

# Grafičke metode sinteze ravninskih zglobno-polužnih mehanizama

---

Rakovac, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:540729>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
TEHNIČKI FAKULTET

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Završni rad

**Grafičke metode sinteze ravninskih zglobno polužnih  
mehanizama**

Mentor: prof. dr. sc. Roberto Žigulić

Komentor: izv. prof. dr. sc. Goranka Štimac-Rončević

Rijeka, siječanj 2024.

Luka Rakovac  
0069086790

## **IZJAVA**

Izjavljujem kako sam ovaj završni rad “Grafičke metode sinteze ravninskih zglobno polužnih mehanizama” napravio samostalno i pod mentorstvom prof. dr. sc. Roberta Žigulića i komentorice izv. prof. dr. sc. Goranke Štimac-Rončević.

## **ZAHVALA**

Ovime bi se htio osobno zahvaliti mojemu mentoru prof. dr. sc. Robertu Žiguliću i komentorici izv. dr. sc. Goranki Štimac Rončević na pomoći i povjerenju prilikom pisanja završnog rada. Zahvalio bi se svojim roditeljima i noni na potpori, pomoći i strpljenju koje su mi pružili prilikom studiranja. Ujedno bi se htio zahvaliti svojim kolegama na savjetima i pomoći tijekom studiranja i na savjetima tokom pisanja završnog rada.

Rijeka, 14. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za tehničku mehaniku**  
Predmet: **Dinamika**  
Grana: **2.15.06 tehnička mehanika (mekanika krutih i deformabilnih tijela)**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Luka Rakovac (0069086790)**  
Studij: **Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva**

Zadatak: **Grafičke metode sinteze ravninskih zglobno-polužnih mehanizama /  
Graphical methods for planar linkages synthesis**


### Opis zadatka:

U završnom radu je potrebno prikupiti, sistematizirati te analizirati dostupne grafičke postupke koji omogućuju uspješnu sintezu ravninskih zglobno-polužnih mehanizama na bazi zglobnog četverokuta. Obraditi metode za generiranje funkcije, putanje i gibanja. U postupcima sinteze mehanizama uzeti u obzir i ograničavajuće uvjete za ostvarenje gibanja kao što su krajnji i mrtvi položaji te kut prijenosa a također obuhvatiti i mehanizmi s brzim povratnim hodom. Nadalje, u završnom je radu potrebno obraditi i grafičke metode za određivanje putanje točaka spreznog člana kao i metode za određivanje tzv. srodnih mehanizama. Za grafički prikaz obrađenih metoda preporuča se korištenje dinamičke matematičke programske platforme tipa Geogebra ili sl.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Robert Žigulić



Izv. prof. dr. sc. Goranka Štimac Rončević  
(komentor)

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:



Izv. prof. dr. sc. Samir Žic

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	6
<b>2. Generiranje funkcije, putanje i gibanja</b>	7
2.1. Funkcija	7
2.2. Putanja	7
2.3. Gibanje	7
<b>3. Ograničavajući uvjeti</b>	9
3.1. Krajnji i mrtvi položaji	9
3.2. Kut prijenosa	9
<b>4. Sinteza</b>	11
4.1. Kvalitativna sinteza	11
4.2. Sinteza tipova	11
4.3. Kvantitativna ili analitička sinteza	12
4.4. Dimenzionalna sinteza	13
<b>5. Dimenzionalne sinteze</b>	14
5.1. Dvopozicijska sinteza	14
5.2. Sinteza s tri pozicije	20
5.3. Sinteza s četiri ili više položaja	30
5.4. Brzopovratni mehanizmi	31
<b>6. Sprežni član i srodni mehanizmi</b>	38
6.1. Roberts-Chebyschey teorem	38
<b>7. Zaključak</b>	41
<b>Popis slika</b>	42
<b>Literatura</b>	43
<b>Sažetak i ključne riječi</b>	44
<b>Summary and key words</b>	45

## 1. Uvod

Dizajniranje u praksi većinom uključuje kombinaciju sinteze i analize. Većina inženjerskih razmatranja uglavnom se bavi tehnikama analize za različite situacije. Analiza je proces proučavanja ili razlaganja nečega kako bi se bolje razumjelo ili procijenilo. Ona se u kontekstu inženjerstva koristi za detaljno ispitivanje struktura, procesa ili problema kako bi se identificirali uzorci, elementi ili povezanost između različitih dijelova ili pojava. Međutim, ništa se ne može analizirati dok ne bude stvoreno sintezom. Sinteza je proces stvaranja ili kombiniranja elemenata ili dijelova kako bi se stvorio novi sustav, proizvod ili koncept. U kontekstu inženjerskog dizajna, sinteza se odnosi na proces stvaranja novih ili poboljšanih proizvoda ili sustava kombiniranjem različitih elemenata ili komponenti. To uključuje identifikaciju potreba, postavljanje ciljeva, generiranje ideja, razmatranje različitih mogućnosti i na kraju oblikovanje konačnog proizvoda ili rješenja koje zadovoljava određene zahtjeve ili specifikacije. Sinteza je ključni korak u procesu dizajna jer omogućuje stvaranje novih i inovativnih rješenja ili proizvoda. Mnogi problemi kod dizajniranja strojeva zahtijevaju stvaranje uređaja s određenim karakteristikama gibanja. Na primjer, postoji mogućnost potrebe premještanja alata iz položaja A u položaj B u određenom intervalu, ili pak praćenje određene putanje u prostoru u svrhu umetanja dijelova u njegov sklop. Mogućnosti su beskrajne, ali česta pojava je potreba za mehanizmom koji upravo generira to traženo karakteristično gibanje. Stoga će u ovome radu biti istražene neke jednostavne tehnike sinteze koje se koriste pri stvaranju potencijalnih rješenja dizajniranja mehanizama za tipične kinematičke primjene.

## 2. Generiranje funkcije, putanje i gibanja

Sinteza se mehanizama sastoji od tri tipa zadataka a to su zadaci generiranja funkcije, generiranja putanje i generiranja gibanja.

### 2.1. Funkcija

Generiranje funkcije definirano je kao povezivanje ulaznog gibanja s izlaznim gibanjem u mehanizmu. Generator funkcije konceptualno je "crna kutija" koja isporučuje predvidljivi izlaz kao odgovor na poznati ulaz. Povijesno gledano, prije pojave elektroničkih računala, mehanički su funkcionalni generatori imali široku primjenu u mjerenju daljine topničkih oruđa sustavima usmjeravanja topova na brodovima i mnogim drugim zadacima. U srži, oni su mehanički analogni računari. Razvoj jeftinih digitalnih elektroničkih mikroručunala za upravljačke sustave, uz dostupnost kompaktnih *servo* i *stepper* motora smanjila se potražnja za ovim mehaničkim generatorima funkcija. Mnoge takve primjene sada se mogu poslužiti ekonomičnije i učinkovitije elektromehaničkim uređajima. Osim toga, računalno upravljiv elektromehanički generator funkcija je programabilan, omogućujući brzu promjenu generirane funkcije s promjenom zahtjeva.[1]

### 2.2. Putanja

Generiranje putanje predstavlja kontrolu točke u ravnini tako da slijedi određenu putanju. To se obično postiže najmanje četirima polugama, pri čemu točka na spojnici slijedi željenu putanju. Valja naglasiti da u generiranju putanje ne dolazi do pokušaja kontroliranja orijentacije veze koja sadrži točku interesa. Međutim, uobičajeno je definirati trenutak dolaska točke na određene lokacije duž putanje. Ovaj slučaj naziva se generiranje putanje s propisanim vremenom i analogan je funkciji generiranja u smislu da je određena izlazna funkcija.[1]

### 2.3. Gibanje

Generiranje gibanja označava kontrolu linije u ravnini tijekom njezina zauzimanja određenog skupa sekvencionalnih položaja, a iznimnu važnost ima orijentacija veze koja sadrži liniju. To je općenitiji problem od generiranja putanje, koja se zapravo svrstava kao podskup generiranja



gibanja. Primjer problema generiranja gibanja je kontrola korpe na bageru. Korpa mora zauzeti niz položaja kako bi iskopao, podigao i istresao iskopanu zemlju. Konceptualno, pokret linije, nacrtan na bočnoj strani korpe, mora biti izveden tako da zauzme željene položaje, a kao rješenje najčešće poslužuje poluga.[1]

### 3. Ograničavajući uvjeti

Grafičke i dimenzijske tehnike sinteze prikazane u ovome radu te računalno analitičke tehnike sinteze relativno su brzi načini dobivanja probnog rješenja za problem upravljanja gibanjem. Nakon pronalaska potencijalnog rješenja nužna je procjena njegove kvalitete, a za nju je potrebno primijeniti brojne kriterije. Međutim, ne valja potrošiti previše vremena na analizu detalja dizajna koji se može pokazati neadekvatnim uz pomoć jednostavnih i brzih evaluacija.

#### 3.1. Krajnji i mrtvi položaji

Jedan od testova koji se može primijeniti unutar navedenih postupaka sinteze je test krajnjih i mrtvih položaja. Potrebno je provjeriti može li se sprežni član zapravo dovesti do svih određenih pozicija dizajna bez da naiđe na krajnju ili mrtvu točku, nazvanu i stacionarna konfiguracija. Postupci sinteze sprežog člana često pružaju samo informaciju da će određene pozicije biti dostignute, no ništa ne govore o ponašanju spežnog člana između tih pozicija. Važno je shvatiti da su takve pozicije neželjene samo ako sprječavaju mehanizam da dođe iz jedne željene pozicije u drugu. U drugim okolnostima, krajnje ili mrtve pozicija mogu biti vrlo korisne. Mogu pružiti samozaključavajuću značajku kada se mehanizam pomakne malo dalje od krajnje pozicije. Svaki pokušaj povratnog pokreta mehanizma tada će ga samo jače zablokirati. Jedni od primjera ove primjene su mehanizmi nogu dasaka za glačanje, kao i mehanizmi stražnjeg dijela *pickup* kamiona ili karavana.[1]

#### 3.2. Kut prijenosa

Još jedan koristan test koji se brzo može primijeniti na dizajn mehanizma kako bismo procijenili njegovu kvalitetu je mjerenje njegovog kuta prijenosa. To se može obaviti analitički ili grafički na crtežnoj ploči ili pomoću 3D modela za grubu procjenu. Kut prijenosa definiran je kao kut između radnog člana i sprežnog člana. Obično se uzima kao apsolutna vrijednost oštrog kuta dva para kutova na presjeku ta dva člana i kontinuirano varira od minimalne do maksimalne vrijednosti dok mehanizam prolazi kroz svoj raspon kretanja. To je mjera kvalitete prijenosa sile i brzine na mehanizmu. Većina konstruktora strojeva nastoji održavati minimalni kut prijenosa iznad otprilike  $40^\circ$  kako bi potaknuli glatko kretanje i dobar prijenos sile. Međutim, ako u našem dizajnu postoji malo ili nimalo vanjske sile ili momenta, možda ćemo moći

ostvariti niže vrijednosti kuta. Kut prijenosa pruža jedan način procjene kvalitete novosintetiziranog mehanizma. Ako nije zadovoljavajući, možemo ga iterirati postupkom sinteze kako bi poboljšali dizajn.[1]

## 4. Sinteza

Kao što se prethodno navelo sinteza je ključan dio stvaranja novih mehanizama. Međutim rijetko kad to uspije iz prvoga pokušaja. Zbog toga može se reći kako je sinteza iterativan postupak. Razlikuju se nekoliko vrsta sinteza:

