

Utjecaj skalabilnosti na optimalno formiranje višepredmetnih rekonfigurabilnih proizvodnih sustava

Uran, Valter

Doctoral thesis / Disertacija

2021

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:190:621999>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Valter Uran

UTJECAJ SKALABILNOSTI NA OPTIMALNO
FORMIRANJE VIŠEPREDMETNIH
REKONFIGURABILNIH PROIZVODNIH
SUSTAVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Rijeka, 2021.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Valter Uran

UTJECAJ SKALABILNOSTI NA OPTIMALNO
FORMIRANJE VIŠEPREDMETNIH
REKONFIGURABILNIH PROIZVODNIH
SUSTAVA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: red. prof. dr. sc. Tonči Mikac
Komentor: doc. dr. sc. Sandro Doboviček

Rijeka, 2021.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

Valter Uran

SCALABILITY IMPACT ON OPTIMAL DESIGN
OF MULTI-PRODUCT RECONFIGURABLE
PRODUCTION SYSTEMS

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2021.

Mentor rada: prof. dr. sc. Tonči Mikac, dipl. ing.

Komentor rada: doc. dr. sc. Sandro Doboviček, dipl. ing.

Doktorski rad obranjen je dana _____ u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. prof. dr. sc. Milan Ikonić – predsjednik
2. prof. dr. sc. Duško Pavletić – član
3. prof. emeritus dr. sc. Ivica Veža – član (FESB, Split)

ZAHVALA

Ovim se putem zahvaljujem mentoru, Prof. dr. sc. Tonči Mikcu i komentoru Doc. dr. sc. Sandru Dobovičeku na pomoći i susretljivosti koju su mi pružili tijekom poslijediplomskog studija i izrade samog doktorskog rada.

Zahvaljujem se asistentu Tomislavu Bazini, mag. ing. mech. na pomoći pri izradi genetskog algoritma i raspravama vezanim uz rekonfigurabilne proizvodne sustave kao i tvrtkama CIMOS, TEH-CUT i SINERGIS na pruženim teoretskim i praktičnim znanjima iz područja proizvodnih sustava u proizvodnom okruženju.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji na potpori i strpljenju tijekom svih ovih godina kako bi ovaj rad uspješno priveli kraju.

Sveučilište u Rijeci
TEHNIČKI FAKULTET
Fakultetsko vijeće

KLASA: 030-09/17-01/2
URBROJ: 2170-57-01-17-32
Rijeka, 24. veljače 2017.

Fakultetsko vijeće Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, na svojoj 5. sjednici u ak. god. 2016./17., održanoj 24. veljače 2017., donijelo je sljedeću

ODLUKU

Sukladno izvješću Stručnog povjerenstva za ocjenu teme doktorske disertacije u sastavu: prof. dr. sc. Tonči Mikac (predsjednik), prof. dr. sc. Milan Ikonić (član) i prof. dr. sc. Duško Pavletić (član) utvrđuje se da pristupnik **Valter Uran, dipl. ing.**, ispunjava Zakonom propisane uvjete za izradu doktorske disertacije pod naslovom

***Utjecaj skalabilnosti na optimalno formiranje višepredmetnih
rekonfigurabilnih proizvodnih sustava.***

Mentorom se imenuje prof. dr. sc. Tonči Mikac.


Dekanica
Prof. dr. sc. Jasna Prpić-Oršić

Dostaviti:

- 1.) Valter Uran, dipl. ing.
- 2.) Mentor prof. dr. sc. Tonči Mikac
- 3.) Služba studentske evidencije
- 4.) Pismohrana FV

Sveučilište u Rijeci
TEHNIČKI FAKULTET
Fakultetsko vijeće

KLASA: 030-09/19-01/7
URBROJ: 2170-57-01-19-10
Rijeka, 28. lipnja 2019.

