

Analiza proizvoda za robotsko sklapanje

Abramović, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:911881>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-09**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Abramović

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:



Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Student:

Luka Abramović

Zagreb, 2023.

ZADATAK

 SVEUČILIŠTE U ZAGREBU FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite Povjerenstvo za završne i diplomске ispite studija strojarstva za smjerove: proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika		
Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje		
Datum	Prilog	
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1		
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -		
<h3>ZAVRŠNI ZADATAK</h3>		
Student:	Luka Abramović	JMBAG: 0035222352
Naslov rada na hrvatskom jeziku:	Analiza proizvoda za robotsko sklapanje	
Naslov rada na engleskom jeziku:	Product analysis for robotic assembly	
Opis zadatka:	<p>Analiza tj. procjena sklopivosti proizvoda omogućuje optimiranje proizvoda sa stajališta montaže još u fazi konstruiranja proizvoda te se provodi za različite izvedbe sustava montaže, među kojima su i oni robotski.</p> <p>U radu je potrebno:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. objasniti značaj procjene sklopivosti proizvoda, posebno za robotsku montažu 2. opisati analizu proizvoda za robotsko sklapanje metodom DFA Boothroyda i Dewhursta 3. analizirati odabrani proizvod metodom iz točke 2. 	
Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predvideni datumi obrane:
30. 11. 2022.	1. rok: 20. 2. 2023. 2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023. 3. rok: 18. 9. 2023.	1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023. 2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023. 3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.
Zadatak zadao:	Predsjednik Povjerenstva:	
Prof. dr.sc. Zoran Kunica	Prof. dr. sc. Branko Bauer	

IZJAVA

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

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc Zoranu Kunici na pruženoj podršci, savjetima i odvojenom vremenu tijekom izrade rada.

Zahvaljujem se i svojoj djevojci, kolegama i prijateljima na pomoći tokom studiranja.

Na kraju, najveća zahvala mojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci i pruženim uvjetima tokom svih godina studija.

U Zagrebu, 20. rujna 2023.

Luka Abramović

SAŽETAK

Tehnologija montaže je neizostavan dio u svakom proizvodnom procesu u kojem se završni sklop sastoji od barem dva dijela. Zastupljena je u mnogim industrijama. Jedna od metoda koja je doprinijela razvoju montaže je i metoda DFA. U radu je detaljno opisan postupak Boothroydove i Dewhurstove metode DFA za analizu robotskog sklapanja na primjeru nogometne lopte. Na temelju dobivenih rezultata višestanični robotski sustav pokazao se kao bolje rješenje od stanice s jednim robotom i stanice s dva robota, ali zahtijeva i veća početna ulaganja. U daljnjem radu predlažu se ponovna analiza za situaciju u kojoj robot ne bi obavljao sve operacije u izradi i sklapanju lopte, analiza metodom DFA za automatsko sklapanje i razvoj računalne podrške.

Ključne riječi: metoda DFA, robotsko sklapanje, nogometna lopta

SUMMARY

Assembly technology is an indispensable part of every manufacturing process where the final assembly consists of at least two parts. It is prevalent in many industries. One of the methods that has contributed to the development of assembly is the DFA method. The paper provides a detailed description of the Boothroyd and Dewhurst DFA method for analyzing robotic assembly using the example of a soccer ball. Based on the obtained results, a multi-cell robotic system proved to be a better solution than a single-robot station and a two-robot station, but it also requires higher initial investments. In further research, a reanalysis is proposed for a situation in which a robot would not perform all operations in the production and assembly of the ball, analysis using the DFA method for automated assembly, and the development of computer support.

Key words: DFA method, robotic assembly, football

SADRŽAJ

ZADATAK.....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY	IV
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	VII
POPIS SLIKA	X
POPIS TABLICA.....	XI
1. UVOD.....	1
2. MONTAŽA	3
2.1. Povijesni razvoj	4
2.2. Osobitosti montaže.....	6
3. OBLIKOVANJE PROIZVODA ZA SKLAPANJE.....	7
3.1. Značajke sklopivosti proizvoda	7
3.2. Metoda DFA	8
3.3. Analiza proizvoda za robotsko sklapanje	9
3.3.1. Prednosti robotskog sklapanja.....	9
3.3.2. Robotski sustavi	9
3.3.3. Troškovi montaže.....	12
3.3.4. Sažetak pravila za robotsku montažu	12
4. NOGOMETNA LOPTA	13
4.1. Proces izrade i montaže nogometne lopte.....	15
4.2. Robotsko sklapanje nogometne lopte.....	16
5. ANALIZA NOGOMETNE LOPTE ZA ROBOTSKO SKLAPANJE	17

5.1. Stanica s jednim robotom.....	17
5.1.1. Polje karte za robotsko sklapanje	19
5.1.2. Vrijeme ciklusa sklapanja	20
5.1.3. Metoda sređivanja dijelova	21
5.1.4. Teoretski minimalan broj dijelova	22
5.1.5. Određivanje ukupne cijene proizvodnje.....	23
5.2. Stanica s dva robota	27
5.3. Višestanični robotski sustav	31
6. ZAKLJUČAK	36
7. LITERATURA.....	38

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
<i>AG</i>	USD	relativna cijena dodatne hvataljke ili alata
<i>AGT</i>	cent	relativna ukupna cijena dodatnih hvataljki, robotskih alata i alata za pridržavanje
<i>AR</i>	USD	relativna cijena robota uključujući upravljačke elemente i senzore
<i>ARM</i>	USD	maksimalna vrijednost AR za jednu robotsku stanicu
<i>BS</i>	komad	veličina serije, broj proizvoda
<i>CG</i>	cent	cijena standardne hvataljke
<i>CPT</i>	USD	cijena uređaja za sređivanje dijelova
<i>CS</i>	USD	cijena operacije sklapanja
<i>CST</i>	cent	ukupna cijena operacije sklapanja po sklopu
<i>CST(GP)</i>	cent	cijena višenamjenske opreme po sklopu
<i>CST(OP)</i>	cent	cijena osoblja po sklopu
<i>CST(OPS)</i>	cent	trošak radnika za nadgledanje robotske stanice
<i>CST(SP)</i>	cent	cijena korištenja opreme po sklopu
<i>CTS</i>	USD	osnovna cijena jedne radne stanice
<i>CWC</i>	USD	cijena posebnih nosača radnih komada pridružena jednoj stanici u višestaničnom sustavu
<i>CWT</i>	USD	ukupna cijena jednonamjenskih stega
<i>MG</i>		ručno punjenje magazina, palete ili pladnja
<i>MN</i>	komad	broj zasebnih dijelova

<i>NM</i>	komad	teoretski minimalan broj dijelova
<i>NOS</i>		broj pojedinačnih robotskih stanica koje nadzire jedan tehničar
<i>NS</i>		broj stanica u višestaničnom sustavu
<i>OP</i>	cent/s	cijena ručnog rada
<i>OPS</i>	cent/s	cijena tehničara ili nadglednika
<i>PE</i>	%	efikasnost postrojenja
<i>PP</i>		način sređivanja dijelova (jednonamjenski dodavač ili ručno punjeni magazin)
<i>PS</i>		broj radnih smjena-godina za amortizaciju opreme
<i>RC</i>	cent/s	cijena po sekundi korištenja višenamjenske opreme jedinične vrijednosti
<i>ROB1</i>	USD	Cijena robota sa četiri stupnja slobode uključujući upravljačku jedinicu, senzore, višenamjensku hvataljku
<i>ROB2</i>	USD	Cijena dvaju robota, svaki s po četiri stupnja slobode uključujući upravljačku jedinicu, senzore, višenamjensku hvataljku
<i>RP</i>		broj ponavljanja operacije
<i>SF</i>		jednonamjenski dodavač
<i>TA</i>	s	ukupno vrijeme operacije
<i>TAT</i>	s	vrijeme ciklusa
<i>TB</i>	s	osnovno vrijeme operacije
<i>TG</i>	s	relativna vremenska kazna za promjenu hvataljke ili alata
<i>TOT</i>	s	vrijeme ručnog rada
<i>TP</i>	s	relativno efektivno vrijeme operacije

<i>TR</i>	s	relativno kazneno vrijeme za konačno orijentiranje robota
<i>TT</i>	s	vrijeme ručnog rukovanja i umetanja (pri sklapanju)
USD		američki dolar

POPIS SLIKA

Slika 1. Najveći proizvođači nogometnih lopti u 2010. godini [2]	2
Slika 2. Udio proizvodnje sportskih lopti po sportovima [2]	2
Slika 3. Montažna linija u Fordu, vrijeme montaže motora Modela T smanjeno je s 594 minute na 224 minute [5]	5
Slika 4. Prva robotska montažna linija u tvornici automobila Ford Motor Company u Flatrocku [1]	5
Slika 5. Stanica s jednim robotom [6]	10
Slika 6. Stanica s dva robota [6]	11
Slika 7. Višestanični robotski sustav [6]	11
Slika 8. Razvoj nogometnih lopti sa svjetskih prvenstava: a) T-model, lopta s prvog svjetskog prvenstva u Urugvaju 1930., b) Telstar, prva lopta sa specifičnim dizajnom od 32 panela na prvenstvu u Meksiku 1970., c) Adidasova lopta Al Rihla sa svjetskog prvenstva u Katru 2022.	14
Slika 9. Ručno šivanje nogometnih lopti u Pakistanu [13]	16
Slika 10. Cijena po proizvodu, USD	35

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba značajki montaže i izrade dijelova	6
Tablica 2. Karta 1- stanica s jednim robotom [6].....	18
Tablica 3. Polje karte za robotsku montažu s jednim robotom	19
Tablica 4. Obrazac za robotsko sklapanje proizvoda.....	20
Tablica 5. Metoda sređivanja dijelova	22
Tablica 6. Obrazac analize robotske proizvodnje za stanicu s jednim robotom	23
Tablica 7. Karta 2- stanica s dva robota	28
Tablica 8. Obrazac analize robotske proizvodnje za stanicu s dva robota.....	29
Tablica 9. Karta 3- višestanični robotski sustav.....	32
Tablica 10. Obrazac analize robotske proizvodnje za višestanični robotski sustav.....	33

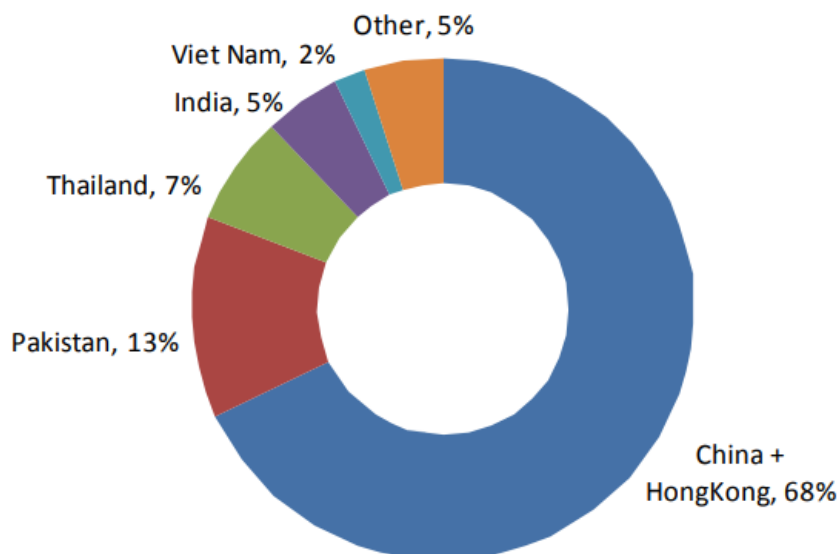
1. UVOD

Kao i u vremenima prvih civilizacija, tehnologija montaže i danas predstavlja bitan dio u svakom proizvodnom sustavu u kojem se završni sklop sastoji od barem dva ili više elementa. Njena važnost ističe se kroz činjenicu da je više od 40 % radnika industrijskih zemalja zaposleno na poslovima sklapanja i da na sastav često odlazi više od 50 % ukupne cijene proizvoda. [1]