1. Kvalitativna sinteza
2. Sinteza tipova
3. Kvantitativna sinteza ili analitička sinteza
4. Dimenzionalna sinteza

### 4.1. Kvalitativna sinteza

Kvalitativna sinteza podrazumijeva stvaranje potencijalnih rješenja u odsutnosti dobro definiranog algoritma koji konfigurira ili predviđa rješenje. Budući da će većina stvarnih problemskih situacija imati puno više nepoznatih varijabli nego što će biti jednadžbi koje opisuju ponašanje sustava, nije moguće jednostavno riješiti jednadžbe kako bi se dobilo rješenje. Ipak, nužno je raditi u ovom neodređenom kontekstu kako bi se stvorilo potencijalno rješenje i procijenila njegova kvaliteta. Zatim analiziramo predloženo rješenje kako bi se odredila njegova izvodljivost i iteracijom između sinteze i analize, kako je prethodno navedeno, dok zadovoljavajući restoran ne bude ostvaren.[1]

### 4.2. Sinteza tipova

Sinteza tipova odnosi se na definiranje odgovarajućeg tipa mehanizma koji najbolje odgovara problemu i predstavlja oblik kvalitativne sinteze. Ovaj oblik sinteze zahtijeva određeno iskustvo i poznavanje različitih vrsta mehanizama koji postoje, kao i onih koji su izvedivi s aspekta performansi i proizvodnje.[1]

Primjerice, pretpostavi se da je zadatak dizajniranje uređaja koji prati ravnu putanju kretanja dijela na pokretnoj traci i prskanje tog dijela kemijskim premazom tijekom njegova prolaženja. Ovo se mora obavljati pri visokoj, konstantnoj brzini, uz visoku preciznost i ponovljivost, te pouzdanost, uz pritom niske troškove. Konstruktor koji nema iskustva nije imao priliku proučiti

širok spektar mehaničke opreme te možda neće biti svjesna da se ovakav zadatak može izvoditi pomoću nekoliko različitih uređaja, kao što su:

1. ravan mehanizam:
  - prednosti: jednostavno rješenje za pravocrtno kretanje
  - nedostaci: velika veličina i neželjena ubrzanja mogu biti problematični
2. bregasta osovina i prateći element:
  - prednosti: precizno i ponovljivo
  - nedostaci: troškovi mogu biti visoki
3. pneumatski cilindar:
  - prednosti: relativno jeftino
  - nedostaci: buka i nepouzdanost mogu biti problemi
4. hidraulički cilindar:
  - prednosti: može biti snažan
  - nedostaci: troškovi mogu biti visoki
5. robot:
  - prednosti: može pružiti raznolike funkcionalnosti
  - nedostaci: skuplje od ostalih opcija
6. solenoid:
  - prednosti: jednostavan i jeftin
  - nedostaci: može imati visoka udarna opterećenja i visoku brzinu udara

Svako od ovih rješenja, iako moguće, možda nije optimalno ili čak praktično. Potrebno je znati više detalja o problemu kako bi se donijela takva prosudba, a ti će detalji doći iz istraživačke faze procesa dizajna. Loš odabir u fazi sinteze tipa može stvoriti nerješive probleme kasnije. Dizajn bi možda morao biti odbačen nakon završetka, uz velike troškove. Svaka predložena vrsta rješenja u ovom primjeru ima dobre i loše strane. Rijetka su jasna i očigledna rješenja stvarnog inženjerskog dizajnerskog problema.

#### **4.3. Kvantitativna ili analitička sinteza**

Kvantitativna ili analitička sinteza označava generiranje jednog ili više rješenja određenog tipa za kojeg je poznato da odgovara problemu, a još važnije, za koji postoji definiran algoritam

sinteze.[1] Ovakav tip rješenja može se kvantificirati jer postoje određene jednačbe koje će dati numerički odgovor. Hoće li taj odgovor biti dobar ili prikladan još uvijek je stvar procjene dizajnera i zahtijeva analizu i iteriranje kako bi se optimizirao dizajn. Često je broj dostupnih jednačbi manji od broja potencijalnih varijabli, u kojem slučaju se mora pretpostaviti neke razumne vrijednosti za dovoljan broj nepoznatih jednačbi kako bi se smanjio preostali skup na broj dostupnih jednačbi. Stoga u ovom slučaju u sintezu ulazi i određena kvalitativna procjena. Osim za vrlo jednostavne slučajeve, potreban je CAE alat za kvantitativnu sintezu. "CAE alati" su softverski alati koji omogućuju inženjerima simuliranje, analizu i vizualizaciju složenih sustava ili procesa kako bi se razumjelo njihovo ponašanje bez potrebe za fizičkim eksperimentiranjem ili izradom prototipa. Ovi alati uključuju programe za analizu naprezanja, dinamike fluida, termalne analize, simulacije mehanizama, elektromagnetske simulacije. Primjeri CAE alata uključuju softvere poput AutoCAD-a, CATIA-e, ANSYS-a, SolidWorks-a, MATLAB-a i drugih specijaliziranih aplikacija. Ti računalni programi također omogućuju obavljanje analitičke sinteze u tri pozicije i opći dizajn zglobno-polužnih mehanizama putem sukcesivne analize. Brzo računanje ovih programa omogućuje analizu performansi mnogih probnih mehanizama u kratkom vremenu i potiču bržu iteraciju do boljeg rješenja.

#### **4.4. Dimenzionalna sinteza**

Dimenzionalna sinteza zglobno-polužnih mehanizama je određivanje proporcija tj. dimenzije članova mehanizama potrebnih za izvođenje željenih pomaka i može biti oblik kvantitativne sinteze ako je algoritam definiran za određeni problem, ali može biti i oblik kvalitativne sinteze ako postoji više varijabli nego jednačbi. Ova druga situacija je češća za zglobno-polužne mehanizame. Dimenzionalna sinteza pretpostavlja određivanje kroz sintezu tipova da je zglobno-polužni mehanizam najprikladnije rješenje za problem te će u ostatku rada biti objašnjeni načini izvođenja grafičke dimenzionalne sinteze.[1]

## 5. Dimenzionalne sinteze

Dimenzionalna sinteza zglobno-polužnih mehanizma kao što je prethodno navedeno određuje dimenzije tih mehanizama potrebnih za izvođenje željenih pomaka. Kroz sintezu tipova odredili smo da je zglobno polužni mehanizam najprikladnije rješenje problema. Postoji mnogo tehnika koje se koriste za izvođenje dimenzijske sinteze četveročlanog mehanizma. Najjednostavnije i najbrže metode su grafičke. One dobro funkcioniraju ako ima 3 ili manje pozicija. Za više od tog broja, obično je potreban numerički, analitički pristup sintezi. Također jedan od velikih prednosti ove sinteze je njezina jednostavnost crtanja jer se bazira na Euklidovoj geometriji, a za njezino izvršavanje potreban je osnovni pribor za geometrijsko crtanje kao što su kutomjer, ravnalo i šestar.

### 5.1. Dvopozicijska sinteza

Dvopozicijska sinteza dijeli se na dvije kategorije, a to su izlazno gibanje radnog člana (*rocker*) i izlazno gibanje sprežnog člana (*coupler*). Izlazno gibanje radnog člana odnosi se na vrstu pokreta ili izlaznog gibanja koji je čisti okret, gdje se izlazna funkcija definira kao diskretni kutni položaji radnog člana.[1] Ovo je tipično karakteristično za Grashofov zglobni četverokut, gdje se pozicije radnog člana definiraju kao rezultat generacije funkcije. U slučaju izlaznog gibanja radnog člana, kretanje je ograničeno na rotacijski pokret između dvije diskretne pozicije, što rezultira čistim okretom radnog člana.[2] Ovaj tip gibanja koristi se u različitim mehanizmima i strojevima gdje je potreban precizan rotacijski pokret s definiranim kutnim položajima. Izlazno gibanje sprežnog člana predstavlja vrstu gibanja ili izlazno kretanje koje nije čisti okret, već složeniji oblik gibanja.[1] U ovom slučaju, izlazna funkcija definira dvije pozicije linije u ravnini kao rezultat generacije funkcije. To rezultira složenijim oblicima gibanja, gdje se kretanje sprežnog člana ne ograničava samo na rotacijske pokrete između diskretnih kutnih pozicija, već može uključivati i translacijske ili drugačije kompleksne oblike gibanja.[2] Izlazno gibanje sprežnog člana je općenitiji od izlaznog gibanja radnog člana i koristi se za različite vrste mehanizama gdje je potrebno definirati gibanje linija ili više složene putanje kretanja, kao što su na primjer mehanizmi koji obavljaju više funkcija istovremeno ili složeniji strojevi koji zahtijevaju specifične obrasce gibanja. Ova solucija često rezultira *triple-rockerom*. Međutim, četveročlani *triple-rocker* može biti pogonjen motorom dodavanjem dijada. Dijada predstavlja osnovnu strukturu koja se sastoji od dva povezana člana ili veze, što

konačni rezultat čini Wattovim šesteročlanim sustavom koji sadrži Grashofov četveročlani sustav kao podlanac.

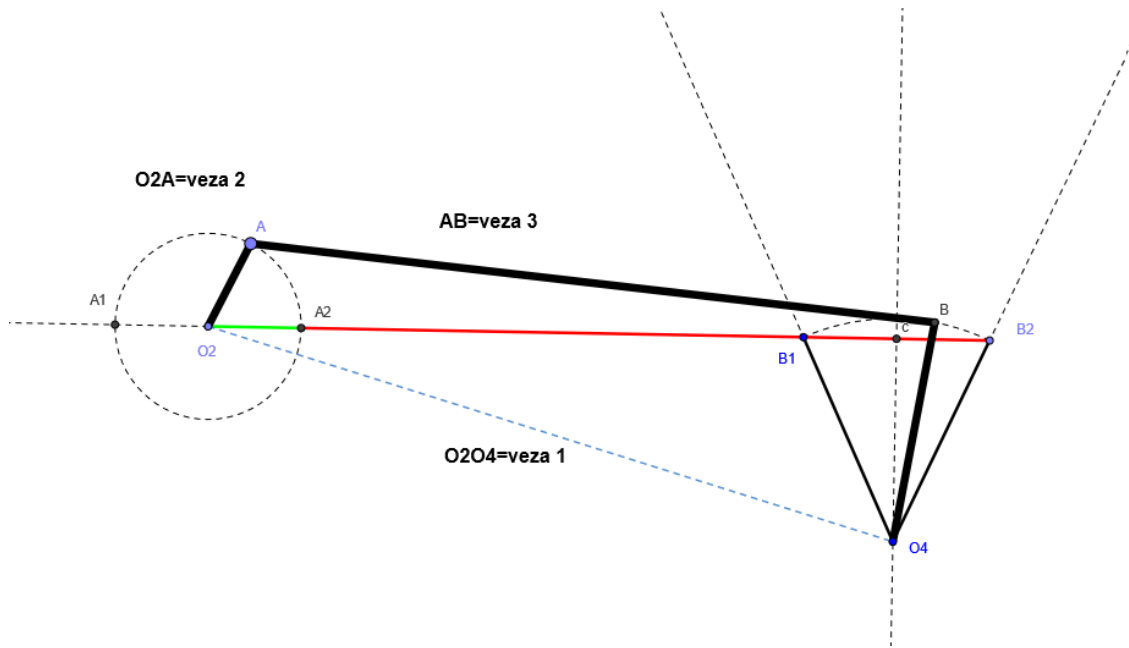
#### 5.1.1. Dvije pozicije s kutnim pomakom – Izlazno gibanje radnog člana[3]

Dizajn će se ostvariti pomoću četveročlanog Grashof zglobni četverokut koji će omogućiti  $45^\circ$  rotacije njihala s jednakim vremenom prema naprijed i prema natrag, koristeći konstantnu brzinu motora.