Fakultetsko vijeće Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, na svojoj 10. sjednici u ak. god. 2018./19., održanoj 28. lipnja 2019., donijelo je sljedeću

ODLUKU

Temeljem suglasnosti dosadašnjeg mentora imenuje se **prof. dr. sc. Tončija Mikca mentorom** i **doc. dr. sc. Sandra Dobovičeka komentorom** doktorske disertacije **Valteru Uranu**, umjesto dosadašnjeg mentora prof. dr. sc. Tončija Mikca.

Dekanica

Prof. dr. sc. Jasna Prorčević-Oršić



Dostaviti:

- 1.) Valter Uran
- 2.) Mentor prof. dr. sc. Tonči Mikc
- 3.) Komentor doc. dr. sc. Sandro Doboviček
- 4.) Služba studentske evidencije
- 5.) Pismohrana FV

SAŽETAK

Današnja proizvodnja susreće se s izazovima izrazito promjenjivih zahtjeva tržišta koje karakterizira velika fluktuacija u raznolikosti i količini proizvoda. Nije dovoljno proizvoditi visoko kvalitetne proizvode po prihvatljivoj cijeni već je potrebno biti prilagodljiv prema hirovitim promjenama koje diktira tržište i to na ekonomičan način. Jedan od odgovora na takve zahtjeve je postavljanje odzivnih i troškovno učinkovitih proizvodnih sustava na način da se osigura potrebna razina fleksibilnosti i autonomnosti kroz simultano upravljanje životnim ciklusom proizvoda te proizvodnim procesima. Rekonfigurabilni proizvodni sustav kao nova paradigma predstavlja model sustava koji omogućuje upravo takvu učinkovitost zbog mogućnosti podešavanja proizvodnih kapaciteta i funkcionalnosti. Važna značajka takvog modela je skalabilnost. Ona osigurava, za razliku od ostalih proizvodnih modela, preciznu prilagodbu proizvodnih kapaciteta čime se rješava problem vezan uz njihovo povećanje ili smanjenje na dinamičan način.

Svrha ovog doktorskog rada je proširivanje spoznaja na području istraživanja upravo takvih proizvodnih sustava s naglaskom na skalabilnost i dinamičke implikacije koje uvjetuju brze promjene kapaciteta u proizvodnji. Analizirat će se i identificirati prednosti i nedostaci dosadašnjih spoznaja na području istraživanja proizvodnih sustava te mogućnosti prilagodbe takvih sustava novim tržišnim trendovima. Pokušat će se objediniti nove značajke koje pružaju rekonfigurabilni proizvodni sustavi, prvenstveno skalabilnost, u cilju izrade cjelovitog rješenja za projektiranje proizvodnih sustava. Osnovni cilj istraživanja je formiranje dinamičkog modela primenom genetskog algoritma za projektiranje i izračun proizvodnih kapaciteta optimalnog višepredmetnog rekonfigurabilnog proizvodnog sustava za obradu grupe proizvoda.

ABSTRACT

Today's production meets the challenges of an extremely changeable market demands which are characterized by large fluctuations in the variety and quantity of products. It is not enough to produce high quality products at an affordable price but it is necessary to be adaptable to the sudden changes dictated by the market in an economical way. One of the answers to such demands is to set up responsive and cost-effective production systems in a way to ensure a certain level of flexibility and autonomy through simultaneous management of the product life cycle and production processes. Reconfigurable manufacturing systems, as a new paradigm represents a system model that enables just such efficiency due to the possibility of adjusting production capacity and functionality. An important feature of such model is scalability. It provides, unlike other models, a precise adjustment of production capacity, which solves the problem of increasing or decreasing them in a dynamic way.

The purpose of this doctoral thesis is to expand the knowledge in the field of research of such production systems with an emphasis on scalability and dynamic implications that cause rapid changes in production capacity. The advantages and disadvantages of current knowledge in the field of production systems research and the possibilities of adapting such systems to new market trends will be analyzed and identified. Attempts will be made to integrate new features provided by reconfigurable production systems, primarily scalability, in order to create a complete solution for the design of production systems. The main goal of the research is to create a dynamic model by applying a genetic algorithm for designing and calculating the production capacity of an optimal multi-product reconfigurable production system for processing the product family.