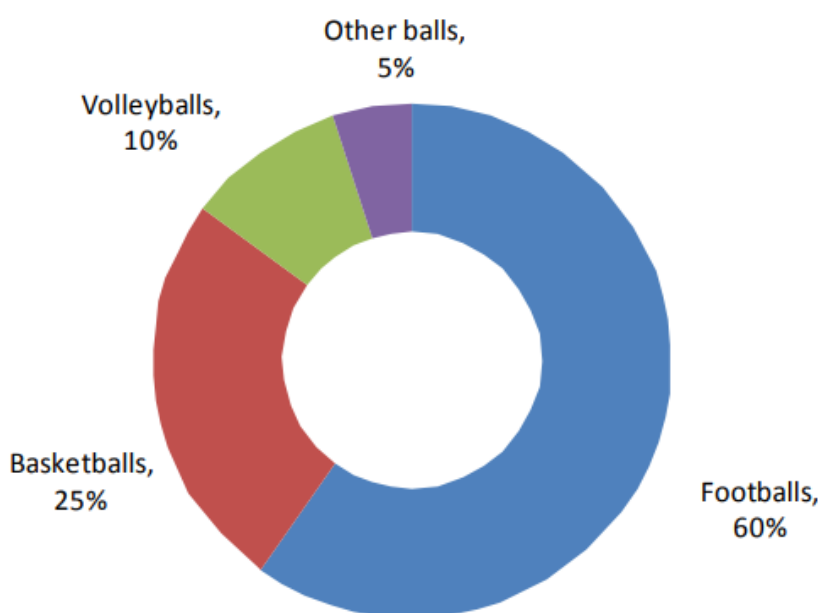
Značaj montaže očituje se i u razvoju mnogih inženjerskih metoda analize i preoblikovanja proizvoda za postizanje racionalnije i efikasnije montaže, među kojima je i metoda DFA. Prvotno namijenjena za ručnu, DFA metoda danas se upotrebljava i kod analize za visokobrzinsku (automatsku) i robotsku montažu. Glavne prednosti robotske montaže nad ručnom jesu: smanjenje cijene troškova operacija sklapanja, povećanje produktivnosti, ujednačenost kvalitete proizvoda i sigurnost radnika. [1]

U radu će se provesti analiza nogometne lopte za robotsku proizvodnju i montažu. Nogometna lopta primjer je proizvoda koji se proizvodi u velikim količinama. Prema FIFA-i, godišnje se proda otprilike 40 milijuna nogometnih lopti. Primjer uspješne automatizacije proizvodnje postigla je Kina, koja je najveći svjetski proizvođač nogometnih lopti (Slika 1.). Unatoč tome, procjenjuje se da se 20 % lopti u svijetu i dalje šije ručno, od čega čak 70 % u Pakistanu. [2]

U radu će se provesti analiza za robotsko sklapanje nogometne lopte za stanicu s jednim robotom, stanicu s dva robota i višestanični robotski sustav.



Slika 1. Najveći proizvođači nogometnih lopti u 2010. godini [2]



Slika 2. Udio proizvodnje sportskih lopti po sportovima [2]

2. MONTAŽA

Gotovo svaki proizvod na tržištu, tokom svoje proizvodnje prošao je kroz proces sklapanja. Montaža ili sklapanje predstavlja postupak spajanja različitih dijelova, komponenti ili objekata kako bi se stvorio funkcionalan i cjelovit proizvod, sustav ili konstrukcija. Osim u mnogim industrijama, kao što su građevinarstvo, strojarstvo, elektronika, brodogradnja i zrakoplovstvo, montaža je zastupljena i u svakodnevnom životu, primjerice u kućanstvima kod sastavljanja namještaja ili igračaka. [1]

Ključni pojmovi vezani uz proces montaže su sklop, sastavljač i montažna linija. Sklopovi su dijelovi koji su dizajnirani da budu međusobno zamjenjivi i spojivi, a završni sklop predstavlja sam proizvod. Sastavljač ili montažer je osoba ili stroj koji obavlja montažu dijelova kako bi se stvorio konačan proizvod, te ima ključnu ulogu u sigurnom, preciznom i učinkovitom sastavljanju proizvoda. Montažna linija je organizirani sustav proizvodnje u kojem se proizvod kreće kroz niz stanica, a svaka stanica obavlja određeni korak u montaži proizvoda. U svojoj autobiografiji, Henry Ford spominje benefite montažne linije: radnici ne dižu teške stvari i ne saginju se te nije potrebna posebna obuka za radnike. [3]

Montaža je neizbježna u slučajevima:

- ako se funkcija proizvoda ne može ostvariti jednim ugradbenim elementom
- kada se treba osigurati međusobnu pokretljivost ugradbenih elemenata
- potrebe za ugradbenim elementima od različitih materijala
- jeftinije izrade dvaju ugradbenih elemenata nego jednoga
- osiguranja zamjenjivosti, transporta i demontaže ugradbenih elemenata radi smanjivanja troškova ili održavanja proizvoda
- posebnih zahtjeva u vezi s proizvodom. [1]

2.1. Povijesni razvoj

Začeci montaže, koji sežu u početke ljudske civilizacije, vežu se uz izradu alata, kuća i skloništa. Sve do prve industrijske revolucije, proizvodi su se sklapali ručno, u malim radionicama, koristeći jednostavne alate i oslanjajući se na vještine radnika. Ključni elementi koji su značajno utjecali na razvoj industrijskog montažnog procesa su koncept zamjenjivih dijelova i pojava konvejera. Početak industrijske revolucije, posebno s razvojem parnih strojeva, doveo je do masovne proizvodnje. Smatra se da je koncept montažne linije (Slika 3.) prvi put primijenjen u tvornici automobila u Detroitu od strane Henryja Forda, čime se značajno povećala produktivnost i smanjili troškovi proizvodnje. U 20. stoljeću, s razvojem električnih alata i mehaničkih sustava, montaža je postala učinkovitija i preciznija. Radnici su koristili napredne alate koji su ubrzali proizvodnju i povećali kvalitetu montaže. Prvi industrijski roboti pojavili su se 1950-ih i 1960-ih godina, čime je započela era automatizacije. Roboti su postali sposobni obavljati složene montažne operacije i preuzimaju ključnu ulogu u povećanju produktivnosti i preciznosti u proizvodnji. Tijekom 1970-ih godina, na tržištu je došlo do povećane potrebe za većom fleksibilnošću u procesima dizajna i proizvodnje. Razvoj računalne tehnologije i upravljanje proizvodnim sustavima omogućili su sofisticiraniju kontrolu i nadzor nad proizvodnjom. To je omogućilo povezivanje strojeva u fleksibilnije i kompleksnije montažne linije. Napredak u području robotike i umjetne inteligencije 2000-ih godina omogućio je razvoj naprednih robotskih sustava koji mogu surađivati s ljudima i imati sposobnost učenja, naprimjer promatranjem rada drugih ljudi i robota. To je dovelo do "pametnih tvornica" i napredne automatizacije u industrijskoj montaži. Nakon široke primjene u industriji, očekuje se daljnja integracija robota u kućanstvima, transportu, uslužnim djelatnostima i mnogim drugim sektorima. [4]



Slika 3. Montažna linija u Fordu, vrijeme montaže motora Modela T smanjeno je s 594 minute na 224 minute [5]



Slika 4. Prva robotska montažna linija u tvornici automobila Ford Motor Company u Flatrocku [1]

2.2. Osobitosti montaže

Porastom broja ugradbenih elemenata i složenosti njihove geometrije, povećava se kompleksnost montažnog procesa i otežava njegovo planiranje i upravljanje. Rješenja primijenjena u montaži nekoga proizvoda samo se rijetko i uz dodatan napor dađu uporabiti za montažu drugog, različitog proizvoda. To je redovit slučaj kod jednonamjenskih, nefleksibilnih sustava. Montaža sklopova i proizvoda često se obavlja na istoj mikrolokaciji s izradbenim sustavom. No, u namjeri smanjenja troškova radne snage i/ili transporta, odnosno ostvarenja većeg profita, montažni se sustavi dislociraju u područja niskog vrednovanja radne snage ili u blizinu tržišta. [6]

Tablica 1. Usporedba značajki montaže i izrade dijelova

MONTAŽA	IZRADA DIJELOVA
Više ugradbenih elemenata u procesu	Jedan izradak u procesu
Ugradbeni elementi složene geometrije	Pripreмки jednostavne geometrije
Različite montažne operacije na više ugradbenih elemenata	Različite izradbene operacije na jednom izratku
Masa i obujam objekta montaže rastu	Masa i obujam izratka se smanjuju
Na istom se objektu izvodi više puta	Obrada se na izratku izvodi samo jednom
Puno rukovanja ugradbenim elementom	Malo rukovanja izratkom

3. OBLIKOVANJE PROIZVODA ZA SKLAPANJE

Prilikom razvoja proizvoda, donosi se niz odluka koje imaju utjecaj na cjelokupno poslovanje tvrtke. Proizvod mora zadovoljiti određene funkcionalne zahtjeve kako bi privukao interes kupaca i potaknuo njihovu kupnju. Također, proizvod mora ispunjavati određene tehničke zahtjeve kako bi se mogao prilagoditi proizvodnom procesu unutar tvrtke. Ovo uključuje definiranje specifikacija za cijeli asortiman proizvoda, kao i za svaki pojedini dio proizvoda kako bi se uklopio u određeni stroj ili postupak montaže. Postoje tehnike i strategije koje omogućuju usmjerenje na aspekte montaže tijekom faze konstruiranja, unatoč tome što je montaža obično posljednji korak u proizvodnom procesu prije slanja proizvoda kupcu. Ovaj proaktivan pristup konstrukciji s naglaskom na montažu ima za cilj pojednostavniti proizvodni proces, smanjiti troškove i poboljšati ukupnu kvalitetu proizvoda. Tehnike DFA i DFM često se koriste da bi se izbjegli poznati problemi u montaži i proizvodnji. Osnovna ideja je vrlo jednostavna: cilj je ukloniti potencijalne probleme koji se mogu pojaviti tijekom proizvodnje i montaže već prije završetka izrade i sklapanja proizvoda. [7]

3.1. Značajke sklopivosti proizvoda

Tehnološkičnost proizvoda za sklapanje, ili sklopivost proizvoda, označava sposobnost ili karakteristike proizvoda koje omogućuju jednostavnije i efikasnije sklapanje proizvoda. To znači da proizvod ima konstrukciju koja olakšava postupak sklapanja, čineći ga jednostavnijim, bržim i sa što manje potrebnih alata.