Opis konstrukcije:

1. Nacrta se izlazna veza  $O_4B$  u obje krajnje pozicije,  $B_1$  i  $B_2$  na bilo kojem prikladnom mjestu tako da se željeni kut gibanja  $\theta_4$  obuhvaća.
2. Nacrta se linija kroz točke  $B_1B_2$  i produži se u bilo kojem smjeru.
3. Odaber se prikladna točka  $O_2$  na produžetku linije  $B_1B_2$ .
4. Dužina  $B_1B_2$  podijeli se na pola i nacrtaj se krug oko  $O_2$  čiji je radijus polovica dužine  $B_1B_2$ .
5. Označe se dva presjeka kruga i produžetka linije  $B_1B_2$  kao  $A_1$  i  $A_2$ .
6. Izmjeri se duljina spojnice kao  $A_1$  do  $B_1$  ili  $A_2$  do  $B_2$ .
7. Izmjeri se duljina podloge 1, duljina sprežnog člana 2 i duljina radnog člana 4.
8. Ako je Grashofov uvijet zadovoljen završena je konstrukcija, ako nije ponavljaju se koraci od 3 do 8 s  $O_2$  dalje od  $O_4$ . Grashof uvijet je zadovoljen u slučaju kada je zbroj dužine  $O_4O_2$  i dužine  $O_2A$  manji ili jednak zbroju dužina  $AB$  i  $O_4B$ [2]





Slika 1 Dvopozicijska sinteza s radnim članom

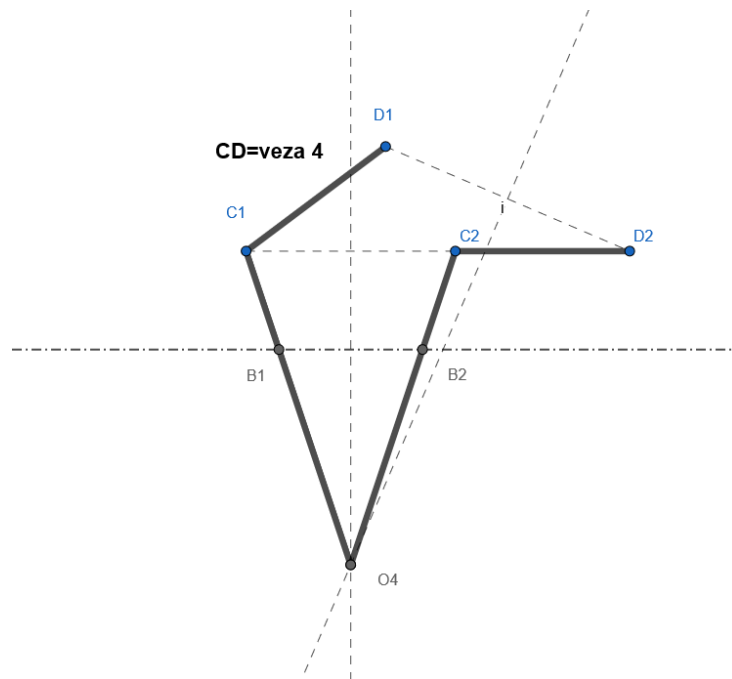
Počelo se s izlaznom stranom sustava, jer je to bio jedini aspekt definiran u postavci problema. Moraju se donijeti proizvoljne odluke i pretpostavke kako bi se nastavilo jer je bilo mnogo više varijabli nego što se moglo pružiti "jednadžbi". Dizajneri su često prisiljeni donositi "slobodne izbore" oko "pogodnog kuta ili duljine". Ti slobodni izbori zapravo definiraju parametre dizajna. Loš izbor rezultirat će lošim dizajnom. Stoga se ovi pristupi smatraju kvalitativnim sintezama i zahtijevaju iterativni proces iako se primjer činio jednostavnim kao ovaj. Prvo rješenje koje se postigne vjerojatno neće biti zadovoljavajuće, i očekuje se da će biti potrebno nekoliko iteracija. S većim iskustvom u dizajniranju dinamičko-kinematičkih rješenja povećava se sposobnost da za boljim odabirima za ove parametre s manje iteracija.

### 5.1.2. Dvije pozicije s kompleksnim pomakom – Izlazno gibanje radnog člana[3]

Dizajn je vrlo sličan prijašnjem primjeru uz dodatne veze C i D

Opis konstrukcije:

1. Nacrta se veza CD u njenim dvama željenim položajima,  $C_1, D_1$ , do  $C_2, D_2$ , u ravnini kako je prikazano na slici 2.
2. Nacrtaju se linije ograničenja od točke  $C_1$  do  $C_2$  i od točke  $D_1$  do  $D_2$ .
3. Nađu se polovica linije  $C_1C_2$  i linije  $D_1D_2$  te se produže njihove okomite djelatitelje da se sijeku u točki  $O_4$ . Njihovo sjecište je os rotacije
4. Odabere se prikladan radijus i nacrta luk oko osi rotacije da presijeca i linije  $O_4C_1$  i  $O_4C_2$ . Sjecišta označimo kao  $B_1$  i  $B_2$ .
5. Ostatak se može dizajnirati po primjeru 5.1.1. od točke 2 do točke 8



Slika 2 Dvopozicijska sinteza s kompleksnim pomakom-primjer radnog člana

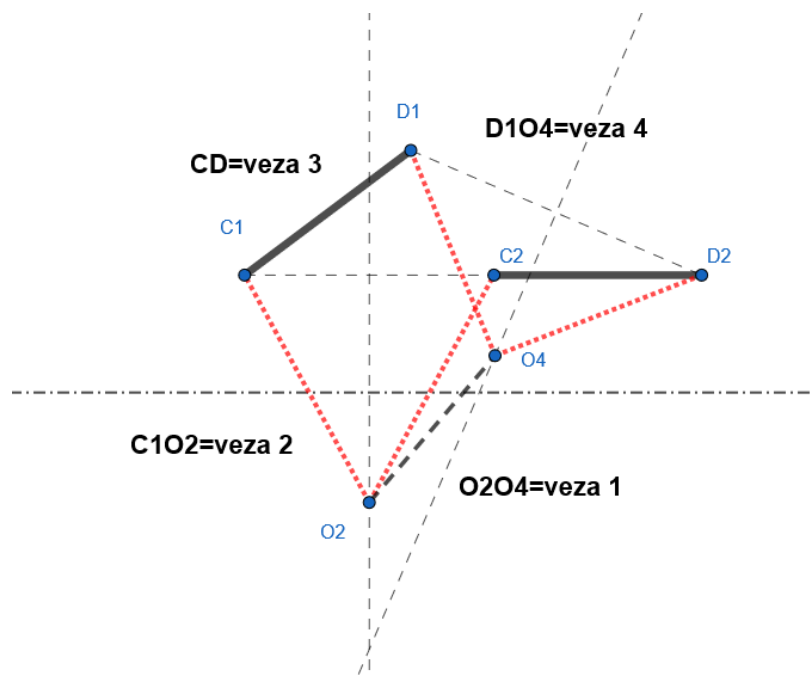
Može se primijetiti da se ovaj primjer svodi na metodu iz primjera 5.1.1. kada se pronade os rotacije. Stoga, veza predstavljena linijom u složenom gibanju može se svesti na jednostavniji problem čiste rotacije i pomicati na bilo koja dva položaja u ravnini kao radni član na četveročlanjoj vezi.

### 5.1.3. Dvije pozicije s kompleksnim pomakom-Izlazno gibanje sprežnog člana[3]

Zadatak je dizajnirati četveročlanu vezu kako bi se linija CD pomaknula s položaja  $C_1D_1$  na  $C_2D_2$  s rotacijskim zglobovima na C i D.

Opis konstrukcije:

1. Nacrta se veza CD u svoja dva željena položaja,  $C_1D_1$  i  $C_2D_2$ , u ravnini kako je prikazano.
  2. Nacrtaju se konstrukcijske linije od točke  $C_1$  do  $C_2$  i od točke  $D_1$  do  $D_2$ .
  3. Nađe se sredina linija  $C_1C_2$  i  $D_1D_2$  i produžuju se okomite središnjice u prikladnim smjerovima. U ovom rješenju os rotacije se neće koristiti.
  4. Odabere se bilo koju prikladnu točku na svakoj središnjici kao fiksni oslonac  $O_2$  i  $O_4$ .
  5. Poveže se točka  $O_2$  s  $C_1$  i nazove se vezom 2. Povežu se  $O_4$  i  $D_1$  te se nazove to vezom 4. Linija  $C_1D_1$  je veza 3. Linija  $O_2O_4$  je veza 1.
  6. Provjeri se Grashofovo pravilo i ponove se koraci od 4. do 7. ako nije zadovoljen.
- Napomena: Bilo koje Grashofovo stanje je potencijalno prihvatljivo u ovom slučaju.



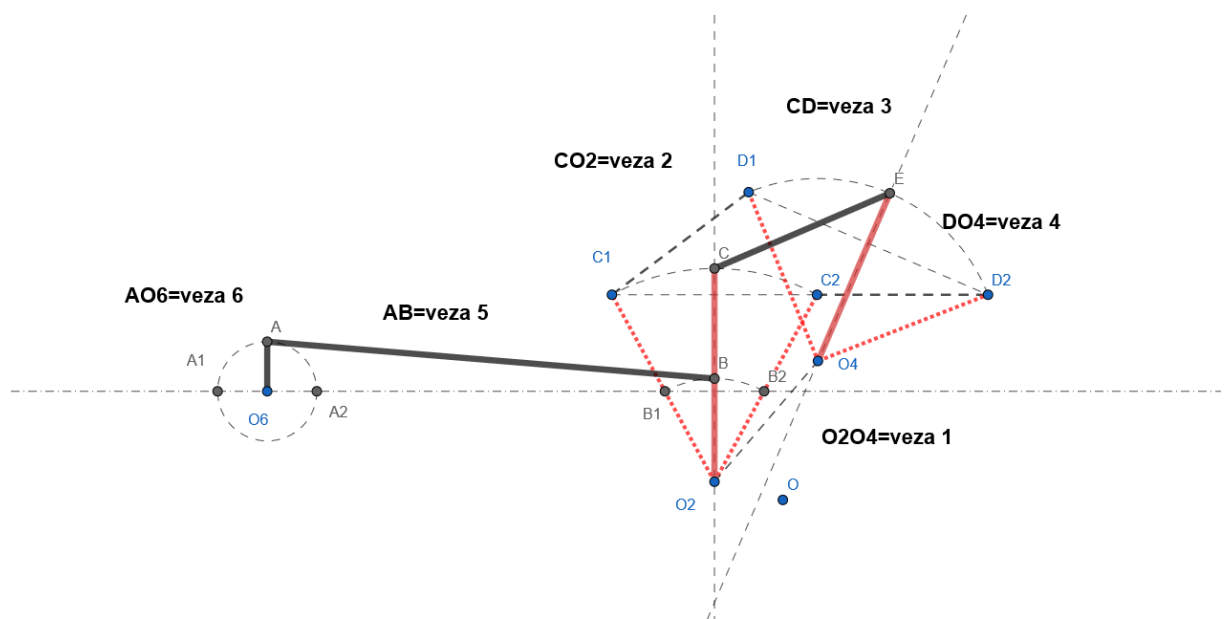
Slika 3 Dvopozicijska sinteza s kompleksnim pomakom-sinteza sprežnog člana

#### 5.1.4. Dodavanje Dijade (lanca s dvije veze) za kontrolu pokreta u prijašnji primjer 5.1.3.[1]

Cilj je dizajnirati dijadu za kontroliranje i ograničavanje krajnjih položaja kretanja veze u primjeru 5.1.3. na njegova dva dizajnerska položaja.

Opis konstrukcije:

1. Odabere se prikladna točka na vezi 2 mehanizma dizajniranog u primjeru 5.1.3. Napomena: Ne mora biti na liniji  $O_2C_1$ . Označimo je kao točku  $B_1$ .
2. Nacrta se luk oko centra  $O_2$  kroz točku  $B_1$  koja presjeca odgovarajuću liniju  $O_2B_2$  u drugom položaju veze 2. Označi se točka kao  $B_2$ . Luk između  $B_1$  i  $B_2$  postavlja nam isti problem kao u primjeru 5.1.1.
3. Ponove se koraci od 2 do 9 iz primjera 5.1.1. kako bi se dovršio mehanizam, osim umjesto veza 2 i 3 te centra  $O_2$  dodati će se veze 5 i 6 i centar osi  $O_6$ .
4. Veza 6 bit će pokretački segment. Veze  $O_6, A_1, B_1, O_2$  moraju zadovoljavati Grashofov uvijet.