KLJUČNE RIJEČI

Projektiranje proizvodnog sustava

Rekonfigurabilni proizvodni sustavi

Skalabilnost

Generiranje konfiguracije

Genetski algoritam

KEYWORDS

Manufacturing system design

Reconfigurable manufacturing systems

Scalability

Configuration generation

Genetic algorithm

SADRŽAJ

SAŽETAK	i
ABSTRACT	ii
KLJUČNE RIJEČI	iii
NOMENKLATURA	viii
Indeksi skupova	viii
Latinični simboli	viii
Grčki simboli	x
Eksponenti i indeksi.....	xi
Kratice.....	xi
1 UVOD	1
1.1 Postavljanje problema	4
1.2 Metodologija istraživanja	6
1.3 Sadržaj rada	7
1.4 Očekivani znanstveni doprinos istraživanja	7
1.5 Hipoteza istraživanja.....	8
1.6 Primjena rezultata istraživanja.....	9
2 REKONFIGURABILNI PROIZVODNI SUSTAVI	10
2.1 Izazovi novih proizvodnih sustava	11
2.2 Proizvodni sustavi i njihova evolucija.....	13
2.2.1 Namjenski proizvodni sustavi (NPS)	15
2.2.2 Fleksibilni proizvodni sustavi (FPS)	15
2.2.3 Usporedba NPS i FPS	16
2.2.4 Rekonfigurabilni proizvodni sustavi (RPS).....	17
2.3 Tehnološke karakteristike koje uvjetuju rekonfigurabilnost.....	20
2.4 Fleksibilnost i rekonfigurabilnost sustava	21
2.4.1 Rekonfiguracija sa raspoloživom proizvodnom opremom	21
2.4.2 Utjecaj promjenjivosti na fleksibilnost i rekonfigurabilnost PS-a	22

2.4.3	Fizička ("tvrda") i logička ("mekana") rekonfigurabilnost	23
2.5	Ključne karakteristike RPS-a	23
2.5.1	Prilagodljivost	24
2.5.2	Konvertibilnost	24
2.5.3	Skalabilnost	25
2.5.4	Modularnost	27
2.5.5	Integrabilnost	28
2.5.6	Dijagnostibilnost	29
2.5.7	Utjecaj karakteristika RPS-a na ciljeve rekonfigurabilnosti.....	29
2.6	Rekonfigurabilni stroj.....	30
2.6.1	Principi konstrukcije RS.....	32
2.7	Odabir konfiguracije PS.....	32
2.7.1	Formiranje proizvodnih kapaciteta.....	33
2.7.2	Planiranje funkcionalnosti	33
2.7.3	Održavanje kvalitete	34
2.7.4	Formiranje grupe proizvoda	35
2.7.5	Uravnoteženje RPS	35
2.7.6	Učinkovito održavanje RPS.....	36
3	VIŠEPREDMETNI PROIZVODNI SUSTAVI	37
3.1	Definicija i značajke PS.....	37
3.2	Osnovni modeli višepredmetnih PS.....	40
3.2.1	Definicija modela.....	40
3.2.2	Osnovni modeli višepredmetnih PS	43
3.2.2.1	Pojedinačni proizvodni kapacitet (PPK).....	44
3.2.2.2	Raspored strojeva prema vrsti opreme (RPV).....	45
3.2.2.3	Raspored strojeva sličnog redoslijeda (SSR)	46
3.2.2.4	Višepredmetni linijski sustav (VLS)	46
3.2.2.5	Fleksibilni proizvodni sustav (FPS).....	47
3.2.2.6	Rekonfigurabilni proizvodni sustav (RPS)	49
3.3	Odnosi između fleksibilnosti i rekonfigurabilnosti	50
3.4	Značajke rekonfigurabilnih višepredmetnih PS.....	52
3.5	Projektiranje višepredmetnih RPS	54
3.5.1	Broj i oblici konfiguracija.....	56
4	UTJECAJ SKALABILNOST U FORMIRANJU VIŠEPREDMETNOG RPS	57
4.1	Karakteristike skalabilnosti u PS	58
4.1.1	Razine skalabilnosti	58
4.1.2	Ograničenja skalabilnosti	59
4.2	Modeli ekspanzije kapaciteta.....	60
4.2.1	Skalabilnost FPS-a.....	61