Sklopivost proizvoda se očituje u sljedećim značajkama proizvoda odnosno smjernicama:

- postojanje baznoga ugradbenog elementa
- ostvarenje što manjeg broja osi sklapanja i ostvarenje smjera sklapanja odozgo nadolje

- postizanje jednostavnih linearnih putanja sklapanja
- primjena pogodnih tehnika spajanja
- primjena standardnih ugradbenih elemenata
- pogodan oblik ugradbenih elemenata
- učinkovita primjena načela eliminacije i integracije ugradbenih elemenata, te minimiranje broja veza spojeva između dijelova i sklopova
- definiranje odgovarajućih dosjeda ugradbenih elemenata. [6]

Navedene smjernice i karakteristike proizvoda za sklapanje koriste se kao osnova za različite inženjerske metode analize i preoblikovanja proizvoda kako bi se osigurala što veća tehnološkičnost i optimizacija procesa sklapanja. Neki od tih inženjerskih metoda uključuju Hitachi AEM, Lucas Design For Assembly Method, Sony DAC, te Boothroydovu i Dewhurstovu metodu DFA. Navedene metode pružaju strukturirane pristupe za procjenu i poboljšanje sklopivosti proizvoda kako bi se postigla racionalna i efikasna montaža.

3.2. Metoda DFA

Design For Assembly ili kraće DFA metoda je postupak tehnološkog oblikovanja proizvoda za montažu. Metoda je razvijena 1980. godine u Sjedinjenim Američkim Državama od strane Petera Dewhursta i Georgea Boothroyda. Svrha metode je smanjiti troškove sklapanja uz povećanje kvalitete proizvoda, i smanjenje potrebnog vremena za plasiranje proizvoda na tržište. Ciljevi metode su smanjenje broja ugradbenih elemenata, olakšano spajanje preostalih ugradbenih elemenata i smanjenje grešaka tijekom montaže. Rezultati metode su stvaranje konkretnih procjena vezanih za vrijeme, troškove i efikasnost u kontekstu montaže proizvoda. Metoda je sustavna i odvija se u tri stupnja. U prvom stupnju se odabire metoda sklapanja, a zatim se provodi analiza proizvoda za sklapanje. To može biti analiza proizvoda za ručno sklapanje, analiza proizvoda za (visokobrzinsko) automatsko sklapanje i analiza proizvoda za robotsko sklapanje. U trećem stupnju metode dolazi do preoblikovanja i poboljšanja proizvoda te ponovne analize. DFA metoda primjenjuje se u vodećim svjetskim tvrtkama. Postoje mnoge studije koje pokazuju značajne uštede. Boothroyd i Dewhurst za preko 100 industrijskih slučajeva govore o prosječnim uštedama od: 54 % ušteda u smanjenju broja dijelova, smanjenje vremena razvoja proizvoda za 63 % i smanjenje troškova rada za 42 %. Ipak, nije moguće

garantirati uštedu za svaku novu kompaniju, budući da ona ovisi o njihovim trenutnim praksama, proizvodima i sposobnostima implementacije metode DFA. [6 i 7]

3.3. Analiza proizvoda za robotsko sklapanje

Povećan interes za korištenjem robota u automatizaciji montaže krenuo je 1970-ih godina. Automatska i robotska montaža uglavnom se primjenjuje kod velikih proizvodnih količina (barem jedan do dva milijuna godišnje) i u situacijama kada je proizvod stabilan na tržištu te kad postoji konstanta potražnja za njim. Robotizacija podrazumijeva viši stupanj zamjene ljudskog rada strojevima. Jedan od najpopularnijih američkih montažnih robota, nazvan PUMA, napravljen je tako da ima karakteristike što sličnije ljudima. S druge strane, npr. u Japanu, se koristi praktičniji pristup u kojem se nastoji robote prilagoditi ljudima, kao pomagače u svakodnevnim poslovima. [4]

3.3.1. Prednosti robotskog sklapanja

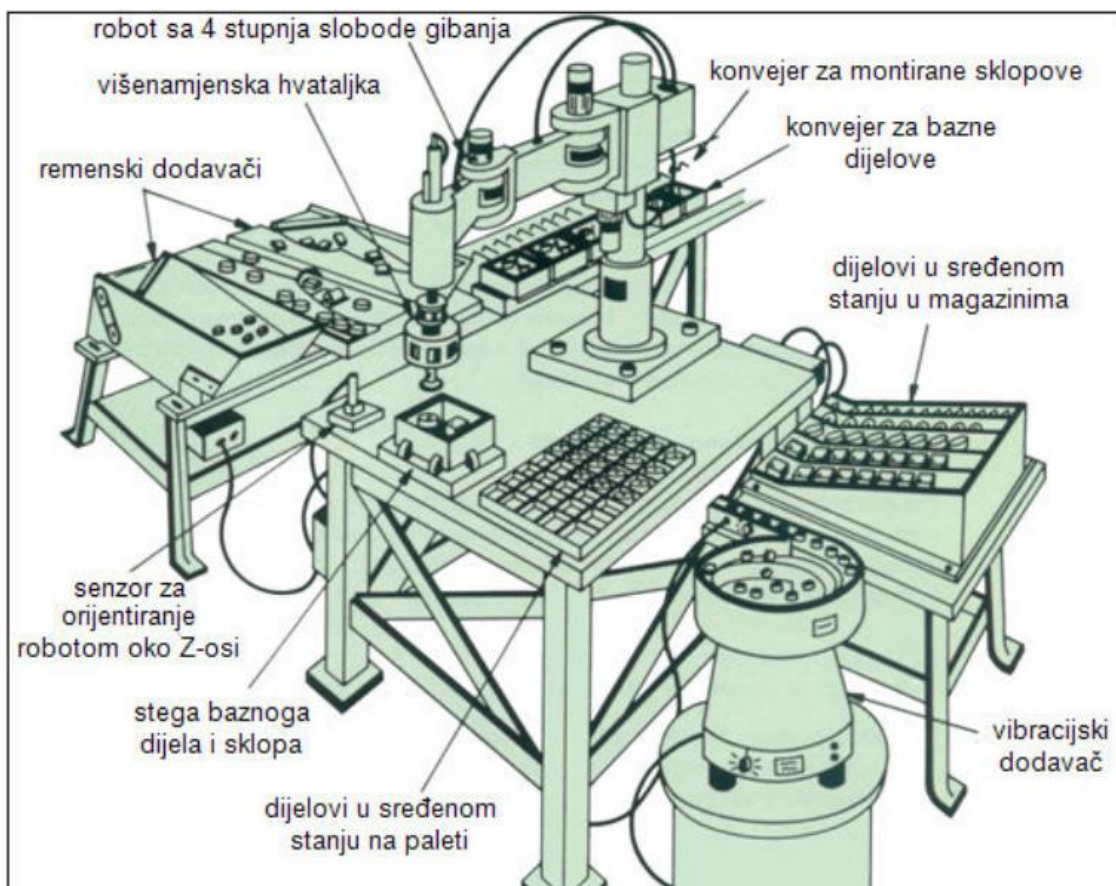
Neke od glavnih prednosti upotrebe robota za montažu jesu [8]:

- robot se može reprogramirati u slučaju promjene dizajna proizvoda
- robotski sustav se može reprogramirati kako bi se prilagodio različitim varijantama istog proizvoda. Na primjer, robot se može ponovno programirati da odabere samo određene dijelove za montažu, ovisno o varijanti proizvoda koja se trenutačno sklapa.
- robot se može programirati da prepozna potencijalne probleme ili da ponovi postupak umetanja proizvoda
- velika prednost robotskog sklapanja je ta što se dijelovi mogu dostavljati u nizovima na paletama ili pladnjevima za dijelove. Mnoge restrikcije koje vrijede za veličinu dijelova u visokobrzinskoj automatskoj montaži ne vrijede kod robotskog sklapanja.

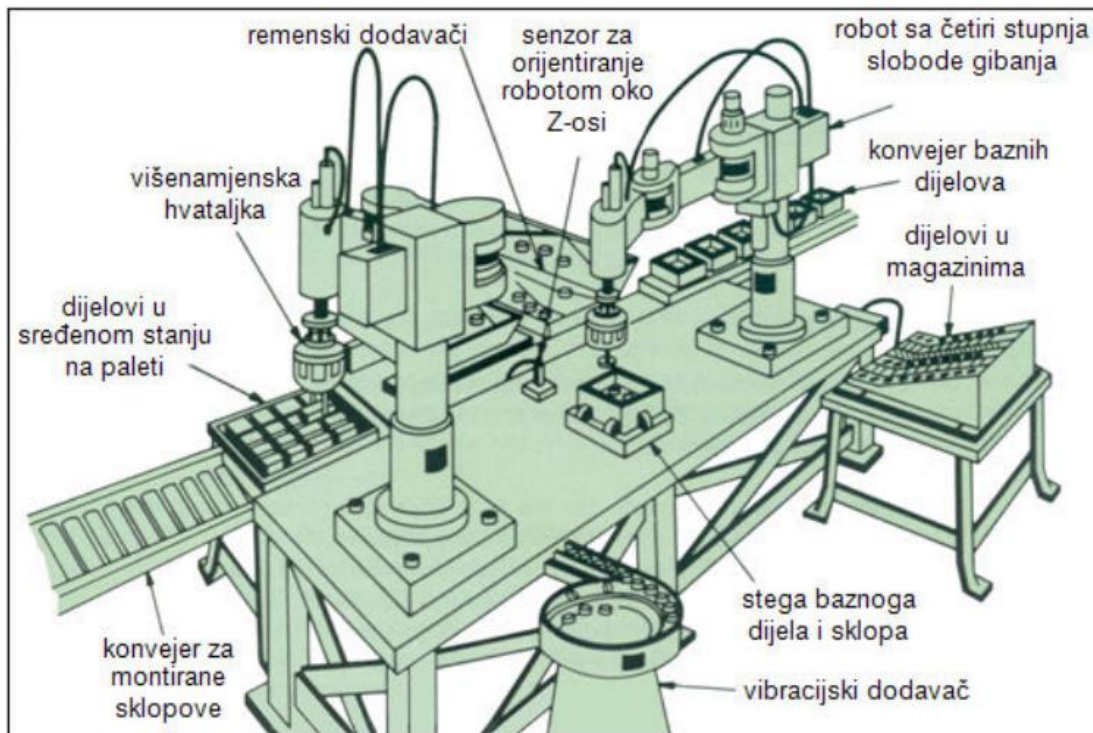
3.3.2. Robotski sustavi

Razlikuju se tri tipa robotskih sustava: stanica s jednim robotom, stanica s dva robota i višestanični robotski sustav. [6]