Slika 4 Dijada sa kompleksnim pomakom sprežnog člana

Primjer 5.1.1. može se iskoristiti kako bi dodali dijadu kao upravljačku fazu za naš postojeći četveročlani mehanizam. To rezultira šesteročlanim Wattovim mehanizmom čija je prva faza Grashofov, kao što je prikazano na Slici 4. Dakle, ovaj mehanizam se može pokretati pomoću

motora na vezi 6. Također, centar motora  $O_6$  može se smjestiti bilo gdje u ravnini odabirom točke  $B_1$  na vezi 2. Ako bi se postavila  $B_1$  ispod centra  $O_2$ , motor bi bio s desne strane veza 2, 3 i 4, kako je prikazano na Slici 4.

## 5.2. Sinteza s tri pozicije

Sinteza s tri pozicije može se podijeliti u nekoliko vrsta:

1. Sinteza s tri položaja s definiranim pomičnim sprežnim članom
2. Sinteza s tri položaja s zamjenskim položajima rotacijskih globova
3. Sinteza s tri položaja s stalnim fiksnim osloncima

### 5.2.1. Sinteza s tri položaja s definiranim pomičnim sprežnim članom

Sinteza s tri položaja s definiranim pomičnim spojnica omogućuje definiranje tri položaja linije u ravnini i stvaranje konfiguracije četveročlanog mehanizma da je premjesti na svaki od tih položaja. Ovo je problem generiranja gibanja. Sinteza logično proizlazi iz metode korištene u primjeru 5.1.1. za sintezu s dva položaja s izlaznim gibanjem sprežnog člana. Rezultirajući mehanizam može biti bilo koje Grashofove vrste i obično će zahtijevati dodavanje dijade kako bi se kontroliralo i ograničilo njegovo kretanje na položaje od interesa.[2]

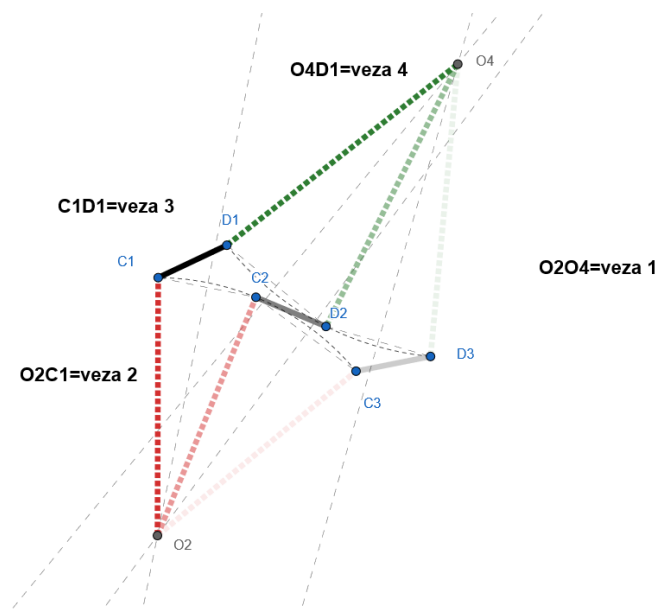
#### 5.2.1.1. Tri položaja s kompleksnim pomakom.[3]

Dizajnira se četveročlani mehanizam kako bi premjestili vezu  $CD$  s pozicije  $C_1D_1$  do  $C_2D_2$ , a zatim na poziciju  $C_3D_3$ . Zglobovi su  $C$  i  $D$ .

Opis konstrukcije:

1. Nacrta se veza  $CD$  u njezine tri projektirane pozicije  $C_1D_1$ ,  $C_2D_2$ ,  $C_3D_3$  u ravnini kako je prikazano na slici 5.
2. Nacrtaju se konstrukcijske linije od točke  $C_1$  do  $C_2$  i od točke  $C_2$  do  $C_3$ .

3. Presječu se napola linije  $C_1C_2$  i  $C_2C_3$  i produže njihove okomite središnjice dok se ne sijeku. Presjecište se označi kao točka  $O_2$ .
4. Ponove se koraci 2 i 3 za linije  $D_1D_2$  i  $D_2D_3$ . Presjek označimo kao  $O_4$ .
5. Povežu se točke  $O_2$  i  $C_1$  te se nazove vezom 2. Povežu se  $O_4$  i  $D_1$  te se to nazove spojnicom 4.
6. Linija  $C_1D_1$  je spojnica 3. Linija  $O_2O_4$  je veza 1.
7. Provjeri se Grashofov uvjet iako bilo koji Grashov uvjet je potencijalno prihvatljiv u ovom slučaju.



Slika 5 Sinteza s 3 pozicije

Iako je rješenje obično dostupno za ovaj slučaj, moguće je da neće moći neprekidno premještati mehanizam s jedne pozicije na drugu bez rastavljanja veza i ponovnog sastavljanja kako bi prošao kroz ograničavajuću poziciju. To će očitito biti nezadovoljavajuće te će se morati naći neko drugo rješenje.

### 5.2.2. Sinteza s tri položaja s zamjenskim položajima rotacijskih zglobova

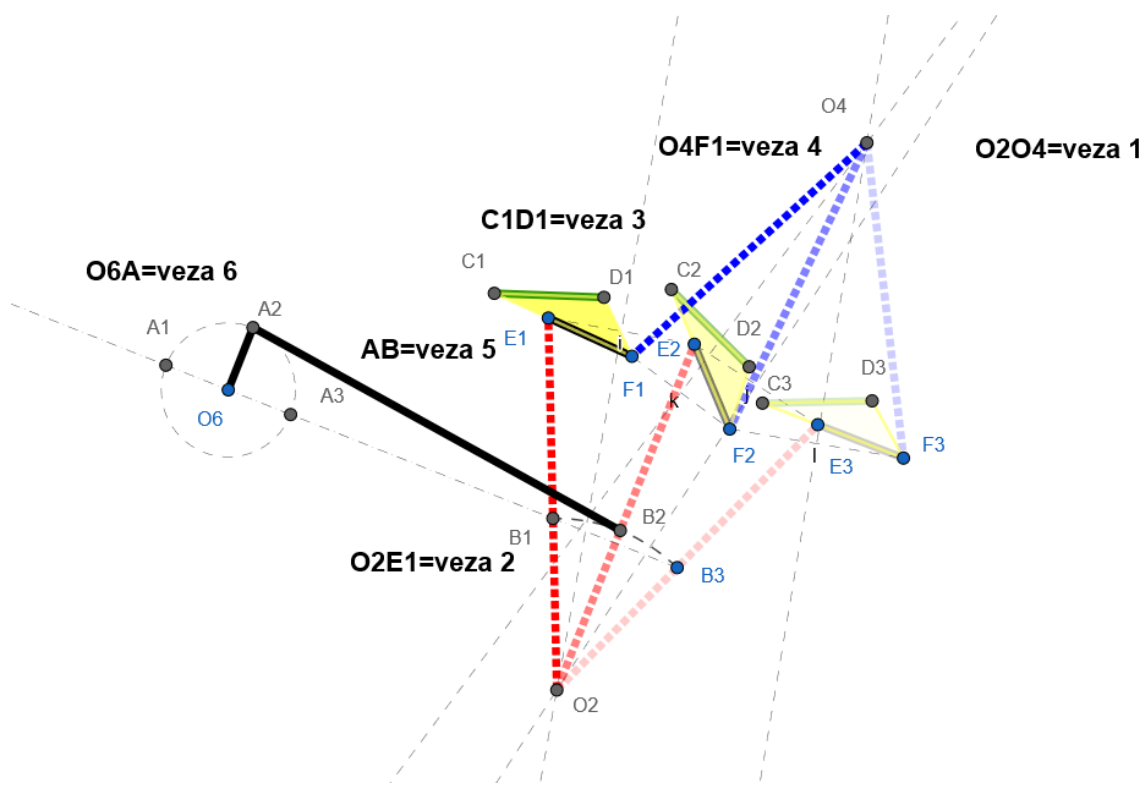
Drugi potencijalni problem je mogućnost nepoželjne lokacije fiksnih osi  $O_2$  i  $O_4$ . Na primjer, ako se fiksna osovina za dizajn brisača vjetrobranskog stakla završi usred vjetrobranskog stakla, možda ga se treba ponovno dizajnirati. Idući primjer pokazuje način dobivanja alternativne konfiguracije za isto trostupanjsko kretanje kao u primjeru 5.2.1.1..

### 5.2.2.1. Tri pozicije s kompleksnim pomakom - Alternativne točke pričvršćivanja za okretne zglobove - Izlazno gibanje sprežnog člana [3]

Cilj je dizajnirati zlobni četverokut kako bi se vezu CD pomaknulo iz položaja  $C_1D_1$  do  $C_2D_2$ , a zatim do položaja  $C_3D_3$  koristeći različite pokretne oslonce od CD-a.

Opis konstrukcije:

1. Nacrta se poveznica CD u njezine tri željene pozicije  $C_1D_1$ ,  $C_2D_2$ ,  $C_3D_3$ , u ravnini kao što je učinjeno u prijašnjem primjeru
2. Definiraju se nove točke pričvršćivanja  $E_1$  i  $F_1$  koje imaju fiksni odnos između  $C_1D_1$  i  $E_1F_1$  unutar veze te potom iskoristi  $E_1F_1$  kako bi se definirali tri položaja veze.
3. Nacrtaju se konstrukcijske linije od točke  $E_1$  do  $E_2$  i od točke  $E_2$  do  $E_3$ .
4. Pronađe se sredina linije  $E_1E_2$  i linije  $E_2E_3$  te se produže okomite središnjice dok se ne presjeku i označimo presjek kao  $O_2$ .
5. Ponov se koraci 2 i 3 za linije  $F_1F_2$  i  $F_2F_3$  te se presjek označi kao  $O_4$ .
6. Poveže se  $O_2$  s  $E_1$  te će se to nazvati vezom 2. Poveže se  $O_4$  s  $F_1$  te će se to nazvati vezom 4.
7. Linija  $E_1F_1$  je veza 3. Linija  $O_2O_4$  je veza 1.
8. Provjeri se Grashofov uvjet.  
Napomena: U ovom slučaju je potencijalno prihvatljiv bilo koji Grashofov uvjet.
9. Napravi se pogonska dijada na vezi 2 prema postupku iz primjera 5.1.4.



Slika 6 Sinteza s 3 pozicije s alternativnim položajima okretnih zglobova

Može se vidjeti da je promjena točaka pričvršćivanja na vezi 3 s CD na EF rezultirala i pomakom lokacija fiksnih oslonaca  $O_2$  i  $O_4$ . Stoga bi sada mogli biti u povoljnijim lokacijama nego što su bili u primjeru 5.2.1.1.. Iz toga se može zaključiti da bilo koje dvije točke na vezi 3, poput E i F, mogu poslužiti za potpuno definiranje te veze kao čvrstog tijela, i da postoji beskonačno mnogo takvih skupova točaka za odabir. Dok su točke C i D na nekom određenom mjestu u ravnini koje je definirano funkcijom spojnice, točke E i F mogu biti bilo gdje na vezi 3, stvarajući tako beskonačno mnogo rješenja za ovaj problem.

Dizajn prikazan u primjeru 5.2.2.1. razlikuje se od primjera 5.2.1.1. na nekoliko načina. Izbjegava preklapne pozicije zbog čega je moguće upravljanje dijatom koja djeluje na jednom od kompresora, a kutovi prijenosa su bolji. Međutim, krajnje pozicije u primjeru 5.2.1.1. zapravo bi mogle biti poželjne u slučaju da se traži samozaključavanje mehanizma. Oba ova primjera su rješenja za isti problem, i rješenje iz primjera 5.2.1.1. je samo poseban slučaj primjera 5.2.2.1.. Oba rješenja mogu biti korisna. Linija CD se kreće kroz iste tri pozicije kod oba dizajna te postoji beskonačno mnogo drugih rješenja ovog problem te načina na koji se može riješiti.



