvoju proizvoda*, Zagreb, 2000
12. Programski paket, *Autodesk Inventor*
13. Decker, K.H.: *Elementi strojeva*, 1980
14. Programski paket: *Microsoft Excel*
15. Končar elektromotori. Dostupno na: <https://koncar-mes.hr/wp-content/uploads/2020/06/katalog-elektromotori-2019-web.pdf>, 12. 2022
16. N. Vulić: *Elementi strojeva*, Sveučilište u Splitu, 2019.
17. S interneta, <https://grabcad.com/>, 12. 2022.
18. Programski paket: *Autodesk AutoCAD*
19. Hailemariam Nigus: *Kinematics and Load Formulation of Engine Crank Mechanism*, 2015.



## Prilozi

1. Sklopni crtež
2. Epruveta
3. Pomični blok
4. Šipke
5. Lijeva strana
6. Krajnji nosač
7. Nepomični blok
8. Graničnik
9. Klipnjača
10. Ekscentar
11. Klizač
12. Vratilo
13. Kućište ležajeva
14. Spoj ekscentar ploče i vratila
15. Prirubnica