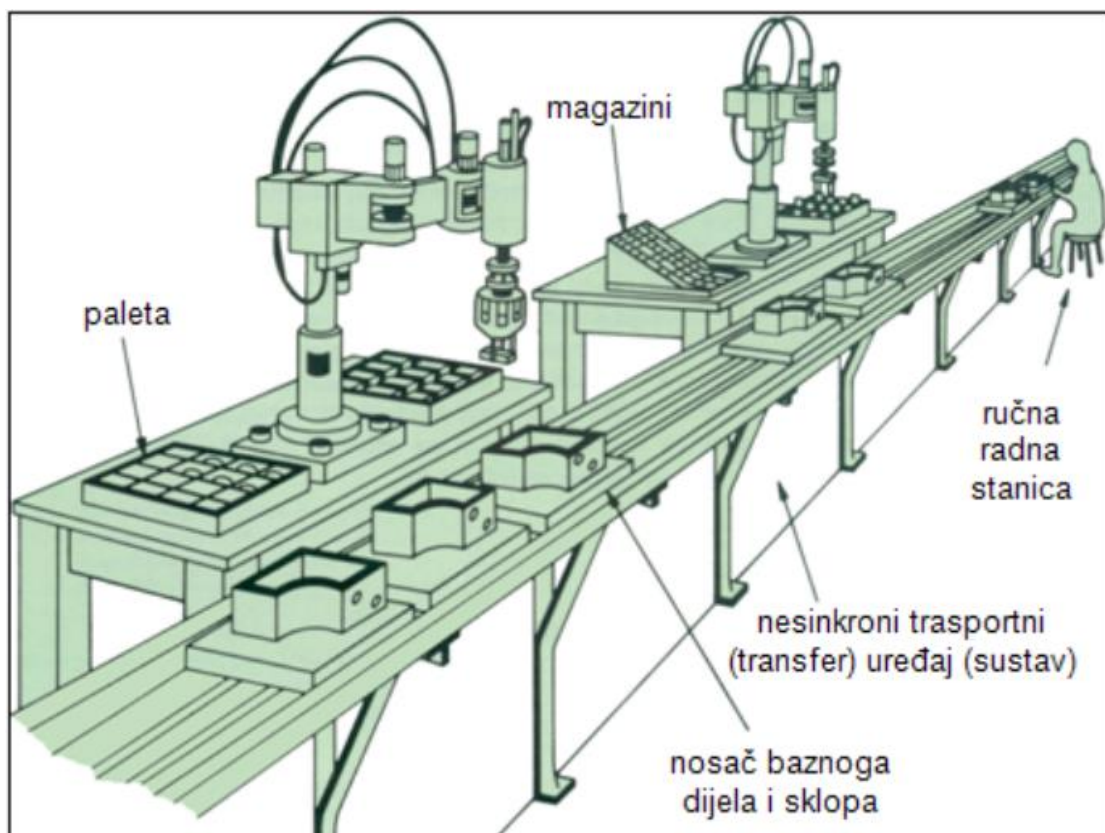
Jednostanični robotski sustav (Slika 5.) uglavnom se koristi za jednostavnije zadatke kao što je zavarivanje ili pakiranje gotovog proizvoda. Stanicu s dva robota (Slika 6.) odlikuje veća funkcionalnost i fleksibilnost, a višestanični robotski sustav (Slika 7.) u svom radu često koristi napredne tehnologije poput umjetne inteligencije i strojnog učenja i odlikuje ga najveća razina fleksibilnosti.



Slika 5. Stanica s jednim robotom [6]



Slika 6. Stanica s dva robota [6]



Slika 7. Višestanični robotski sustav [6]

3.3.3. Troškovi montaže

Kako bi se odredili troškovi robotske proizvodnje potrebno je procijeniti sljedeće:

- ukupnu cijenu sve višenamjenske opreme korištene u sustavu- cijenu svih robota, transportnih sustava i višenamjenskih hvataljki
- ukupnu cijenu sve jednonamjenske opreme i alata – jednonamjenske radne glave, posebne stege, posebne robotske alate, jednonamjenske dodavače, posebne magazine i palete za dijelove
- prosječno vrijeme ciklusa proizvodnje
- ukupnu cijenu svih troškova po sklopu. [9]

3.3.4. Sažetak pravila za robotsku montažu

Većina pravila koja vrijede kod konstrukcije proizvoda za ručnu i visokobrzinsku automatsku montažu također vrijedi i kod konstrukcije proizvoda za robotsku montažu. Ključna pravila kojih se treba pridržavati jesu:

- smanjenje broja dijelova
- odabir pogodnih oblika ugradbenih elemenata
- osigurati da dijelovi koji se odmah ne fiksiraju budu pričvršćeni tijekom montaže
- oblikovati dijelove tako da ih sve može hvatati i umetati ista robotska hvataljka
- oblikovati dijelove tako da se mogu sklapati odozgo- montaža po z-osi
- izbjegavati potrebu za bilo kakvom manipulacijom prethodno sastavljenih dijelova
- oblikovati dijelove da se mogu lako rukovati dok su u gomili
- ako se dijelovi dostavljaju pomoću automatskih dodavača, ili ako se premještaju u spremnike, osigurati da imaju stabilan položaj iz kojeg se mogu uhvatiti i umetnuti bez robotske manipulacije
- ako se dijelovi sređuju automatskim dodavačima, onda osigurati da se mogu orijentirati jednostavnim orijentacijskim stazama
- ako dijelovi trebaju biti sređeni u magazinima ili paletama, onda osigurati da imaju stabilan mirujući položaj, takav da se mogu hvatati i umetati bez bilo kakve manipulacije robotom. [9]

4. NOGOMETNA LOPTA

Još od drevnih vremena pa do današnjeg modernog nogometa, razvoj nogometne lopte odražava promjene u materijalima, dizajnu i načinu proizvodnje i prati evoluciju samog nogometa. Najstariji zapisi potječu iz Kine 1697. g.pr.Kr. i opisuju igru kožnom loptom punjenom životinjskom dlakom i plutom. Kasnije se u antičkoj Grčkoj i Rimu spominju ručno rađene lopte punjene dlakom. U 19. stoljeću, počela su se uspostavljati pravila i norme za nogomet kao sport. [10]

Usporedo s razvojem nogometa, mijenao se i način proizvodnje i izrade nogometnih lopti. U 19. stoljeću počele su se koristiti lopte od kože i šivanog tekstila, a krajem stoljeća upotrebom gume došlo je do velikog iskoraka. Industrijska revolucija omogućila je masovniju proizvodnju, te su lopte postale dostupne širem broju ljudi. Sredinom 20. stoljeća, razvijali su se sintetički materijali poput poliestera i poliuretana, a lopte dobivaju puno veći vijek trajanja. Na svjetskom prvenstvu 1986. korištena je prva potpuno sintetička lopta. Tijekom proteklih desetljeća, tehnologija nogometnih lopti nastavila se razvijati, a proizvođači i dalje nastoje poboljšati karakteristike i povećati izdržljivost. Pojavila se metoda termičkog spajanja bez vidljivih šavova, kao i novi materijali poput sintetičke kože od mikrovlakana, poliuretanske pjene i mjehurići od vlakana.

Na posljednjem svjetskom nogometnom prvenstvu u Katru korištena je lopta Adidas Al Rihla (Slika 8. c) koja u svom središtu ima inercijske senzore koji bilježe kretanje lopte i do 500 puta u sekundi. Ti podaci se uz pomoć umjetne inteligencije koriste u VAR sobama pri detekciji zaleđa ili postizanja pogotka. [11]



a)



b)



c)

Slika 8. Razvoj nogometnih lopti sa svjetskih prvenstava: a) T-model, lopta s prvog svjetskog prvenstva u Urugvaju 1930., b) Telstar, prva lopta sa specifičnim dizajnom od 32 panela na prvenstvu u Meksiku 1970., c) Adidasova lopta Al Rihla sa svjetskog prvenstva u Katru 2022.

4.1. Proces izrade i montaže nogometne lopte

Naizgled jednostavan proces izrade i sklapanja nogometne lopte prolazi kroz više faza:

- Prvi korak u izradi nogometne lopte je izrezivanje panela. Tradicionalni dizajn nogometne lopte sastoji se od 32 panela, 20 u obliku šesterokuta i 12 u obliku peterokuta. Najčešće se izrađuju od umjetne kože zbog svoje izdržljivosti i vodootpornosti.
- Potom se na izrezane panele tiskaju različiti grafički elementi, poput logotipa proizvođača.
- Nakon tiskanja panela slijedi njihovo šivanje. Mogu se šivati jednim šavom, ali preporučuje se dupli šav radi povećanja izdržljivosti zbog velikog broja udaraca i opterećenja kojima lopta podilazi tokom igre.
- Potom se kroz mali otvor koji je ostavljen pri šivanju umeće unutarnji mjehur (balon) s ventilom, koji osigurava da lopta zadržava svoj okrugli oblik. Mjehur se izrađuju od lateksa ili butila. Mjehuri od lateksa su elastičniji i mekši dok mjehuri od butila duže zadržavaju zrak.
- Nakon umetanja mjehura, dolazi do zatvaranja lopte i šivanja završnih šavova.
- Kroz poseban ventil na lopti se upuhuje zrak i lopta dobiva svoj konačan oblik.
- Slijedi proces kontrole koji uključuje vaganje i mjerenje dimenzija lopte.
- Nakon kontrole kvalitete na loptu se lijepi etiketa. [12]

Više je proizvodnih okružja u kojima nogometne lopte mogu biti proizvedene. U obrtničkoj proizvodnji svi procesi izrade i montaže obavljaju se ručnim radom. Takav tip proizvodnje karakteriziraju manje proizvodne količine, ali uz dobre vještine radnika naglasak može biti na kvaliteti lopte. U poluautomatiziranom sustavu strojevi su korišteni za neke operacije, naprimjer izrezivanje panela, šivanje panela, ali ljudi i dalje imaju značajnu ulogu u procesu proizvodnje. Automatizirani sustavi imaju minimalan ljudski angažman, a najčešće predstavljaju kombinaciju robota i strojeva. U ovom radu **provest će se analiza za cijeli proces izrade i sklapanja isključivo uz pomoć robota: na stanici s jednim robotom, stanici s dva robota i višestaničnom robotskom sustavu.**

4.2. Robotsko sklapanje nogometne lopte

S obzirom da su oblik, dimenzije i težina nogometne lopte definirani međunarodnim pravilima, u budućnosti se u tom aspektu ne mogu očekivati značajne promjene i inovacije. Korištenjem novih materijala od kojih bi se radili paneli i unutarnji mjehur moguće je dodatno poboljšati njene specifikacije. Međutim, promjena je moguća u procesu proizvodnje nogometne lopte i to sa povećanom automatizacijom i robotizacijom proizvodnje. Jedna od prednosti prelaska s ručne na robotsku proizvodnju je i iskorjenjivanje loših radnih uvjeta. U Sjedinjenim Američkim Državama je 1994. godine objavljeno da nogometne lopte šiju djeca u lošim radnim uvjetima. Pod pritiskom javnosti i sportaša, proizvođači su uspostavili odjele za zaštitu prava radnika i djece, te su se obvezali da će uvjeti u proizvodnji nogometnih lopti biti humaniji. [9]

Ručno šivanje i sklapanje nogometne lopte zahtijeva dugotrajan i monoton rad, s ponavljajućim pokretima koji povećavaju podložnost radnika ozljedama i stresu. Automatizacija proizvodnje smanjuje fizičko opterećenje radnika i pruža sigurnije i zdravije radno okruženje. Korištenjem robota povećava se brzina i produktivnost te se minimira mogućnost pogrešaka. Osim toga, moderni robotski sustavi su sve fleksibilniji što omogućava brzu prenamjenu za različite vrste lopti ili potpuno nove proizvodne postupke.



Slika 9. Ručno šivanje nogometnih lopti u Pakistanu [13]

5. ANALIZA NOGOMETNE LOPTE ZA ROBOTSKO SKLAPANJE

Kako je već rečeno, provest će se analiza robotske montaže za stanicu s jednim robotom, stanicu s dva robota i višestanični robotski sustav, i to za pretpostavljenu količinu od 1 000 000 proizvoda u godini, u vremenu od 6 smjena-godina. Proces izrade i sklapanja je opisan u točki 4.1.

5.1. Stanica s jednim robotom

Za analizu sklapanja proizvoda jednostaničnim robotskim sustavom, podaci se očitavaju iz karte 1 – Tablice 2. Prvi dio karte (retci 0, 1 i 2) odnosi se na dijelove koji nisu odmah osigurani po umetanju. Drugi dio karte (retci 3, 4 i 5) odnosi se na operacije kod kojih su dodani dijelovi odmah osigurani pri umetanju, dok u treći dio karte (retci 6, 7 i 8) spadaju operacije kao što su: spajanje kod kojeg su dijelovi već na pravome mjestu (naprimjer lemljenje), rukovanje dijelovima (ili čitavim sklopom), ili dodavanje bezobličnih tvari poput maziva itd. Odgovarajući redak svake sekcije karte 1 određen je smjerom sklapanja. U vertikalnom smjeru, stupci su podijeljeni (od 0 do 8) na osnovi procesa ili operacije i razmjera poteškoća pri njihovom odvijanju, tako se npr. u karti odabire stupac 8 ukoliko je otpor umetanju prevelik za robotsku montažu.