### 5.2.3. Sinteza s tri pozicije s određenim fiksnim osloncima[1]

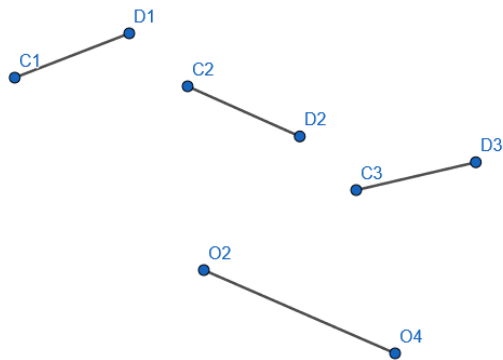
Iako je vjerojatno moguće pronaći prihvatljivo rješenje problema s tri pozicije putem metoda opisanih u prethodna dva primjera, može se primijetiti da dizajner ima malo izravne kontrole nad lokacijom fiksnih oslonaca budući da su oni jedan od rezultata sinteze. Uobičajeno je da dizajner ima ograničenja prihvatljivih lokacija fiksnih oslonaca, budući da su ograničeni lokacijama na kojima je podloga mehanizma dostupna. Bilo bi poželjno da se mogu definirati lokacije fiksnih oslonaca, kao i tri pozicije pokretnog spoja, te zatim sintetizirati odgovarajuće točke pričvršćivanja E i F na pokretnom spoju kako bi se zadovoljili ovi realniji uvjeti. Na ovaj problem može se primijeniti princip inverzije. U primjerima 5.2.1.1. i 5.2.2.1. se pokazuje kako pronaći potrebne fiksne oslonce za tri odabrane pozicije pokretnih oslonaca. Inverzijom ovog problema omogućuje se specificiranje lokacija fiksnih oslonaca i određivanje potrebnih pokretnih oslonaca za te lokacije. Prvi korak je pronaći tri pozicije podloge gdje svaka pozicija odgovara jednoj od tri pozicije sprežnog člana. To se postiže inverzijom mehanizma.

#### 5.2.3.1. Sinteza s tri pozicije s određenim fiksnim osloncima - Inverzija problema sinteze gibanja s tri pozicije

Invertira se četveročlani mehanizam koji premješta član CD iz položaja  $C_1D_1$  do  $C_2D_2$ , a zatim do položaja  $C_3D_3$  koristeći određene fiksne oslonce  $O_2$  i  $O_4$ .

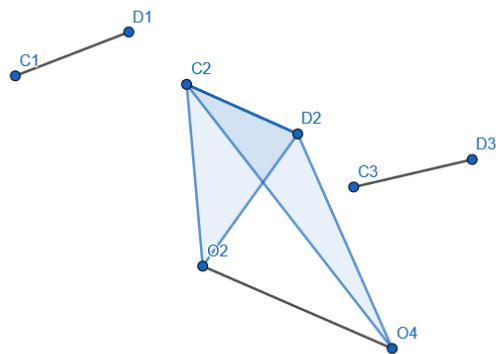
Opis konstrukcije:

1. Pronađu se invertirani položaji podloga koji odgovaraju trima specificiranim pozicijama sprežnog člana.
2. Nacrta se član CD u njezine tri željene pozicije  $C_1D_1$ ,  $C_2D_2$ ,  $C_3D_3$ , u ravnini, kao što smo u primjeru 5.2.1.1.
3. Nacrta se podloga  $O_2O_4$  u njegovoj željenoj poziciji u ravnini u odnosu na prvu poziciju član CD.



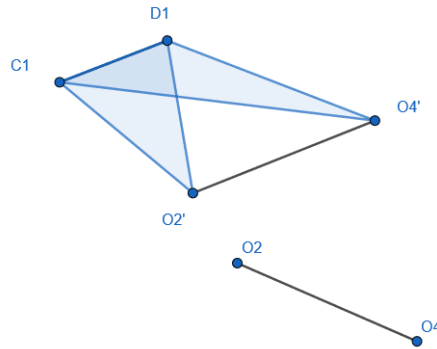
Slika 7 Originalne pozicije

4. Nacrtaju se konstrukcijski lukovi od točke  $C_2$  do  $O_2$  i od točke  $D_2$  do  $O_2$  čiji radijusi definiraju stranice trokuta  $C_2O_2D_2$ . Time se definira odnos fiksnog oslonca  $O_2$  prema članu CD u drugoj poziciji člana.
5. Nacrtamo konstrukcijske lukove od točke  $C_2$  do  $O_4$  i od točke  $D_2$  do  $O_4$  kako bi definirali trokut  $C_2O_4D_2$ . Time definiramo odnos fiksnog oslonca  $O_4$  prema članu CD u drugoj poziciji člana.



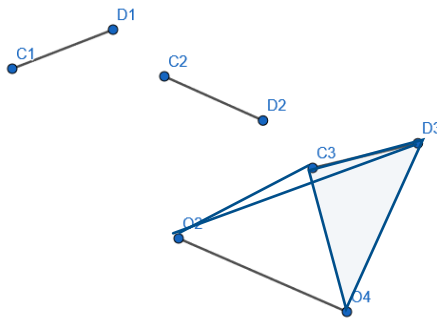
Slika 8 Pozicija podloge u odnosu na drugu poziciju člana CD

6. Sada se prenese ovaj odnos natrag na prvu poziciju spojnice  $C_1D_1$  tako da podloga  $O_2'O_4'$  ima isti odnos prema  $C_1D_1$  kao što je  $O_2O_4$  imao prema drugoj poziciji člana  $C_2D_2$ . Čineći to, zamišljeno je da se podloga premjestila s  $O_2O_4$  na  $O_2'O_4'$  umjesto da se član premjestio od  $C_1D_1$  do  $C_2D_2$ . Drugim riječima, invertirao se problem.

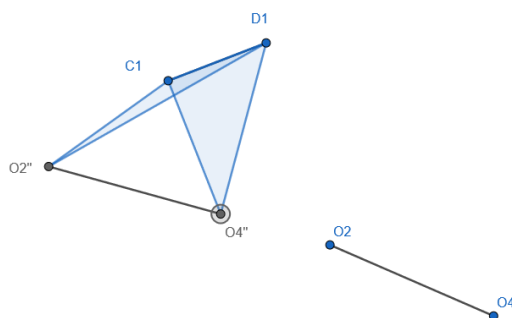


Slika 9 Prenesena podloga u odnos sa prvom pozicijom člana CD

7. Ponovi se postupak za treću poziciju člana i prenosi se treću relativnu poziciju podloge na prvu, ili referentnu poziciju.

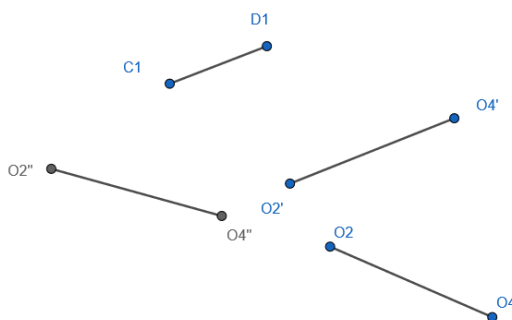


Slika 10 Odnos podloge na treću poziciju člana CD



Slika 11 Prenesena podloga u odnosu na drugu poziciju člana CD

8. Tri invertirane pozicije podloge koje odgovaraju tri željene pozicije sprežnog člana označene su sa  $O_2O_4$ ,  $O_2'O_4'$  i  $O_2''O_4''$  te će se preimenovati u  $E_1F_1$ ,  $E_2F_2$  i  $E_3F_3$ . Tako da originalne tri linije  $C_1D_1$ ,  $C_2D_2$  i  $C_3D_3$  sada nisu potrebne za sintezu sprežnog člana.



Slika 12 Invertirane pozicije oslonca

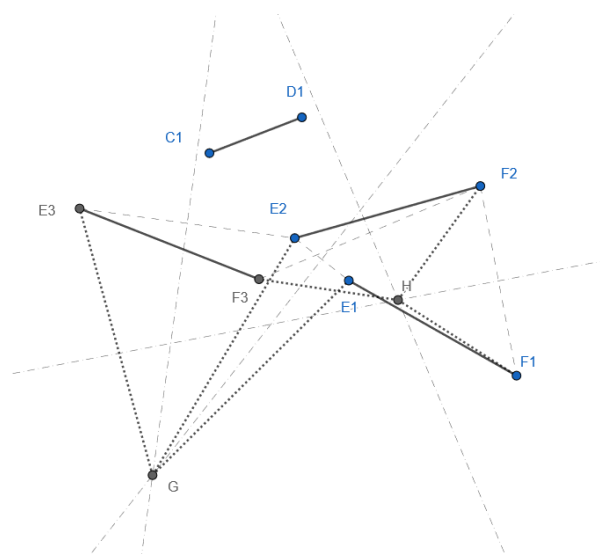
Mogu se koristiti ove tri nove linije  $E_1F_1$ ,  $E_2F_2$  i  $E_3F_3$  kako bi se pronašli pokretni oslonci na vezi 3 koje će omogućiti korištenje željenih fiksnih oslonaca  $O_2$  i  $O_4$  za tri specificirane izlazne pozicije. Sada će se smatrati da se podloga  $O_2O_4$  ponaša kao sprežni član koja se kreće kroz inverziju originalne tri pozicije te je potrebno pronaći oslonce podloga, koji će se označiti GH, potrebne za to invertirano gibanje i stavljati ih na stvarni sprežni član umjesto toga. Proces inverzije objašnjen u prijašnjem primjeru zamijenio je uloge spojnice i podloge. Preostali dio je isti kao i u primjeru 5.2.1.1.. Rezultat sinteze se zatim mora invertirati kako bi se dobilo konačno rješenje. U idućem primjeru će se prikazati inverzija te ostatak dizajniranja.

### 5.2.3.2. Traženje pokretnih oslonaca za tri položaja i specificirane fiksne oslonce[1]

Dizajnira se četveročlani mehanizam kako bi se član CD premjestio iz položaja  $C_1D_1$  do  $C_2D_2$ , a zatim do položaja  $C_3D_3$ . Koriste se specificirani fiksni oslonci  $O_2$  i  $O_4$  kako bi se pronašli potrebne lokacije pokretnih oslonaca na sprežnom članu inverzijom. Koristeći invertirane pozicije tla  $E_1F_1$ ,  $E_2F_2$  i  $E_3F_3$  pronađene u prijašnjem primjeru mogu se pronaći fiksni oslonci za to invertirano gibanje, zatim ponovno invertirajući dobiva se rezultirajući sprežni član kako bi se stvorili pokretni oslonci za tri položaja sprežnog člana CD koji koriste odabrane fiksne oslonce  $O_2$  i  $O_4$ .

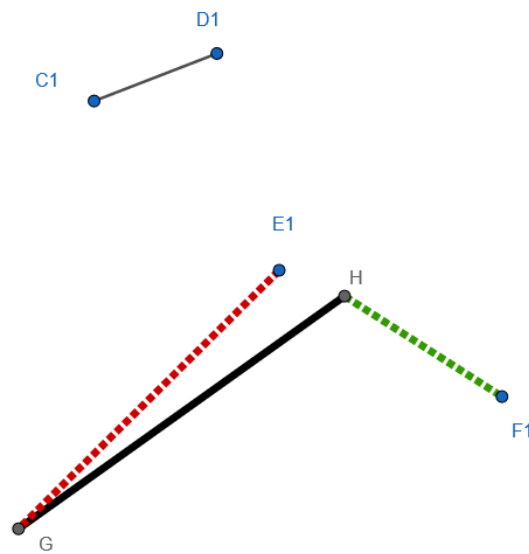
Opis konstrukcije:

1. Započinje se s tri invertna položaja u ravni. Linije  $E_1F_1$ ,  $E_2F_2$  i  $E_3F_3$  definiraju tri položaja invertirane sprežnog člana koja se premješta.
2. Nacrtaju se konstrukcijske linije od točke  $E_1$  do  $E_2$  i od točke  $E_2$  do  $E_3$ .
3. Presječe se linija  $E_1E_2$  i linija  $E_2E_3$  na pola te se produže okomite središnjice dok se ne presjeku. Presjek se označi kao točka G.
4. Ponove se koraci 2 i 3 za linije  $F_1F_2$  i  $F_2F_3$ . Presjek se označi kao točka H.
5. Poveže se točka G s  $E_1$  te će se to nazvati vezom 2. Poveže se točku H s  $F_1$  te se to nazvove vezom 4.
6. U ovoj invertiranoj spojnici, linija  $E_1F_1$  je sprežni član, veza 3. Linija GH je postoljni član tj. veza 1.