4.2.2	Skalabilnost RPS-a.....	62
4.3	Industrijska primjena skalabilnih PS.....	63
4.4	Konstrukcija skalabilnih PS.....	69
4.4.1	Utjecaj konfiguracije na skalabilnost.....	70
5	PROJEKTIRANJE KONCEPTA SKALABILNOG VIŠEPREDMETNOG RPS	72
5.1	Pristup modeliranju skalabilnog višepredmetnog RPS	73
5.1.1	Razvoj modela	73
5.1.2	Izračun troška rekonfiguracije skalabilnog sustava.....	76
5.2	Formulacija algoritma za višestruki vremenski period.....	78
5.2.1	Struktura višepredmetne konfiguracije RPS	80
5.2.2	Struktura obrade i elementi proizvodnog procesa	82
5.2.3	Zahtjevi potražnje.....	85
5.2.4	Odabir strojnog parka i podaci o strojevima	86
5.2.5	Izvedivost i vrijeme proizvodnje	86
5.2.6	Ograničenja prostora i investicijskih troškova.....	87
5.2.6.1	Ograničenje prostora.....	87
5.2.6.2	Ograničenje investicijskih troškova (ulaganja).....	88
5.2.7	Opis izlaznih varijabli.....	88
5.3	Matematički model.....	89
5.3.1	Pretpostavke	89
5.3.2	Traženje optimalne konfiguracije	89
5.3.3	Procedura zadovoljenja ograničenja.....	94
5.3.3.1	Stvaranje izvedivih permutacija SKZ niza za sve izratke	94
5.3.3.2	Stvaranje izvedivih strojnih alternativa za sve kombinacije SKZ-a	95
5.3.3.3	Stvaranje izvedivih faza obrade za sve permutacije SKZ-a	95
5.4	Primjena GA	96
5.4.1	Struktura GA.....	96
5.4.2	Pristup optimizaciji na bazi GA	97
5.4.3	Kodiranje i dekodiranje.....	99
5.4.4	Oblikovanje kromosoma	99
5.4.5	Dijagram toka	101
5.4.6	Selekcija i genetski operatori	102
5.4.6.1	Selekcija.....	102
5.4.6.2	Križanje.....	102
5.4.6.3	Mutacija	104
6	PRAKTIČNI PRIKAZ METODE NA SKALABILNOM VIŠEPREDMETNOM RPS.....	107
6.1	Predstavljanje proizvodnog programa	107
6.2	Utjecajni elementi i rubni uvjeti	109
6.3	Koncept strojeva i tehnologije.....	111

6.4	Izračun i dobivena rješenja GA za odabrane vremenske horizonte	115
6.5	Usporedba rezultata dobivenih GA	127
6.6	Usporedba dobivenih rezultata između postojećeg FPS i novog RPS sustava	131
7	ZAKLJUČAK	136
7.1	Osvrt na provedeno istraživanje i rezultate	137
7.2	Smjerovi budućih istraživanja.....	138
	POPIS LITERATURE	140
	POPIS ILUSTRACIJA	148
	Popis tablica	148
	Popis slika.....	148
	POPIS PRILOGA	151
	PRILOG A	152
	PRILOG B.....	174
	PRILOG C.....	176
	PRILOG D	180
	PRILOG E.....	184
	PRILOG F.....	188
	PRILOG G.....	191
	ŽIVOTOPIS	195
	POPIS RADOVA	196