Tablica 2. Karta 1- stanica s jednim robotom [6]

		dio se može hvatati i umetati standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				dio zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku						
		nije potrebno pridržavanje		dio zahtijeva privremeno pridržavanje ili stezanje		nije potrebno pridržavanje		dio zahtijeva privremeno pridržavanje ili stezanje				
		samoporavnavanje...										
		gibanje uzduž ili oko...	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati		
		0	1	2	3	4	5	6	7			
dio je dodan, ali nije konačno osiguran	okomite osi	0	1 1 0 0	1 1,07 0 0	1 1 1 0	1 1,07 1 0	1 1 1,5 2,1	1 1,07 1,5 2,1	1 1 2,5 2,1	1 1,07 2,5 2,1		
	neokomite osi	1	1,5 1 0 0	1,5 1,07 0 0	1,5 1 1 0	1,5 1,07 1 0	1,5 1 1,5 2,1	1,5 1,07 1,5 2,1	1,5 1,0 2,5 2,1	1,5 1,07 2,5 2,1		
	više no jedne osi	2	1,5 1,8 0 0	1,5 1,9 0 0	1,5 1,8 1 0	1,5 1,9 1 0	1,5 1,8 1,5 2,1	1,5 1,9 1,5 2,1	1,5 1,8 2,5 2,1	1,5 1,9 2,5 2,1		
sila ili uvijanje unutar sposobnosti robota												
		dio se može hvatati i umetati standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				dio zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku				posebna operacija radne glave – robot pozicionira dio		
		uskočni spoj		uskočni spoj i uvijanje, ili druga jednostavna manipulacija		uskočni spoj ili jednostavna manipulacija		vijčanje (vijaka ili matica)				
		samoporavnavanje...										
		gibanje uzduž ili oko...	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da		nije lako poravnati	
		0	1	2	3	4	5	6	7	8		
dio je dodan, i odmah konačno osiguran	okomite osi	3	1 1 0 0	1 1,07 0 0	1 1,15 0 0	1 1,2 0 0	1 1 1,5 2,1	1 1,07 1,5 2,1	1 1,25 1,5 2,1	1 1,3 1,5 2,1	1 2 4 2,1	
	neokomite osi	4	1,5 1 0 0	1,5 1,07 0 0	1,5 1,15 0 0	1,5 1,2 0 0	1,5 1 1,5 2,1	1,5 1,07 1,5 2,1	1,5 1,25 1,5 2,1	1,5 1,3 1,5 2,1	1,5 2 4 2,1	
	više no jedne osi	5	1,5 1,8 0 0	1,5 1,9 0 0	1,5 2 0 0	1,5 2,1 0 0	1,5 1,8 1,5 2,1	1,5 1,9 1,5 2,1			1,5 2,8 4 2,1	
		operacija se može izvesti standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				operacija zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku ili alat				posebna operacija radne glave – robot pozicionira dio		
		uskočni spoj		uskočni spoj i uvijanje ili jednostavna manipulacija		preorijentiranje ili skidanje sklopa		uskočni spoj			pritezanje vijaka ili matica	
		lemljenje		primjena tekućina ili adheziva		preorijentiranje ili skidanje sklopa						
		gibanje uzduž ili oko...	0	1	2	3	4	5	6		7	8
posebna operacija osiguranja ili manipulacije, ili preorijentiranje, ili dodavanje nečvrste tvari	okomite osi	6	1 0,75 0 0	1 0,85 0 0	1 0,75 0 0	1 0,8 1,5 2,1	1 0,9 1,5 2,1	1 1,2 1,5 2,1	1 1 1,5 2,1	1 1 1,5 2,1	1 2 4,5 2,1	
	neokomite osi	7	1,5 0,75 0 0	1,5 0,85 0 0	1 1 0 0	1 0,75 1,5 2,1	1,5 0,8 1,5 2,1	1,5 0,9 1,5 2,1	1,5 1,2 1,5 2,1	1,5 1 1,5 2,1	1,5 2 4,5 2,1	
	više no jedne osi	8	1,5 1,4 0 0	1,5 1,6 0 0	1,5 1,8 0 0	1,5 1,4 1,5 2,1	1,5 1,5 1,5 2,1	1,5 1,7 1,5 2,1	1,5 2,0 1,5 2,1	1,5 1,8 1,5 2,1	1,5 3,2 4,5 2,1	

5.1.1. Polje karte za robotsko sklapanje

Odabirom odgovarajućeg broja retka i broja stupca karte identificira se odgovarajuće polje karte (npr. 56). Ta se dvobrojna oznaka naziva oznakom robotskog umetanja i upisuje se u obrazac za robotsko sklapanje zajedno s podacima o relativnim vremenima i cijenama koje su sadržane u odgovarajućem polju karte. Za prvu operaciju (izrezivanje šesterokutnih panela) odabire se oznaka robotskog umetanja 65.

Tablica 3. Polje karte za robotsku montažu s jednim robotom

AR – relativna cijena robota	stupac 5		TP – relativno osnovno efektivno vrijeme operacije
	↘		↙
redak 6	1	1,2	
	1,5	2,1	
	↗	↖	
AG – relativna dodatna cijena hvataljke ili alata			TG – relativna vremenska kazna za promjenu hvataljke ili alata

Vrijednost $AR = 1$, što znači da je u obzir dovoljno uzeti osnovnu kapitalnu cijenu instaliranog standardnog robota s četiri stupnja slobode (uljučujući sve upravljačke elemente, senzore itd., i sposobnog samo za okomita umetanja) koja iznosi 60 kUSD.

Vrijednost $AG = 1,5$. Naime, za obavljanje operacije izrezivanja potreban je specijalan alat (nož, laser). Procijenjena je cijena toga alata 1,5 puta veća od cijene standardne hvataljke tako da će alat za izrezivanje koštati 7500 USD.

Vrijednost $TP = 1,2$, a budući da se za suvremeni robot vrijednost osnovnog efektivnog vremena operacije uzima oko 3 s, kazneno vrijeme iznosi 0,6 sekundi.

Vrijednost $TG = 2,1$ i pomnoženo s osnovnim vremenom od 3 s daje vrijeme za promjenu alata od 6,3 s.

Kada se ispune svi retci obrasca, vrijednosti TA svih operacija se zbrajaju, dajući vrijeme ciklusa sustava, TAT. Vrijednost TAT važan je parametar kada je cijena sklapanja konačno određena. Nakon kompletiranja obrasca, provjeravaju se vrijednosti u stupcu 4 kako bi se ustanovila maksimalna vrijednost relativnih cijena robota, AR. Maksimalna vrijednost AR koristi se za konačne izračune, budući da je isti robot namijenjen izvođenju svih operacija, pa mora biti sposoban izvoditi i najsloženije od njih. Nadalje, vrijednosti u 5. stupcu zbrajaju se da bi se odredila ukupna relativna cijena hvataljke ili alata, AGT. Veličina AGT uključuje cijenu izrade dodatne prihvatnice, kao i cijenu projektiranja posebnih naprava na stezi, za pridržavanje dijelova, koji nisu samosmjestajući. Potom je neophodno odrediti cijenu ostale opreme u sustavu i eventualnog ručnog rada. Cijena ostale opreme uključuje opremu za sređivanje dijelova – dodavača ili magazina i specijalnih stega komada.

5.1.3. Metoda sređivanja dijelova

Prije ispunjavanja preostalih stupaca obrasca, odlučuje se između dvije metode sređivanja dijelova: SF – jednonamjenskog dodavača i MG – ručno punjenog magazina, palete ili pladnja.

Troškovi povezani sa sređivanjem dijelova dijele se na:

- troškove rada, koje uključuju rukovanje materijalom (punjenje dodavača ili magazina dijelovima), posluživanje sustava (oslobađanje zapetljanih dijelova, rukovanje pladnjevima za dijelove itd.), te prilagodbe sustava (promjena stega, dodavača i spremnika, i reprogramiranje robota)
- troškove opreme, uključujući amortizaciju dodavača, specijalnih stega, specijalnih alata, magazina, paleta ili pladnjeva.

Tri su značajna faktora potrebna za određivanje cijene sređivanja dijela:

- jednonamjenski dodavači, cijena potpuno opremljenog i operativnog u robotskom sustavu iznosi 5 kUSD. Za dijelove koje je teško dodavati i orijentirati, cijena dodavača može biti i tri puta veća od osnovne
- ručno punjenje magazina, cijena skupa specijalnih magazina, paleta ili pladnjeva za jednu vrstu dijelova iznosi 1 kUSD
- punjenje magazina, koje se može procijeniti na 4 s.

Tablica 5. Metoda sređivanja dijelova

10	11	12	13	14	15	Ime sklopa/dijela/operacije	
način sređivanja dijela (SF ili MG)	cijena jednonamjenskog dodavača ili magazina, kUSD	cijena nosača, kUSD	vrijeme ručnog sklapanja ili punjenja magazina, pomnoženo s RP, s/dio	broj zasebnih dijelova	cijena operacije, cent		
PP	CP	CW	TT	NM	CS		
SF	5	-	-	←	jednonamjenski dodavač		
	CPT, kUSD	CWT, kUSD	TOT, s	NM	CST, cent	TB, s	BS - količina koja će se sklapati, u tisućama

Budući da nema potrebe za ručnim rukovanjem i sklapanjem, vrijeme potrebno za ručni rad koje se upisuje u stupac 13 se izostavlja.

5.1.4. Teoretski minimalan broj dijelova

Najefikasniji način za snižavanje cijene sklapanja je minimiziranje broja zasebnih dijelova. Vrijednosti za određivanje teoretski minimalnog broja dijelova za sklop (NM), upisuju se u stupac 14. Za svaki dio koji se dodaje sklopu, konstruktor mora odgovoriti na sljedeća pitanja:

- I. Pomiče li se dio u odnosu na sve ili neke od već sklopljenih dijelova tijekom funkcioniranja proizvoda? Ne
- II. Mora li dio biti od drugačijeg materijala ili izoliran od svih dijelova koji su već sklopljeni? Ne.
- III. Mora li dio biti odvojen od svih već sklopljenih dijelova, budući da bi inače sklapanje ili rasklapanje tih drugih dijelova bilo nemoguće? Ne.

Ako je odgovor na bilo koje od navedenih pitanja "Da" u stupac 14 prepisuje se podatak iz stupca 2. Zbrajanjem vrijednosti u stupcu 14 dobiva se teoretski minimalan broj dijelova.