Slika 110 Invertirani mehanizam

7. Sada se mora ponovno invertirati mehanizam kako bi se vratio na originalan raspored. Linija  $E_1F_1$  zapravo je podloga  $O_2O_4$ , a  $GH$  je zapravo sprežni član.

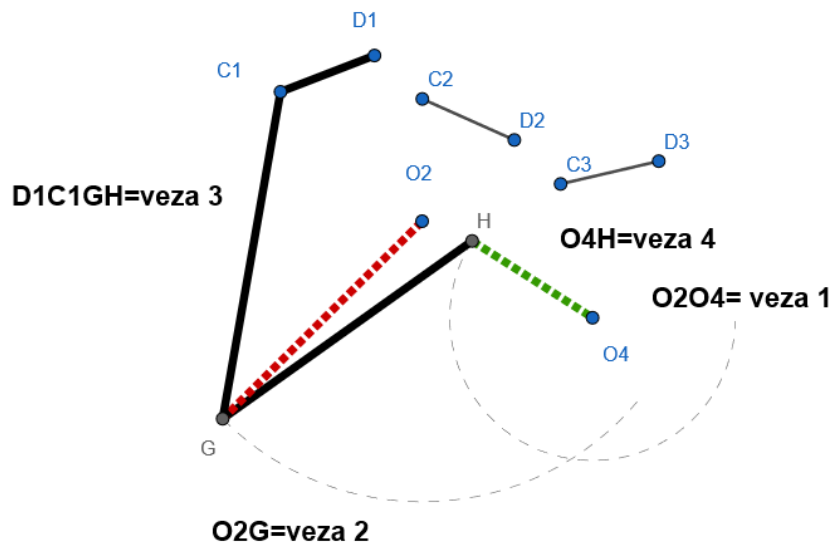


Slika 14 Originalan položaj mehanizma

8. Zatim se ponovo uvodi originalna linija  $C_1D_1$  u njezin ispravan odnos prema liniji  $O_2O_4$  u početnom položaju. To oblikuje potrebnu ravninu sprežnog člana i definira minimalni oblik veze 3.
9. Kutna zakretanja potrebna za dosezanje druge i treće pozicije linije  $CD$  ista su kao ona za invertiranje sprežnog člana. Kut  $F_1HF_2$  isti je kao kut  $H_1O_4H_2$ , a  $F_2HF_3$  je isti kao kut  $H_2O_4H_3$ . Kutni pomaci veze 2 zadržavaju isti odnos. Kutna zakretanja veza 2 i 4 su ista za obje inverzije jer su pomaci veza relativni jedan prema drugome.
10. Provjeri se Grashofov uvjet.

Napomena: Uzima se u obzir da je svaki Grashofov uvjet potencijalno prihvatljiv u ovom slučaju pod uvjetom da veza ima pokretljivost između sve tri pozicije.

Invertirajući izvorni problem, svode ga se na oblik koji je lakši za rješavanje i omogućava izravno rješenje općom metodom sinteze s tri pozicije.



Slika 15 Mehanizam uz član CD

### 5.3. Sinteza s četiri ili više položaja

Očito je da što se više ograničenja nametne ovim problemima sinteze, to postaje kompliciranije pronaći rješenje. Kad se definiraju više od tri pozicije izlazne veze, poteškoće se značajno povećavaju.

Sinteza za četiri položaja ne može se riješiti tako lako i jednako dobro ručnim grafičkim rješenjima. Jedan od pristupa kako riješiti ovaj problem je korišten od Arthur G. Erdmana i George N. Sandora te drugih, a to je kvantitativna metoda sinteze koja zahtijeva računalo za njeno izvođenje. Ukratko, niz istovremenih vektorskih jednadžbi se piše kako bi se predstavile željene četiri pozicije cijelog mehanizma. Te jednadžbe se rješavaju nakon što dizajner svojevremeno izabere vrijednosti varijabli. Računalni program LINCAGES od strane Erdmana, te program KINSYN od strane Kaufmana neki su od tih programa. Oba pružaju prikladan i korisnički prijateljski grafički način za donošenje potrebnih dizajnerskih izbora kako bi se riješio problem s četiri pozicije.[1]

LINCAGES je računalni program koji se koristi u mehaničkom inženjeringu za sintezu i analizu mehanizama. Ovaj program se koristi za rješavanje problema veza i sinteze mehanizama s više položaja. LINCAGES se temelji na kvantitativnoj metodi sinteze koja koristi vektorske jednadžbe kako bi se definirale željene pozicije cijelog mehanizma.[4]

Osnovna funkcionalnost programa LINCAGES uključuje:

1. Sinteza mehanizama: Omogućuje definiranje parametara i željenih položaja mehanizma kako bi se pronašle konfiguracije koje zadovoljavaju postavljene uvjete.
2. Analiza pozicija: Omogućuje analizu različitih položaja mehanizma i njihovih kinematičkih svojstava.
3. Numeričko rješavanje jednadžbi: Koristi numeričke metode za rješavanje sistema jednadžbi koje predstavljaju kinematičke uvjete i ograničenja mehanizma.
4. Grafičko sučelje: Pruža korisnički prijateljsko grafičko sučelje koje olakšava unos parametara, postavljanje uvjeta i vizualizaciju rezultata.

KINSYN je računalni program koji se koristi za sintezu kinematičkih mehanizama s više položaja. Ovaj program, kao i LINCAGES, pripada skupini računalnih alata za analizu i sintezu mehanizama, ali se fokusira na kinematičke aspekte mehanizama i generiranje pokreta s više definiranih položaja.[4]

Osnovne funkcionalnosti KINSYN programa uključuju:

1. Sinteza kinematičkih lanaca: omogućuje korisnicima definiranje kinematičkih svojstava mehanizma te pronalaženje geometrije i dimenzija mehanizma koji zadovoljavaju željene uvjete.
2. Generiranje pokreta za više položaja: Omogućuje generiranje pokreta za mehanizam koji će proći kroz više različitih definiranih položaja, što je korisno za različite primjene, poput robotskih manipulatora ili sustava za prijenos snage.
3. Numerička analiza i rješavanje problema s više položaja: KINSYN koristi numeričke metode za rješavanje sustava jednadžbi koje definiraju kinematičke uvjete mehanizma.
4. Grafičko sučelje za korisnike: Pruža korisnički prijateljsko grafičko sučelje za unos parametara, vizualizaciju rezultata i olakšano korištenje programa.

#### **5.4. Brzopovratni mehanizmi**

Mnoge primjene u dizajnu strojeva zahtijevaju različitu prosječnu brzinu između prednjeg i povratnog hoda. Obično se tijekom prednjeg hoda mehanizma obavlja neki vanjski rad, dok se povratni hod mora izvesti što brže kako bi se maksimalno vrijeme osiguralo za radni hod.



Mnoge konfiguracije veza omogućavaju ovu značajku. Jedini problem je sintetizirati pravi omjer ta dva hoda.[5,6]

#### 5.4.1. Četveročlani brzopovratni mehanizam

Razmotreni mehanizam iz primjera 5.1.1. možda je najjednostavniji primjer problema dizajna četveročlanog mehanizma. To je mehanizam s radnim članom koji omogućuje dvije pozicije radnog člana s jednakim vremenom prednjeg i povratnog hoda. To nije primjer brzopovratnog mehanizma i predstavlja poseban slučaj općenitijeg problema brzog povratka. Razlog zašto nije u stanju brzog povratka leži u pozicioniranju oslonca pogonskog člana klina  $O_2$ , na produžetku linije  $B_1B_2$ . To rezultira jednakim kutovima od  $180^\circ$  stupnjeva koje zauzima pogonski član dok pokreće radni član od jednog krajnjeg položaja do drugog. Ako se pogonski član rotira s konstantnom kutnom brzinom, što će biti tendencija kada ga pokreće motor. Svakih  $180^\circ$  stupnjeva, naprijed i natrag, trajati će isti vremenski interval.

Ako je oslonac pogonskog člana  $O_2$  lociran izvan produžetka linije  $B_1B_2$ , tada će pogonski član zauzimati nejednake kutove između krajnjih pozicija. Nejednaki kutovi rezultiraju nejednakim vremenom kada se pogonski član okreće konstantnom brzinom. Te kutove označiti će se kao  $\alpha$  i  $\beta$ . Omjer tih kutova,  $\alpha/\beta$ , naziva se omjer vremena  $T_R$  i određuje stupanj brzopovratnog mehanizma.[1] Može se napomenuti da se termin "brzi povratak" proizvoljno koristi za opis ovakvog tipa sklopa. Ako se klin okreće u suprotnom smjeru, tada će biti mehanizam brzog prednjeg hoda. Kada je sklop završen, tada procjenjujemo omjer vremena mjerenjem ili računanjem kutova  $\alpha$  i  $\beta$ . Međutim, dizajniranje sklopa za određeni omjer vremena je složeniji zadatak. Hall pruža grafičku metodu za sintezu brzog povratka Grashofovog četveročlanog mehanizma. Da bi se to postiglo, trebaju se izračunati vrijednosti za  $\alpha$  i  $\beta$  koje će dati određeni omjer vremena. Mogu se napisati dvije jednadžbe uključujući  $\alpha$  i  $\beta$  te ih riješiti istovremeno.

$$T_R = \frac{\alpha}{\beta} \tag{1}$$

$$\alpha + \beta = 360^\circ \tag{2}$$

Isto se mora izraziti kut konstrukcije koji glasi:

$$\delta = |180^\circ - \alpha| = |180^\circ - \beta| \quad (3)$$

5.4.1.1. Četveročlni zglobni četverokut mehanizam za brzi povrat s određenim omjerom vremena[1]

Redizajnirati će se primjer 5.1.1. kako bi se postigao omjer vremena od 1:1.25 s kutem od  $45^\circ$  izlaznog pokreta zglobnog četverokuta.

Opis konstrukcije:

1. Nacrta se izlaznu vezu  $O_4B$  u oba krajnja položaja, na bilo kojoj pogodnoj lokaciji, tako da željeni kut pokreta,  $\theta_4$ , bude obuhvaćen.
2. Izračunaju se  $\alpha, \beta$  i  $\delta$  koristeći prije navedene jednadžbe.