NOMENKLATURA

Indeksi skupova

$f = \{1,2, \dots, F\}$	indeks skupa faza obrade, gdje je F ukupni broj faza obrade
$i = \{1,2, \dots, I\}$	indeks skupa proizvodne opreme, gdje je I ukupni broj opreme
$j = \{1,2, \dots, N\}$	indeks skupa izradaka, gdje je N ukupni broj izradaka
$m = \{1,2, \dots, R\}$	indeks skupa kombinacija tipova proizvodne opreme, gdje je R ukupni broj kombinacija tipova proizvodne opreme
$p = \{1,2, \dots, SKZ\}$	indeks skupa skupova klastera zahvata, gdje je SKZ ukupni broj skupova klastera zahvata
$r = \{1,2, \dots, Z\}$	indeks skupa tipova proizvodne opreme, gdje je Z ukupni broj tipova proizvodne opreme
$s = \{1,2, \dots, S\}$	indeks skupa konfiguracija, gdje je S ukupni broj konfiguracija
$u = \{1,2, \dots, PP\}$	indeks skupa perioda potražnje, gdje je PP ukupni broj perioda potražnje
$v = \{1,2, \dots, N_{TI}\}$	indeks skupa tipova izradaka, gdje je N_{TI} ukupni broj tipova izradaka

Latinični simboli

a_i	godišnji iznos amortizacije i -te proizvodne opreme [N]/god]
\mathbf{A}	matrica linearnih jednadžbi
b	broj gena u kromosomu
c_m	vjerojatnost križanja
C_R	broj konačnih rješenja
d_f	diskontni faktor
D	duljina konfiguracije (broj faza obrade)

\mathcal{F}	odabrane faze obrade za svaku konfiguraciju
F_c	funkcija cilja
f_r	r -ti tip proizvodne opreme dodijeljen svakoj fazi obrade
g	vrijednost gena u PP
G	broj generacija
k	populacija
k_i	najmanji inkrement kapaciteta
k_r	veličina kromosoma
k_s	godišnja kamatna stopa [%]
kz_{jl}	l -ti KZ za j -ti izradak
K_{rj}	zahtijevani proizvodni kapacitet za j -ti izradak [j.p./j.v.]
KD	vrijednost kazne za početni trošak veći od D_{max} [N]
KM	vrijednost kazne za početni trošak veći od PA_{max} [N]
KZ_j	skup klastera zahvata potrebnih za izradu j -tog izratka
L	broj KZ-a (SKZ-a)
m_f	jedan od mogućih kombinacija strojeva dodjeljenih f -toj fazi obrade
$M_{f,m,r}$	potreban broj r -tog tipa proizvodne opreme u m -tom broju mogućih kombinacija u f -toj fazi obrade
N_f	skup svih izradaka dodijeljeni f -toj fazi obrade [j.p.]
NSV	faktor neto sadašnje vrijednosti
N_{TI}	količina j -tog tipa izratka [j.p.]
$N_{TI_{PP}}$	količina izradaka svakog tipa po PP [j.p.]
p_m	vjerojatnost mutacije [j.p.]
P_j	nivo proizvodnosti PS pri obradi j -tog izratka [j.p./j.v.]
PA	širina konfiguracije (broj paralelnih strojeva u pojedinoj fazi obrade)
Q_j	količina proizvoda (j -tog izratka) [j.p.]
Q_{ik}	količina proizvoda u i -toj fazi obrade u k -toj godini [j.p.]
skz_{jp}	p -ti SKZ za j -ti izradak
S_s	skalabilnost sustava
S_p	broj strojeva pomaknutih u sustavu
SKZ_j	skup skupova klastera zahvata potrebnih za izradu j -tog izratka
SKZ_k	skup kompozitnih SKZ-a
SKZ_{k,j}	skup kompozitnih SKZ-a svakog j -tog izratka
SKZ_{j,r}	skup SKZ koji se mogu izraditi na r -tom tipu proizvodne opreme za j -ti izradak