Tablica 6. Obrazac analize robotske proizvodnje za stanicu s jednim robotom

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Ime operacije			
ident. broj operacije	broj slijedno ponovljenih operacija	oznaka robotskog umetanja	relativna cijena robota	relativna cijena hvataljke ili alata	relativno efektivno vrijeme operacije	relativno kazneno vrijeme za konačno orijentiranje robotom	relativno kazneno vrijeme za promjenu hvataljke ili alata	vrijeme operacije, TA = TB* [RP* (TP+TR)+TG], s	način središnjeg dijela (SF ili MG)	cijena jednonamjenskog dodavača ili magazina (*2 za RP > 1), kUSD	cijena stege, kUSD	vrijeme ručnog sklapanja ili punjenja magazina, pomnoženo s RP, s/dio	broj zasebnih dijelova	cijena operacije, cent	NOGOMETNA LOPTA			
ID	RP	RC	AR	AG	TP	TR	TG	TA	PP	CP	CW	TT	NM	CS				
1	20	65	1	1,5	1,2	0	2,1	78,3	SF	5	0	0	20		izrezivanje šesterokutnih panela			
2	12	65	1	1,5	1,2	0	2,1	49,5	SF	5	0	0	12		izrezivanje peterokutnih panela			
3	20	66	1	1,5	1,0	0	2,1	66,3	SF	5	0	0	20		printanje grafita na šesterokutne panele			
4	12	66	1	1,5	1,0	0	2,1	42,3	SF	5	0	0	12		printanje grafita na peterokutne panele			
5	32	88	1,5	4,5	3,2	0	2,1	313,5	SF	5	0	0	32		šivanje panela			
6	1	65	1	1,5	1,2	0	2,1	9,9	SF	5	0	0	1		izrezivanje otvora			
7	1	61	1	0	0,85	0	0	2,55	SF	5	0	0	1		umetanje mješura sa ventilom			
8	1	88	1,5	4,5	3,2	0	2,1	15,9	SF	5	0	0	1		šivanje završnih šavova			
9	1	67	1	1,5	1	0	2,1	9,3	SF	5	0	0	0		upuhivanje zraka kroz ventil			
10	1	63	1	1,5	0,8	0	2,1	8,7	SF	5	0	0	0		kontrola kvalitete (dimenzija, težina)			
11	1	45	1,5	1,5	1,07	0	2,1	6,17	SF	5	0	0	1		lijepljenje etikete			
STANICA S JEDNIM ROBOTOM			1,5	21				602,42				55	0	0	100	0	3	1000
			maksimalni AR	AGT				TAT, s				CPT, kUSD	CWT, kUSD	TOT, s	NM	CST, cent	TB, s	BS - količina koja će se sklupati, u tisućama

5.1.5. Određivanje ukupne cijene proizvodnje

Kada su svi stupci obrasca za stanicu s jednim robotom ispunjeni, i vrijednosti odgovarajućih stupaca zbrojene, mogu se izračunati troškovi montaže. Razmatra se ukupna cijena sklapanja proizvoda, a ne cijena pojedinačnih operacija koje se eventualno mogu upisati u stupac 15 obrasca. Za određivanje ukupne cijene sklapanja, uzima se u obzir da se sustav može opskrbiti i drugačijim alatima i rearanžirati tako da se može sklupati i drugi proizvod. Višenamjenska oprema koja se može ponovno iskoristiti će biti amortizirana na uobičajeni način. Koristi se razdoblje povrata PS u smjena-godinama i faktor efikasnosti postrojenja PE. Ako se pretpostavi da je faktor efikasnosti $PE = 0,85$, a da je 100 kUSD opreme potrebno amortizirati u šest godina onda vrijednost korištenja opreme RC iznosi:

$$RC = \frac{1,39}{PS \times PE} = \frac{1,39}{1 \times 0,85} = 0,27 \text{ cent/s} \quad (2)$$

Faktor 1,39 dobiven je dijeljenjem vrijednosti opreme od 100 kUSD sa 7,2 milijuna sekundi u jednoj smjena-godini i množenjem dobivenog rezultata sa 100 000 kako bi se dolari pretvorili u cente.

Cijena opreme opće namjene uključuje cijenu robota s upravljačkim elementima, višenamjenskom hvataljkom i sensorima, dobivenu na osnovi podataka iz stupca 4. Tome se pribraja cijena osnovne radne stanice CSW koja uključuje cijenu osnovnog radnog stola za postavljanje robota, sigurnosne barijere, i konvejer ili transportni uređaj za pomicanje i uklanjanje proizvoda. Cijena po sklopu, korištenjem višenamjenske opreme, CST(GP), dobiva se množenjem cijene opreme sa RC i prosječnim vremenom sklapanja sklopa, i dijeljenjem sa brojem proizvoda BS:

$$CST(GP) = \frac{(ROB1 \times ARM + CTS) \times RC \times TAT}{BS} \text{ cent} \quad (3)$$

gdje su:

ROB1 – cijena standardnog robota s upravljačkom jedinicom, sensorima i višenamjenskom hvataljkom, oko 60 kUSD

ARM – relativna cijena najmnogostranijeg ("najvišenamjenskijeg") robota potrebnog za sklapanje proizvoda, maksimalna vrijednost stupca 4

CTS – osnovna cijena jedne radne stanice koja sadrži stol, sigurnosne barijere, senzore, i konvejer za skidanje sklopova, oko 10 kUSD

RC – cijena opreme, cent/s

TAT – suma vrijednosti stupca 9.

BS – broj proizvoda koji će se sklapati jednim montažnim sustavom tijekom ekonomskog vijeka opreme, u tisućama.

Dakle, korištenjem višenamjenske opreme, cijena po sklopu iznosi:

$$CST(GP) = \frac{(6000000 \times 1,5 + 1000000) \times 0,27 \times 602,42}{1000000} = 1626,534 \text{ cent}$$

Jednonamjenska oprema i specijalni nosači navedeni u stupcima 5, 11 i 12 posebno su izrađeni za proizvod i ne mogu se ponovno koristiti. Ti se troškovi dijele s brojem proizvoda koji se sklapaju tijekom vijeka opreme. Cijena korištenja jednonamjenske opreme po sklopu iznosi:

$$CST(SP) = 100 \times \frac{CG \times AGT + CPT + CWT}{BS} \quad (4)$$

gdje su:

CG - cijena standardne hvataljke, 5 kUSD

AGT - relativna cijena alata robota i uređaja za pridržavanje, zbroj vrijednosti stupca 5

CPT - cijena uređaja za sređivanje dijelova, zbroj vrijednosti stupca 11

CWT - cijena nosača i uređaja za pomicanje do ručne stanice ako je potrebno, zbroj vrijednosti stupca 12

BS - broj proizvoda koji će se sklapati jednim montažnim sustavom tijekom ekonomskog vijeka opreme, u tisućama.

Stoga je:

$$CST(SP) = 100 \times \frac{5000 \times 21 + 50000 + 0}{1000000} = 16 \text{ cent}$$

Cijena radnika, koji su potrebni za ručno punjenje magazina i izvođenje operacija sklapanja, po sklopu iznosi:

$$CST(OP) = TOT \times \frac{OP}{PE} \text{ cent} \quad (5)$$

pri čemu je:

TOT - vrijeme ručnog rada, zbroj vrijednosti stupca 13

OP - cijena ručnog rada, uključujući režijske troškove (0,4 cent/s ili 30 kUSD/a)

PE - faktor efikasnosti postrojenja.

Budući da nije potrebno ručno punjenje magazina ili sklapanje: $CST(OP) = 0 \text{ cent}$.

Cijena tehničara potrebnog za nadgledanje jedne ili više pojedinačnih robotskih stanica, po sklopu, može se dati izrazom:

$$CST(OPS) = TAT \times \frac{OPS}{NOS \times PE} \text{ cent} \quad (6)$$

gdje su:

TAT - vrijeme ciklusa sklapanja, zbroj vrijednosti stupca 9

OPS - cijena rada, uključujući režijske troškove (0,5 cent/s ili 37,5 kUSD/a)

NOS - broj pojedinačnih robotskih stanica koje nadzire jedan tehničar

PE - faktor efikasnosti postrojenja.

Dakle:

$$CST(OPS) = 602,42 \times \frac{0,5}{1 \times 0,85} = 354,365 \text{ cent}$$

Ukupna je cijena sklapanja, CST:

$$CST = CST(GP) + CST(SP) + CST(OP) + CST(OPS) \text{ cent} \quad (7)$$

$$CST = 1626,534 + 16 + 0 + 354,365 = 1996,9 \text{ cent.}$$

Dakle, ukupna cijena proizvodnje jednostaničnim robotskim sustavom po proizvodu iznosi 1996,9 cent.

5.2. Stanica s dva robota

U odnosu na opisanu proceduru radne stanice s jednim robotom, jedine se razlike javljaju kada se nekoliko dijelova treba slijedno sklopiti. Analizom je pokazano da je bolje podijeliti rad između dva robota, bez obzira što bi u tom slučaju oba trebala promijeniti svoje hvataljke. Čak i ako nije potrebno mijenjati hvataljke, slična se situacija javlja s ponavljajućim operacijama, koje se pojavljuju i na primjeru nogometne lopte. Kada se pojave ponavljajuće operacije kao naprimjer izrezivanje panela, potrebno je osigurati dva dodavača ili magazina – po jedan za svakog robota. Cijene koje se unose u stupce 11 i 12 obrasca, pomnožene su s dva ako je broj operacija RP veći od 1. Sposobnosti sustava su veće nego kod jednostaničnih robotskih sustava, a to se i odražava u vrijednostima vremena i relativnih cijena dobivenih iz karte 2 – Tablica 7.

Tablica 7. Karta 2- stanica s dva robota

		dio se može hvatati i umetati standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				dio zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku					
		nije potrebno pridržavanje		dio zahtijeva privremeno pridržavanje ili stezanje		nije potrebno pridržavanje		dio zahtijeva privremeno pridržavanje ili stezanje			
		samoporavnavanje...									
		da		nije lako poravnati		da		nije lako poravnati			
		0	1	2	3	4	5	6	7		
dio je dodan, ali nije konačno osiguran	gibanje uzduž ili oko...										
	okomite osi	0	1 0,55 0 0	1 0,6 0 0	1,5 0,85 0 0	1,5 0,9 0 0	1 0,6 1,5 0,7	1 0,6 1,5 0,7	1,5 0,85 1,5 0,7	1,5 0,9 1,5 0,7	
	neokomite osi	1	1 0,55 0 0	1,5 0,6 0 0	1,5 0,85 0 0	1,5 0,9 0 0	1,5 0,6 1,5 0,7	1,5 0,6 1,5 0,7	1,5 0,85 1,5 0,7	1,5 0,9 1,5 0,7	
	više no jedne osi	2	1,5 1,05 0 0	1,5 1,1 0 0	1,5 1,3 0 0	1,5 1,4 0 0	1,5 1,05 1,5 0,7	1,5 1,1 1,5 0,7	1,5 1,3 1,5 0,7	1,5 1,4 1,5 0,7	
		sila ili uvijanje unutar sposobnosti robota									
		dio se može hvatati i umetati standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				dio zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku					
		uskočni spoj		uskočni spoj i uvijanje ili druga jednostavna manipulacija		uskočni spoj ili jednostavna manipulacija		vijčanje (vijaka ili matica)			
		samoporavnavanje...									
		da		nije lako poravnati		da		nije lako poravnati			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
dio je dodan, i odmah konačno osiguran	gibanje uzduž ili oko...										
	okomite osi	3	1 0,55 0 0	1 0,6 0 0	1 0,7 0 0	1 0,75 0 0	1 0,65 1,5 0,7	1 0,7 1,5 0,7	1 0,8 1,5 0,7	1,5 0,9 1,5 0,7	1,0 1,15 4,0 0,7
	neokomite osi	4	1,5 0,55 0 0	1,5 0,6 0 0	1,5 0,7 0 0	1,5 0,75 0 0	1,5 0,6 1,5 0,7	1,5 0,65 1,5 0,7	1,5 0,7 1,5 0,7	1,5 0,8 1,5 0,7	1,5 1,15 4,0 0,7
	više no jedne osi	5	1,5 1,05 0 0	1,5 1,1 0 0	1,5 1,15 0 0	1,5 1,2 0 0	1,5 1,05 1,5 0,7	1,5 1,1 1,5 0,7		1,5 1,6 4,0 0,7	
		operacija se može izvesti standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				operacija zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku ili alat					
		uskočni spoj		uskočni spoj i uvijanje, ili jednostavna manipulacija		preorijentiranje ili skidanje sklopa		uskočni spoj		pritezanje vijaka ili matica	
		lemljenje		primjena tekućina ili adheziva		preorijentiranje ili skidanje sklopa					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	
posebna operacija osiguranja ili manipulacije, ili preorijentiranje ili dodavanje nečvrste tvari	gibanje uzduž ili oko...										
	okomite osi	6	1 0,45 0 0	1 0,5 0 0	1 0,6 0 0	1 0,45 1,5 0,7	1 0,5 1,5 0,7	1 0,55 1,5 0,7	1 0,7 1,5 0,7	1 0,6 1,5 0,7	1 1,15 4,5 0,7
	neokomite osi	7	1,5 0,45 0 0	1,5 0,5 0 0	1,5 0,6 0 0	1,5 0,45 1,5 0,7	1,5 0,5 1,5 0,7	1,5 0,55 1,5 0,7	1,5 0,7 1,5 0,7	1,5 0,6 1,5 0,7	1,5 1,15 4,5 0,7
	više no jedne osi	8	1,5 0,8 0 0	1,5 0,9 0 0	1,5 1,05 0 0	1,5 0,8 1,5 0,7	1,5 0,85 1,5 0,7	1,5 1,0 1,5 0,7	1,5 1,15 1,5 0,7	1,5 1,05 1,5 0,7	1,5 1,8 4,5 0,7