Kroz jednadžbe se dobije da je:

$$\alpha = 160^\circ$$

$$\beta = 200^\circ$$

$$\delta = 20^\circ$$

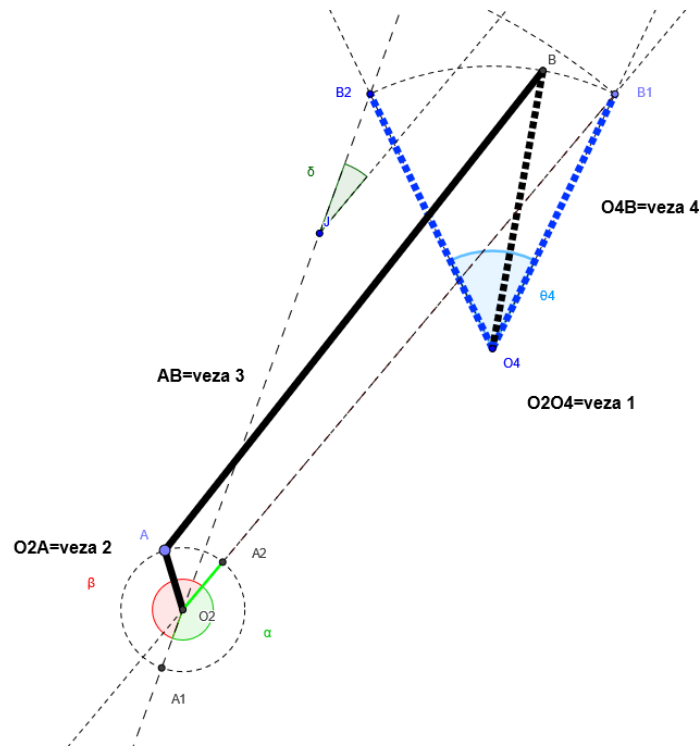
3. Nacrta se konstrukcijska linija kroz točku  $B_1$  pod bilo kojim prikladnim kutom.
4. Nacrta se konstrukcijska linija kroz točku  $B_2$  pod kutom  $\delta$  od prve linije koja ide kroz  $B_1$ .
5. Presjek dviju konstrukcijskih linija označi se kao  $O_2$ .
6. Linija  $O_2O_4$  sada označava vezu podloge.
7. Izračunaju se duljine pogonskog i sprežnog člana mjerenjem  $O_2B_1$  i  $O_2B_2$  te se rješe istovremeno:

$$\text{Duljina sprežnog člana} + \text{duljina pogonskog segmenta} = O_2B_1$$

$$\text{Duljina sprežnog člana} + \text{duljina pogonskog segmenta} = O_2B_2$$

S druge strane, može se konstruirati duljina pogonskog segmenta pomoću luka koji se proteže od  $B_1$  s  $O_2$  kao centrom da presiječemo produžetak linije  $O_2B_2$ . Taj presjek se označi kao  $B_1'$ . Duljina linije  $B_2B_1'$  je dvostruka veća od duljine linije pogonskog člana. Zatim se prepolovi liniju  $B_2B_1'$  kako bi se dobila vrijednost duljine linije pogonskog člana  $O_2A_1$ .

8. Provjeri se Grashofov uvjet te ako nije zadovoljen ponove se koraci od 3 do 8 s  $O_2$  udaljenijim od  $O_4$ .



Slika 16 Četveročlani brzopovratni mehanizam

Ovaj pristup dobro funkcionira za omjere vremena do otprilike 1:1.5. Izvan te vrijednosti, kutovi prijenosa postaju lošiji, i potreban je složeniji sklop. Veći omjeri vremena, do otprilike 1:2, mogu se postići dizajniranjem šesteročlanog mehanizma.

#### 5.4.2. Šesteročlani brzopovratni mehanizam

U ovome slučaju prvo se dizajnira četveročlani vučni mehanizam koji ima željeni omjer vremena između svog pogonskog klina i radnog klina, a zatim se dodaje dijada kao izlazna faza, koja je pokretana radnim klinom. Ta dijada može biti organizirana tako da ima ili klin-klackalicu ili klizni član kao izlaznu vezu. Prvo se mora sintetizirati vučni četveročlani mehanizam, a zatim će se dodati dijada.

#### 5.4.2.1. Šesteročlani vučni mehanizam s brzim povratom za određeni omjer vremena.[1]

Cilj je postići omjer vremena 1:1.4 s kutom zakreta radnog člana od  $90^\circ$ .

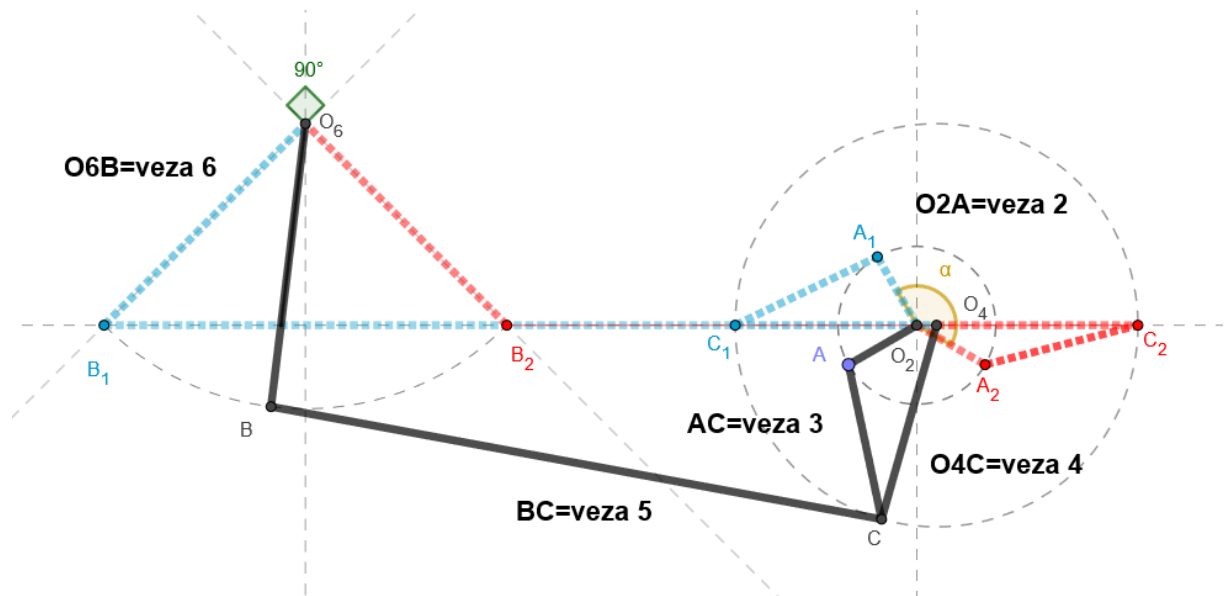
Opis konstrukcije:

1. Izračunaju se  $\alpha$  i  $\beta$  koristeći jednadžbe (1),(2) i (3) koje su se navele.

$$\alpha = 150^\circ$$

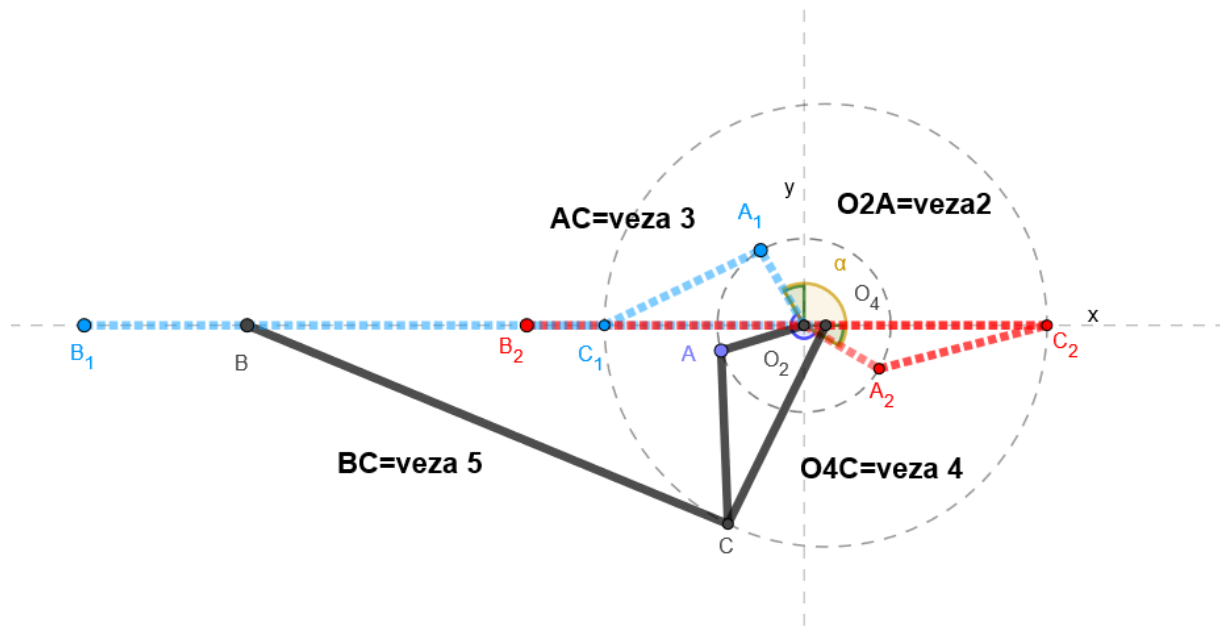
$$\beta = 210^\circ$$

2. Nacrta se linija centara XX na bilo kojoj prikladnoj lokaciji.
3. Odabere se lokacija pogonskog segmenta  $O_2$  na liniji XX te se nacрта os YY okomitu na XX kroz  $O_2$ .
4. Nacrta se krug prikladnog radijusa  $O_2A$  oko centra  $O_2$ .
5. Postavi se kut  $\alpha$  s vrhom u  $O_2$ , simetrično s prvim kvadrantom.
6. Označe se točke  $A_1$  i  $A_2$  na presjecima linija koje zatvaraju kut  $\alpha$  i krug radijusa  $O_2A$ .
7. Postavi se šestar na prikladan radijus AC dovoljno dug da presiječe liniju XX na dva mjesta s obje strane  $O_2$  kada se pomiče iz  $A_1$  i  $A_2$  te to označimo kao točke presjecišta  $C_1$  i  $C_2$ .
8. Linija  $O_2A_1$  je pogonski segment, veza 2, a linija  $A_1C_1$  je sprežni član, segment 3.
9. Udaljenost  $C_1$  i  $C_2$  je dvostruka duljina pogonskog člana. Na središtu duljine  $C_1C_2$  označi se fiksni oslonac  $O_4$ .
10. Linija  $O_2O_4$  sada definira vezu podloge. Linija  $O_4C_1$  je radni član, segment 4.
11. Provjeri se Grashof uvjet te ako nije zadovoljen, ponove se koraci od 7 do 11 s kraćim radijusom u koraku 7.
12. Invertira se način na koji se dizajnirao primjer 5.1.1. kako bi bila stvorena izlazna dijada koristeći XX kao pravac gibanja i  $O_4C_1$  kao pogonski član. Točke  $B_1$  i  $B_2$  ležat će na liniji XX i bit će udaljene jedna od druge za udaljenost dvostruko veće od duljine  $O_4C_1$ . Točka  $O_6$  ležat će na okomitoj osi središnjice duljine  $B_1B_2$ , na udaljenosti od linije XX koja obuhvaća određeni kut izlazne radnog člana.
13. Provjeriti prijenosni kut.



Slika 11 Šesteročlani brzopovratni mehanizam

Ovaj mehanizam omogućuje brzi povrat kad je konstantna brzina motora spojena na segment 2. Segment 2 će proći kroz kut  $\alpha$  dok segment 4, koja vuče izlaznu dijadu, prolazi kroz prvih  $180^\circ$ , od položaja  $C_1$  do  $C_2$ . Zatim, dok segment 2 završava svoj ciklus kroz kut  $\beta$ , izlazna faza će završiti još  $180^\circ$  od  $C_2$  do  $C_1$ . Budući da je kut  $\beta$  veći od kuta  $\alpha$ , kretanje unaprijed traje duže. Može se primijetiti da je hod izlazne dijade duljina kao dva pogonska segmenta  $O_4C_1$ . To je neovisno o kutnom zakretu izlazne veze koja se može prilagoditi pomicanjem oslonca  $O_6$  bliže ili dalje od linije XX. Kut prijenosa na spoju između veze 5 i veze 6 bit će optimiziran ako je fiksni oslonac  $O_6$  smješten na okomitoj osi središnjice duljine  $B_1B_2$ . Ako se u dizajnu traži translacijska kretnja, klizni član bit će smješten na liniji XX i oscilirat će između  $B_1$  i  $B_2$ . Proizvoljna odabrana veličina ovog ili bilo kojeg drugog mehanizma može se povećati ili smanjiti množenjem svih duljina segmenta istim faktorom. Na taj način dizajn određene veličine može se prilagoditi bilo kojem pakiranju za lakši transport.