$SKZ_{f,j,r}$	skup SKZ dodijeljen r -tom tipu proizvodne opreme, za izradu j -tog izratka u f -toj fazi obrade
SKZ_f	skup svih SKZ-a dodijeljenih f -toj fazi obrade
t	vremenski period [j.v.]
t_c	vrijeme trajanja operacije (vrijeme trajanja ciklusa) [j.v./j.p.]
$t_{d,z}$	vrijeme dobave svakog tipa proizvodne opreme [j.v./tip stroja]
t_o	vrijeme trajanja o -te operacije [j.v./j.p.]
t_{pp}	trajanje perioda potražnje [j.v.]
t_{pz}	pripremno završno vrijeme [j.v./j.p.]
T	početni trošak [N]
T_f	početni trošak u f -toj fazi obrade [N]
$T_{f,m}$	trošak za f -tu fazu obrade za sve m -te dodijeljene i moguće kombinacije proizvodne opreme [N]
T_r	početni trošak r -tog tipa proizvodne opreme [N]
$T_{r,m}$	početni trošak r -tog tipova proizvodne opreme u m -toj kombinaciji [N]
$T_{uk,opt}$	početni trošak konfiguracije [N]
T_{vi}	početno ulaganje konfiguracije [N]
Z	Skup raspoloživih tipova strojeva
Z_a	zahvat
Z_f	broj tipova proizvodne opreme dodjeljenih f -toj fazi obrade
$Z_{f,m}$	skup tipova proizvodne opreme, u m -toj kombinaciji za f -tu fazu obrade
$Z_{r,m}$	skup od r različitih tipova proizvodne opreme u m -toj kombinaciji

Grčki simboli

α	broj retka podmatrice
β	broj stupaca podmatrice
Φ	matrica stope proizvodnje SKZ-a po strojevima
$\Phi_{f,r,m}$	podmatrica stope proizvodnje SKZ-a dodjeljenih f -toj fazi obrade na r -tom tipu proizvodne opreme u m -toj mogućoj kombinaciji proizvodne opreme
$\theta_{skz_{jp}}$	izvedivost obrade SKZ skz_{jp}
$\varphi_{skz_{jp}}$	vrijeme obrade SKZ skz_{jp} [j.v./j.p.]
$\alpha_{skz_{jp}}$	minimalni broj proizvodne opreme za izradu SKZ skz_{jp}
$\omega_{skz_{jp},r}$	razina proizvodnje SKZ skz_{jp} [j.p./j.v.]
η	stupanj iskorištenja

η_T	stupanj iskorištenja ovisan o modelu PS i udjelu t_{pz}
η_{Tfr}	stupanj iskorištenja r -tog tipa proizvodne opreme dodijeljen f -toj fazi obrade
ε_j	zahtjev potražnje j -tog tipa izratka [j.p./j.v.]
$\varepsilon_{SKZ,j}$	zahtjev potražnje za skup SKZ j -tog izratka [j.p./j.v.]
λ	jedinka potomka
λ_p	veličina populacije
μ	jedinka roditelja
φ	kriterij prekida algoritma

Eksponenti i indeksi

k	jedinka populacije
gen	generacija
$lstsq$	funkcija izračuna metodom najmanjih kvadrata (eng. <i>last squares</i>)
nns	funkcija ograničenja ne-negativnosti (eng. non-negativ <i>last squares</i>)
max	najveća vrijednost
min	najmanja vrijednost
n	broj parametra (veličina uzorka)
opt	optimalna vrijednost
o	operacija koja se izvodi na i -toj proizvodnoj opremi
p	p -ti gen kromosoma
q	iteracija po redcima podmatrice stope proizvodnje
$sust$	vrijednost sustava
$spec$	specifična vrijednost
t	vremenska vrijednost
uk	ukupna vrijednost