Tablica 8. Obrazac analize robotske proizvodnje za stanicu s dva robota

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Ime operacije			
ident. broj operacije	broj slijedno ponovljenih operacija	oznaka robotskog umetanja	relativna cijena robota	relativna cijena hvataljke ili alata	relativno efektivno vrijeme operacije	relativno kazneno vrijeme za konačno orijentiranje robotom	relativno kazneno vrijeme za promjenu hvataljke ili alata	vrijeme operacije, TA = TB* [RP+ (TP+TR)+TG], s	način sređivanja dijela (SF ili MG)	cijena jednonamjenskog dodavača ili magazina (*2 za RP > 1), kUSD	cijena stege, kUSD	vrijeme ručnog sklapanja ili punjenja magazina, pomnoženo s RP, s/dio	broj zasebnih dijelova	cijena operacije, cent	NOGOMETNA LOPTA			
ID	RP	RC	AR	AG	TP	TR	TG	TA	PP	CP	CW	TT	NM	CS				
1	20	65	1	1,5	0,55	0	0,7	35,1	SF	10	0	0	20		izrezivanje šesterokutnih panela			
2	12	65	1	1,5	0,55	0	0,7	21,9	SF	10	0	0	12		Izrezivanje peterokutnih panela			
3	20	66	1	1,5	0,7	0	0,7	44,1	SF	10	0	0	20		printanje grafitna na šesterokutne panele			
4	12	66	1	1,5	0,7	0	0,7	27,3	SF	10	0	0	12		printanje grafitna na peterokutne panele			
5	32	88	1,5	4,5	1,8	0	0,7	174,9	SF	10	0	0	32		šivanje panela			
6	1	65	1	1,5	0,55	0	0,7	3,75	SF	5	0	0	1		izrezivanje otvora			
7	1	61	1	0	0,45	0	0	1,35	SF	5	0	0	1		umetanje mjhura sa ventilom			
8	1	88	1,5	4,5	1,8	0	0,7	7,5	SF	5	0	0	1		šivanje završnih šavova			
9	1	67	1	1,5	0,6	0	0,7	3,9	SF	5	0	0	0		upuhivanje zraka kroz ventil			
10	1	63	1	1,5	0,45	0	0,7	3,45	SF	5	0	0	0		kontrola kvalitete (dimenzija, težina)			
11	1	45	1,5	1,5	0,65	0	0,7	4,05	SF	5	0	0	1		lijepljenje etikete			
STANICA S DVA ROBOTA			1,5	21				327,3				80	0	0	100	0	3	1000
			maksimalni AR	AGT				TAT, s				CPT, kUSD	CWT, kUSD	TOT, s	NM	CST, cent	TB, s	BS - količina koja će se sklapati, u tisućama

$$RC = \frac{1,39}{PS \times PE} = \frac{1,39}{1 \times 0,85} = 0,27 \text{ cent/s}$$

$$CST(GP) = \frac{(ROB2 \times ARM + CTS) \times RC \times TAT}{BS} \text{ cent}$$

$$CST(GP) = \frac{(1000000 \times 1,5 + 1000000) \times 0,27 \times 327,3}{1000000} = 1413,936 \text{ cent}$$

$$CST(SP) = 100 \times \frac{CG \times AGT + CPT + CWT}{BS} \text{ cent}$$

$$CST(SP) = 100 \times \frac{5000 \times 21 + 80000 + 0}{1000000} = 18,5 \text{ cent}$$

$$CST(OP) = TOT \times \frac{OP}{PE} \text{ cent}$$

$$CST(OP) = 0 \times \frac{0,4}{0,85} = 0 \text{ cent}$$

$$CST(OPS) = TAT \times \frac{OPS}{NOS \times PE} \text{ cent}$$

$$CST(OPS) = 327,3 \times \frac{0,5}{1 \times 0,85} = 192,53 \text{ cent}$$

$$CST = CST(GP) + CST(SP) + CST(OP) + CST(OPS) \text{ cent}$$

$$CST = 1413,936 + 18,5 + 0 + 192,53 = 1624,966 \text{ cent}$$

Dakle, ukupna cijena proizvodnje sustavom s dva robota, po proizvodu iznosi 1624,966 cent.

5.3. Višestanični robotski sustav

Osnovna je razlika u analizi za višestanične sustave u dodjeli zadataka radnim stanicama. Potrebno je poznavati željenu količinu proizvoda, u ovom slučaju zahtijevana količina iznosi četiri proizvoda u minuti što znači da vrijeme ciklusa iznosi 15 sekundi. Vrijeme ciklusa i broj dijelova koji treba sklopiti određuju potreban broj stanica. Brojevi radnih stanica upisuju se u stupac 8 tablice 10, započinjući sa stanicom 1 i nastavljajući sve dok se ne ispuni raspoloživo vrijeme ciklusa montaže, ili sve do operacije koja zahtijeva specijalnu radnu glavu ili ručno sklapanje. Potom se sljedeća operacija dodjeljuje stanici 2 i tako redom. Nisu dopuštene promjene hvataljki i pretpostavlja se da robot može biti opskrbljen s najviše tri prihvatnice ili alata za umetanje. U sustavima od jedne stanice, operacija koja zahtijeva najskuplji robot određivat će rijenu robota, dok kod višestaničnih sustava roboti ne moraju biti isti. Stoga se cijena robota određuje od stanice do stanice. Izbor metode sređivanja dijelova provodi se kao kod stanica s jednim i dva robota. Uporaba automatskih dodavača je kod višestaničnih sustava često ekonomičnija zbog kraćih vremena ciklusa.

Tablica 9. Karta 3- višestanični robotski sustav

		dio se može hvatati i umetati standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				dio zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku						
		nije potrebno pridržavanje		dio zahtijeva privremeno pridržavanje ili stezanje		nije potrebno pridržavanje		dio zahtijeva privremeno pridržavanje ili stezanje				
		samoporavnavanje...										
		da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	
		0	1	2	3	4	5	6	7			
dio je dodan, ali nije konačno osiguran	gibanje uzduž ili oko...											
	okomite osi	0	1 1 0	1 1,1 0	1 1,05 1,1	1 1,15 1,1	1 1 0,5	1 1,1 0,5	1 1,05 1,5	1 1,15 1,5		
	neokomite osi	1	1,5 1 0	1,5 1,1 0	1,5 1,05 1,0	1,5 1,15 1,0	1,5 1,0 0,5	1,5 1,1 0,5	1,5 1,05 1,5	1,5 1,15 1,5		
	više no jedne osi	2	1,5 1,8 0	1,5 1,9 0	1,5 1,85 1,0	1,5 1,95 1,0	1,5 1,8 0,5	1,5 1,9 0,5	1,5 1,85 1,5	1,5 1,95 1,5		
		sila ili uvijanje unutar sposobnosti robota										
		dio se može hvatati i umetati standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				dio zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku						
		uskočni spoj		uskočni spoj i uvijanje, ili druga jednostavna manipulacija		uskočni spoj ili jednostavna manipulacija		vijčanje (vijaka ili matica)		posebna operacija radne glave – robot pozicionira dio		
		samoporavnavanje...										
		da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati	da	nije lako poravnati			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8		
dio je dodan, i odmah konačno osiguran	gibanje uzduž ili oko...											
	okomite osi	3	1 1 0	1 1,1 0	1 1,1 0	1 1,2 0	1 1 0,5	1 1,1 0,5	1 1,25 0,5	1 1,3 0,5	0 1 4,0	
	neokomite osi	4	1,5 1 0	1,5 1,1 0	1,5 1,1 0	1,5 1,2 0	1,5 1 0,5	1,5 1,1 0,5	1,5 1,25 0,5	1,5 1,3 0,5	0 1 5	
	uzduž ili oko više no jedne osi	5	1,5 1,8 0	1,5 1,9 0	1,5 2 0	1,5 2 0	1,5 1,8 0,5	1,5 1,9 0,5			0 1,5 6	
		operacija se može izvesti standardnom hvataljkom ili onom korištenom za prethodni dio				operacija zahtijeva promjenu hvataljke u specijalnu hvataljku ili alat				posebna operacija radne glave – robot pozicionira dio		
		uskočni spoj	uskočni spoj i uvijanje, ili jednostavna manipulacija	preorijentiranje ili skidanje sklopa	uskočni spoj	pritezanje vijaka ili matica	lemljenje	primjena tekućina ili adheziva	preorijentiranje ili skidanje sklopa			
		0	1	2	3	4	5	6	7	8		
posebna operacija osiguranja ili manipulacije, ili preorijentiranje, ili dodavanje nečvrste tvari	gibanje uzduž ili oko...											
	okomite osi	6	1 0,75 0	1 0,85 0	1 1 0	1 0,75 0,5	1 0,8 0,5	1 0,9 0,5	1 1,2 0,5	1 1 0,5	0 1 3,5	
	neokomite osi	7	1,5 0,75 0	1,5 0,85 0	1,5 1 0	1,5 0,75 0,5	1,5 0,8 0,5	1,5 0,9 0,5	1,5 1,2 0,5	1,5 1 0,5	0 1 4	
	više no jedne osi	8	1,5 1,4 0	1,5 1,6 0	1,5 1,8 0	1,5 1,4 0,5	1,5 1,5 0,5	1,5 1,7 0,5	1,5 2 0,5	1,5 1,8 0,5	0 1,5 4,5	