Slika 17 Šesteročlani brzopovratni klizni mehanizam

## 6. Sprežni član i srodni mehanizmi

Pojam sprežni član ili "kognat" koristili su Jean-Claude Paul Hartenberg i Jacques Denavit da opišu mehanizme sa različitim geometrijama čiji sprežni članovi generiraju istu putanju sprežnog člana. Neovisno o njima, Samuel Roberts i Pafnuty Lvovich Chebyshev postavili su teorem koji sada nosi njihova imena: Roberts-Chebyschev teorem.

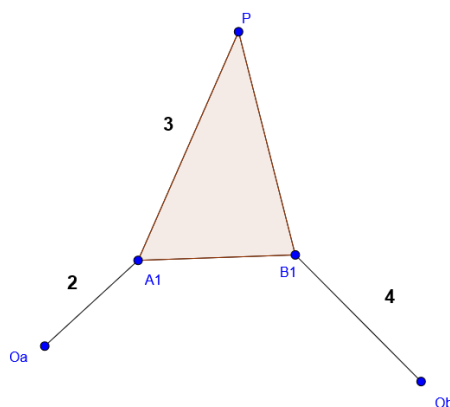
### 6.1. Roberts-Chebyschev teorem

Tri različita, ravninski spojena četveročlana mehanizma pratit će identične krivulje sprežnog člana.[1]

Hartenberg i Denavit predstavili su proširenja ovog teorema na klipno koljenčaste mehanizme i šesteročlane mehanizme:

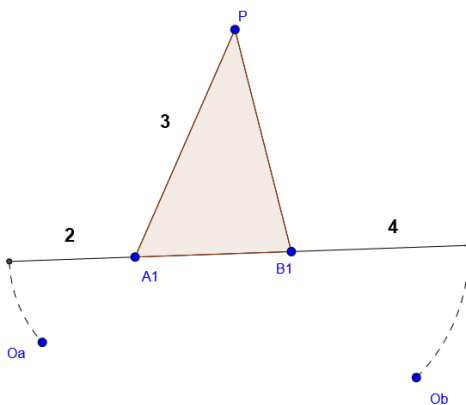
Dva različita klipno koljenčasta mehanizma će pratiti identične krivulje sprežnog člana. Krivulja točke sprežnog člana planarnog četveročlanog mehanizma također je opisana spojem odgovarajuće dijade šesteročlanog mehanizma.[1]

Slika 19 prikazuje četveročlani mehanizam za kojega se žele pronaći dva sprežna člana koja imaju iste putanje neke točke tzv. srodnike (kognate). Prvi korak je oslobađanje fiksnih oslonaca  $O_A$  i  $O_B$ . Držeći prijenosnik nepomičnim, okreću se segmente 2 i 4 tako da postanu kolinearne s linijom koja prolazi kroz točke  $A_1B_1$  segmenta 3, kao što je prikazano na slici 20. Sada se mogu konstruirati linije paralelne sa svim stranama veza u originalnom mehanizmu kako bi se stvorio Cayleyjev dijagram. Ovaj shematski raspored definira duljine i oblike segmenata od 5 do 10 koji pripadaju sprežnim članovima. Sva tri četveročlana mehanizma dijele originalnu prijenosnu točku P i tako će generirati isto gibanje na putanjama svojih sprežnih članova.



Slika 18 Četveročlani mehanizam

Kako bi se pronašla ispravna lokacija fiksnih oslonca  $O_C$  iz Cayleyjevog dijagrama, krajevi segmenata 2 i 4 vraćaju se na originalne lokacije fiksnih oslonaca  $O_A$  i  $O_B$ . Ostale veze će pratiti ovo gibanje, zadržavajući paralelogramsku vezu između segmenata. Fiksni oslonac  $O_C$  će tada biti na odgovarajućem mjestu podloge. Ova konfiguracija naziva se Robertsov dijagram - tri četveročlana sprežna člana koja dijele istu krivulju sprežnog člana.

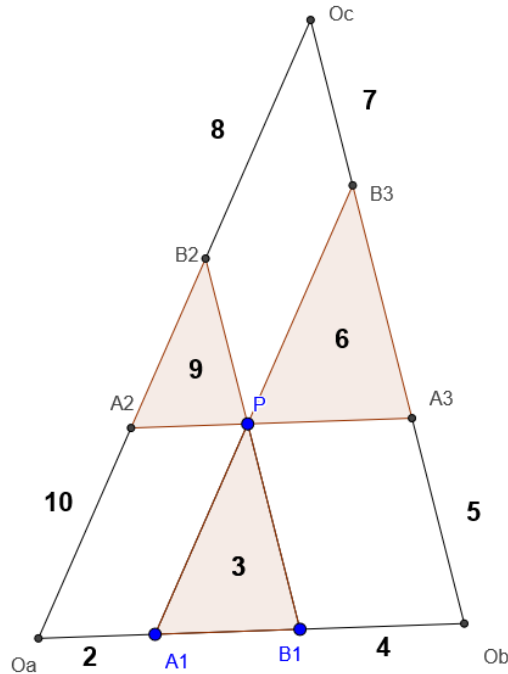


Slika 19 Pomak veza 2 i 4

Robertsov dijagram se može nacrtati izravno iz originalnog mehanizma bez upotrebe Cayleyjevog dijagrama, primjećujući da su paralelogrami koji tvore druge sprežne članove također prisutni u Robertsovom dijagramu, a tri sprežna člana su slični trokutu. Također je moguće locirati fiksni oslonac  $O_C$  izravno iz originalnog mehanizma. Konstruirajući sličan



trokut kao kod spreznog člana, postavljamo njegovu osnovu AB između  $O_A$  i  $O_B$  te će njegov vrh biti na  $O_C$ .



Slika 20 Kognat

Robertsova konfiguracija ili Cayleyjeva uz podlogu sada se može kretati do bilo kojih krajnjih točaka, a točka P će opisivati originalnu putanju spreznog člana koja je ista za sva tri sprežna člana. Točka OC se neće kretati kada se Robertsov mehanizam pokreće, što dokazuje da je on fiksni oslonac. Sprežni članovi se mogu razdvojiti i bilo koji od tri mehanizma može se koristiti za generiranje iste putanje spreznog člana prijenosnika. Odgovarajuće veze u sprežnim članovima će imati istu kutnu brzinu kao i originalni mehanizam te ih stoga možemo smatrati srodnim mehanizmima.

## **7. Zaključak**

Cilj ovog završnog rada bio je prikupiti, sistematizirati te analizirati dostupne grafičke postupke kojima se sintetiziraju ravninski zglobo-polužni mehanizmi. Razmotrili su se kako dizajnirati mehanizme koji pokreću objekte kroz različite pozicije te kako evaluirati njihovu kvalitetu. Također se istražilo kako provjeriti prisutnost krajnjih i mrtvih pozicija i mjeriti kut prijenosa, ključne aspekte u analizi mehanizama. Kroz njihovu podjelu i opis može se ustanoviti kako dizajniranje takvih mehanizama nije jednostavan proces te zahtjeva godine iskustva ako se taj posao želi obaviti efikasnije i uz manje troškove. Pojava tih mehanizama u našem svakodnevnom životu je svakidašnja te su svuda oko nas od kante za smeće, bagerskog kopača pa do obične daske za peglanje. Kroz ovaj rad su se pokazali kako i ti svakidašnji primjeri oko nas funkcioniraju te način njihovog dizajna.

## Popis slika

Slika 1 Dvopozicijska sinteza s radnim članom.....	16
Slika 2 Dvopozicijska sinteza s kompleksnim pomakom-primjer radnog člana .....	17
Slika 3 Dvopozicijska sinteza s kompleksnim pomakom-sinteza sprežnog člana.....	18
Slika 4 Dijada sa kompleksnim pomakom sprežnog člana .....	19
Slika 5 Sinteza s 3 pozicije.....	21
Slika 6 Sinteza s 3 pozicije s alternativnim položajima okretnih zglobova .....	23
Slika 7 Originalne pozicije.....	25
Slika 8 Pozicija podloge u odnosu na drugu poziciju člana CD .....	25
Slika 9 Prenesena podloga u odnos sa prvom pozicijom člana CD.....	26
Slika 10 Odnos podloge na treću poziciju člana CD.....	27
Slika 11 Prenesena podloga u odnosu na prvu poziciju člana CD .....	26
Slika 12 Invertirane pozicije oslonca .....	27
Slika 13 Invertirani mehanizam .....	28
Slika 14 Originalan položaj mehanizma.....	29
Slika 15 Mehanizam uz član CD .....	30
Slika 16 Četveročlani bropovratni mehanizam.....	34
Slika 17 Šesteročlani brzopovratni mehanizam .....	36
Slika 18 Šesteročlani brzopovratni klizni mehanizam .....	37
Slika 19 Četveročlani mehanizam.....	39
Slika 20 Pomak veza 2 i 4.....	39
Slika 21 Kognat .....	40

## Literatura

- [1] Norton, R.L.: „Design of machinery“, 3. ed., Mc Graw - Hill, New York, 2003.
- [2] Söylemez, E.; „Kynematic synthesis of mechanisms using excel and geogebra“, Mechanism and Machines Science 131, Springer Verlag, 2023.
- [3] Youtube; „Mechanical Dept Second year Robotics Lec2 Graphical Linkage Synthesis T2 part1“, s interneta <https://www.youtube.com/watch?v=EjSQmV2tQmQ&t=1293s>, posjećeno 28.12.2023.
- [4] Science Direct.; „Mechanism and Machine Theory“, s interneta <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0094114X73900219>, posjećeno 28.12.2023.
- [5] Krpan, M. Butković, M., Franulović, A, Žigulić, R.; Braut, S.; Dinamika – Teorija i primjena, TFR, Rijeka, 2001.
- [6] Žigulić, R.; Braut, S.; Kinematika, TFR, Rijeka, 2012.

## Sažetak i ključne riječi

U ovom radu se govori o grafičkim metodama sinteze ravninskih zglobno polužnih mehanizama. Govori se o načinu na koji funkcioniraju zglobno polužni mehanizmi te kako izgleda proces dizajniranja takvih mehanizama. Kako bi se što bolje mogao shvatiti taj proces objašnjeni su kako se prvenstveno sinteza mehanizama sastoji od tri tipa zadataka a to su zadaci generiranja funkcije, generiranja putanje i generiranja gibanja te kako provjeriti oće taj mehanizam ispunjavati te zadatke i koliko uspješno. Proces sinteze je složen proces te radi što efikasnijeg rezultata sklon je iteracijama. U radu su se prošle vrste dimenzionalnih sinteza za dvopozicijske mehanizme, mehanizme s tri pozicije, s četiri ili više pozicija te isto brzopovratni mehanizmi. Objasnjena je srodnost mehanizama i njihova veza između sprežnih članova u stvaranju istih putanja.

Svi grafički prikazi su rađeni u programu Geogebra radi što lakšeg prikaza i jednostavnosti izrade.

Ključne riječi: sinteza, zglobno polužni mehanizam, sprežni član, radni član, kognat

## **Summary and key words**

This paper discusses graphical methods for planar linkages synthesis. It explores the functioning of linkages and the process of designing such mechanisms. To better understand this process, the synthesis of mechanisms is explained to consist primarily of three types of tasks: function generation, path generation, and motion generation. This paper also outlines how to assess whether the mechanism fulfills these tasks and to what extent it does so successfully. The synthesis process is complex and for optimal results it is prone to iterations. The paper covers various types of dimensional synthesis for two-position mechanisms, three-position mechanisms, four or more position mechanisms, as well as quick-return mechanisms. It explains the relationship between mechanisms and the connection of coupler links in creating similar paths.

All graphical representations were created using the program Geogebra for ease of display and simplicity of construction.

**Keywords:** synthesis, linkage mechanism, coupler link, rocker link, cognate