Kratice

AHP	Analitički hijerarhijski procesi (eng. <i>analytic hierarchy procesi</i>)
AI	Umjetna inteligencija (eng. artificial intelligence)
AMP	Analitički mrežni proces (eng. <i>Analytical network process, ANP</i>)
ASPP	Automatizirani sustav za pohranu i preuzimanje
CAD	Projektiranje pomoću kompjutora (eng. <i>Computer Adid Design</i>)
CAM	Numeričko upravljanje strojem (eng. <i>Computer Adid Machine</i>)
CNC	Računalno-numeričko upravljanje (eng. <i>Computer Numerical Control</i>)
DNU	Direktno numeričko upravljanje (eng. <i>Direct Numerical Control, DNC</i>)

FPC	Fleksibilna proizvodna ćelija (eng. <i>flexible manufacturing cells, FMC</i>)
FPS	Fleksibilni proizvodni sustav (eng. <i>Flexible Manufacturing System, FMS</i>)
GA	Genetski algoritam (eng. <i>genetic algorithm</i>)
GPP	Generiranje perioda potražnje
IEEE	Institut elektroinženjera i elektroničara (eng. <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>)
IKZ	Izvediv niz KZ
ISKZ	Izvediv niz SKZ
ISKZD	Izvediva dodjela SKZ
j.v.	Jedinica vremena
j.p.	Jedinica proizvoda
KD	Kazna za dodjelu više D_{max} faza obrade od dozvoljene
KFS	Kibernetičko - fizikalni sustav (eng. <i>Cyber - Physical System, CPS</i>)
KM	Kazna za dodjelu više od PA_{max} paralelnih strojeva u određenoj fazi obrade
KR	Konfiguracijsko razdoblje
KZ	Klaster zahvata
M2M	Pojam komunikacijskog protokola među strojevima (eng. <i>Machine-to-Machine</i>)
NJ	Novčana jedinica
NPS	Namjenski proizvodni sustavi (eng. <i>Dedicated Manufacturing System, DMS</i>)
NRS	Ne-rekonfigurabilni stroj (eng. <i>Non-Reconfigurable Machining Tool, NRMT</i>)
OC	Obradni centar
OEE	Učinkovitost opreme (eng. <i>Overall Equipment Effectiveness, OEE</i>)
OOE	Opća učinkovitost rada (eng. <i>Overall Operations Effectiveness, OOE</i>)
PP	Period potražnje
PPK	Pojedinačni proizvodni kapacitet
PS	Proizvodni sustav
RKS	Rekonfigurabilni kontrolni stroj (eng. <i>Reconfigurable Inspection Machine, RIM</i>)
RPS	Rekonfigurabilni proizvodni sustav (eng. <i>Reconfigurable Manufacturing System, RMS</i>)
RPV	Raspored strojeva prema vrsti opreme
RS	Rekonfigurabilni stroj
SKZ	Skup klastera zahvata
SMZ	Simulirana metoda žarenja (eng. <i>Simulated annealing, SA</i>)
SSR	Raspored strojeva sličnog redoslijeda
TEEP	Ukupna efektivna učinkovitost opreme (eng. <i>Total Effective Equipment Performance</i>)

TOK	Traženje optimalne konfiguracije
VFPS	Višepredmetni fleksibilni PS
VLS	Višepredmetna linijski sustav
VRPS	Višepredmetni rekonfigurabilni PS