Tablica 10. Obrazac analize robotske proizvodnje za višestanični robotski sustav

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Ime sklopa/dijela/operacije	
ident. broj dijela	oznaka robotskog umetanja	relativna cijena robota	relativna cijena hvataljke ili alata	relativno efektivno vrijeme operacije	relativno kazneno vrijeme za konačno orijentiranje robotom	vrijeme operacije, TA= TB* (TP+TR), s	broj radne stanice	način sređivanja dijela (SF ili MG)	cijena jednonamjenskog dodavača ili magazina, kUSD	vrijeme ručnog sklapanja ili punjenja magazina, s/dio	broj zasebnih dijelova	cijena operacije, cent	NOGOMETNA LOPTA	
ID	RC	AR	AG	TP	TR	TA	WN	PP	CP	TT	NM	CS		
1	65	1	0,5	0,9	0	2,7	1	SF	5	0	20			izrezivanje šesterokutnih panela
2	65	1	0,5	0,9	0	2,7	1	SF	5	0	12			izrezivanje peterokutnih panela
3	66	1	0,5	1,2	0	3,6	2	SF	5	0	20			printanje grafita na šesterokutne panele
4	66	1	0,5	1,2	0	3,6	2	SF	5	0	12			printanje grafita na peterokutne panele
5	88	0	4,5	1,5	0	4,5	3	SF	5	0	32			šivanje panela
6	65	1	0,5	0,9	0	2,7	4	SF	5	0	1			izrezivanje otvora
7	61	1	0	0,85	0	2,55	4	SF	5	0	1			umetanje mjeħura sa ventilom
8	88	0	4,5	1,5	0	4,5	5	SF	5	0	1			šivanje završnih šavova
9	67	1	0,5	1	0	3	6	SF	5	0	0			upuhivanje zraka kroz ventil
10	63	1	0,5	0,75	0	2,25	6	SF	5	0	0			kontrola kvalitete (dimenzije, težina)
11	45	1,5	0,5	1,1	0	3,3	7	SF	5	0	1		lijepljenje etikete	
VIŠESTANIČNI ROBOTSKI SUSTAV			13			35,4	7		55	0	100	3	1000	
			AGT			TAT, s	NS		CPT, kUSD	TOT, s	NM	CST, cent	TB, s	BS - količina koja će se sklopiti, u tisućama

$$RC = \frac{5,55}{PS \times PE} = \frac{5,55}{6 \times 0,85} = 1,09 \text{ cent/s}$$

Faktor 5,55 dobiven je dijeljenjem vrijednosti opreme od 400 kUSD sa 7,2 milijuna sekundi u jednoj smjena-godini i množenjem dobivenog rezultata sa 100 000 kako bi se dolari pretvorili u cente.

Za višestanični robotski sustav, cijena po sklopu korištenjem višenamjenske opreme iznosi:

$$CST(GP) = \frac{[(ROB1 \times ARM) + NS \times CTM] \times RC \times TAT}{BS} \quad (8)$$

gdje su:

NS – broj stanica u višestaničnom sustavu

CTM – cijena jedne stanice u sustavu slobodnoga toka uključujući (međustanične) spremnike i upravljačke elemente, 25 kUSD*.

$$CST(GP) = \frac{[(6000000 \times 1,5) + 6 \times 2500000] \times 1,09 \times 35,4}{1000000} = 926,064 \text{ cent}$$

Cijena po sklopu, korištenjem jednonamjenske opreme:

$$CST(SP) = 100 \times \frac{CG \times AGT + CPT + NS \times CWC}{BS} \text{ cent} \quad (9)$$

gdje je:

CWC – cijena posebnih nosača radnih komada pridružena jednoj stanici u višestaničnom sustavu, 5kUSD*.

$$CST(SP) = 100 \times \frac{5000 \times 13 + 80000 + 6 \times 5000}{1000000} = 17,5 \text{ cent}$$

Cijena radnika, koji su potrebni za ručno punjenje magazina i izvođenje operacije sklapanja, ista je kao kod stanica s jednim i s dva robota i iznosi:

$$CST(OP) = TOT \times \frac{OP}{PE} \text{ cent}$$

$$CST(OP) = 0 \times \frac{0,4}{0,85} = 0 \text{ cent}$$

Cijena tehničara potrebnog za nadgledanje iznosi:

$$CST(OPS) = TAT \times \frac{NS \times OPS}{NOM \times PE} \text{ cent} \quad (10)$$

gdje je:

NOM – broj stanica u višestaničnom robotskom sustavu koje može nadgledati jedan tehničar.

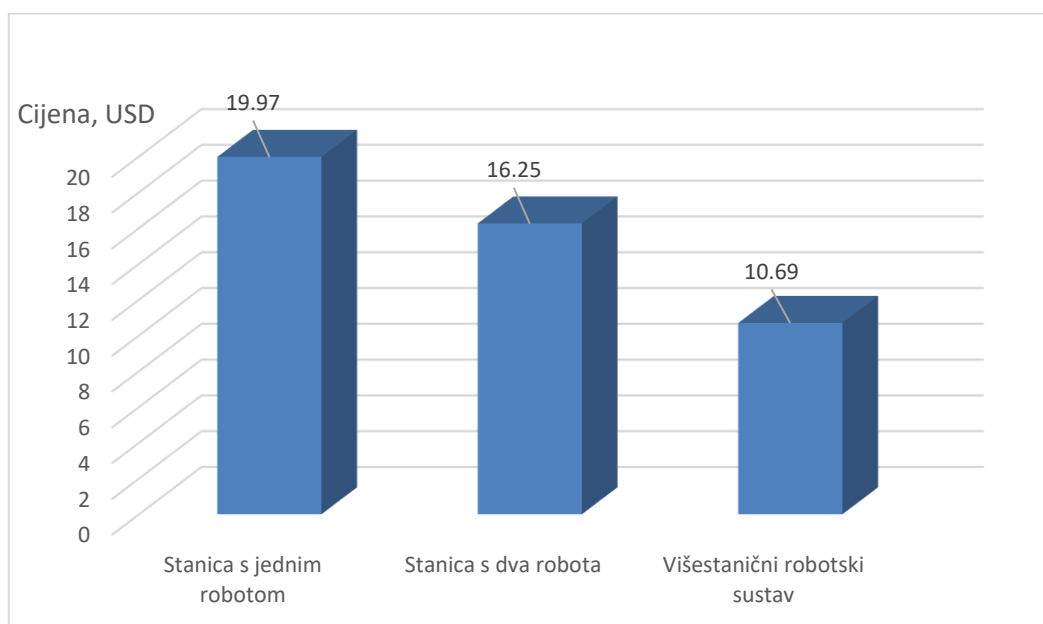
$$CST(OPS) = 35,4 \times \frac{6 \times 0,5}{1 \times 0,85} = 124,94 \text{ cent}$$

Ukupna je cijena sklapanja:

$$CST = CST(GP) + CST(SP) + CST(OP) + CST(OPS) \text{ cent}$$

$$CST = 926,064 + 17,5 + 0 + 124,94 = 1068,504 \text{ cent.}$$

Dakle, ukupna cijena proizvodnje višestaničnim robotskim sustavom po proizvodu iznosi 1068,504 cent.



Slika 10. Cijena po proizvodu, USD

6. ZAKLJUČAK

Montaža ili sklapanje neizostavan je dio svakog proizvodnog procesa u kojem se završni sklop sastoji od barem dva dijela. Njezina važnost ističe se u činjenicama da je više od 40% radnika zaposleno na poslovima sklapanja i da na finalnu cijenu proizvoda montaža često utječe s više od 50%. Zbog kompleksnosti montaže, razvijale su se različite inženjerske metode analize i preoblikovanja proizvoda. Metoda DFA razvijena je 1980. godine i od tada se uspješno primjenjuje u nekima od vodećih svjetskih tvrtki. Svrha joj je minimalizacija troškova, smanjenje vremena sklapanja i povećanje kvalitete proizvoda. Metoda DFA provodi se za analizu proizvoda za ručno sklapanje, za visokobrzinsko (automatsko) sklapanje i za robotsko sklapanje proizvoda. U radu je napravljena analiza za cijeli proces izrade i sklapanja nogometne lopte metodom DFA za robotsku montažu, i to za stanicu s jednim robotom, s dva robota i s višestaničnim robotskim sustavom.

Kroz povijest, paralelno s razvojem nogometa kao sporta, razvijala se i nogometna lopta kao glavno sredstvo za igranje. Dolazilo je do promjena u dizajnu, u načinu proizvodnje i u vrsti materijala koji se koristi za izradu. Lopte se mogu izrađivati i sklapati u obrtničkoj proizvodnji, u poluautomatiziranim sustavima i automatiziranim sustavima koji predstavljaju kombinaciju robota i strojeva. Napravljena je analiza za cijeli proces izrade i sklapanja isključivo pomoću robota. Na godišnjoj razini proizvode se milijuni nogometnih lopti. Za prepostavljenu količinu od 1 000 000 proizvoda u godini, u vremenu od 6 smjena-godina, analizom je dobivena ukupna cijena sklapanja po proizvodu: za stanicu s jednim robotom iznosi 20 USD, za stanicu s dva robota 16,25 USD a za višestanični robotski sustav 10,69 USD.

Na temelju dobivenih rezultata, višestanični robotski sustav pokazao se kao najbolje rješenje u primjeni robotske izrade i sklapanja nogometne lopte budući da su troškovi po proizvodu najmanji. Ipak, višestanični robotski sustav zahtjeva veća početna ulaganja. U daljnjem radu predlaže se ponovna analiza za situaciju u kojoj robot ne bi obavljao sve operacije

(poput izrezivanja panela i printanja grafita). Također, predlaže se i analiza metodom DFA za visokobrzinsko (automatsko) sklapanje kao i razvoj računalne podrške koja bi smanjila mogućnost pogrešaka pri očitavanju podataka iz tablica te usporedba dobivenih rezultata.

7. LITERATURA

- [1] Jerbić B., Nikolić G., Vranješ B., Kunica Z., Projektiranje automatskih montažnih sustava, Zagreb: Kigen; 2009.
- [2] <https://usercontent.one/wp/www.tdc-enabel.be/wp-content/uploads/2020/11/EU-market-for-fair-and-sustainable-sports-balls.pdf>, Pristupljeno: 2023-08-08
- [3] <https://www.leansixsigmadefinition.com/glossary/assembly-line/>, Pristupljeno: 2023-08-10
- [4] Shimon Y. Nof, Wilbert E. Wilhelm, Hans-Jurgen Warnecke, Industrial Assembly, London: Chapman & Hall; 1997.
- [5] <https://www.assemblymag.com/articles/91581-the-moving-assembly-line-turns-100>, Pristupljeno: 2023-08-10
- [6] Kunica Z., Montaža I. Dio, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2016.
- [7] Eskilander S., Design For Automatic Assembly- A Method For Product Design: DFA 2, Doctoral Thesis, Stockholm; 2001.
- [8] Boothroyd G., Assembly Automation and Product Design, Second Edition, Boca Raton: Taylor & Francis Group; 2005.
- [9] Kunica Z.: Oblikovanje proizvoda za sklapanje, Interni prijevod knjige G. Boothroyda i P. Dewhursta "Product Design for Assembly", Boothroyd Dewhurst, Inc., Wakefield, 1991, Zagreb, 2000.
- [10] <http://www.madehow.com/Volume-5/Soccer-Ball.html>, Pristupljeno: 2023-08-13
- [11] <https://www.fifa.com/technical/media-releases/semi-automated-offside-technology-to-be-used-at-fifa-world-cup-2022-tm>, Pristupljeno: 2023-08-13

- [12] <https://soccerwhizz.com/soccer-ball-sewing-process/>, Pristupljeno: 2023-08-15
- [13] <https://soccerwhizz.com/what-soccer-balls-are-made-from/>, Pristupljeno: 2023-08-15
- [14] <https://worldcrunch.com/culture-society/in-pakistan-the-world-capital-of-soccer-ball-production>, 2023-08-19