1 UVOD

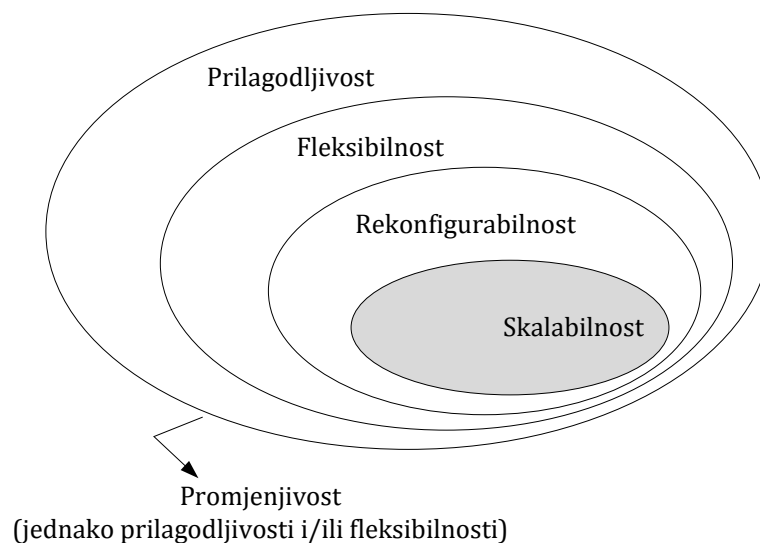
Proizvođači, kao i znanstvenici, slažu se da je sposobnost svakog proizvodnog subjekta, u cilju ispunjavanja zahtjeva konkurentskog, dinamičkog tržišta, prvenstveno determinirana svojim proizvodnim kapacitetima. Prema tome, da bi se adekvatno odgovorilo na promjene na razini potražnje, prepoznata je potreba za fleksibilnošću u obimu proizvodnje. Tržište pred industrijom postavlja i neke nove zahtjeve kao što su povećanje složenosti i raznolikosti proizvoda, povećanje zahtjeva za kvalitetom povezano s visokim pritiscima na snižavanje troškova, povećanje zahtjeva u pogledu fleksibilnosti, kraći životni vijek proizvoda te smanjenje veličine serije. Iz takvih tvrdnji proizlaze izazovi za formiranje proizvodnih sustava (PS) koji trebaju osigurati slijedeće preduvjete za postizanje konkurentnosti [1-3]:

- osigurati mjere za postizanje promjenjivosti, fleksibilnosti, prilagodljivosti, reaktivnosti, rekonfigurabilnosti te njihovu međuovisnost u PS, kao osnovne karakteristike rekonfigurabilnih proizvodnih sustava (RPS),
- osigurati rekonfigurabilne logističke i manipulativne potpomažuće sustave,
- ostvariti modele ekonomske opravdanosti postavljenih PS na načelima funkcionalne skalabilnosti (eng. *scalability*) balansiranjem proizvodnih kapaciteta,
- uslijed visokih frekvencija promjena, osigurati glatku i mirnu tranziciju PS iz jednog u drugi konfiguracijski period,
- osigurati što višu razinu standardizacije svih djelova PS: tehnoloških operacija i zahvata, strukture proizvoda, informatičkih platformi, inženjerskog rada te nabavu proizvodne i pomoćne opreme,
- konstruirati rekonfigurabilnu proizvodnu opremu koja podržava postavke RPS-a, uz hardverske i softverske komponente, prilagođenu novoj paradigmi Industrije 4.0¹, a koja daje pozitivan odgovor na slijedeća pitanja:

¹ Pojam za tehnološku revoluciju digitalizacije i sveprisutne povezanosti omogućene tehnološkim napretkom. Uključuje kibernetičko-fizičke sustave, internet stvari i računarstvo u oblaku. Industrija 4.0 stvara ono što se naziva "pametna tvornica".

- je li je stroj ili PS (CNC stroj, osi strojeva, manipulatori, itd.) konstruiran tako da se fizička struktura može mjenjati jednostavno, brzo i jeftino,
- je li je stroj ili PS konstruiran za proizvodnju i(ili) kontrolu grupe proizvoda, uz jednostavnu, brzu i jeftinu prenamjenu s proizvoda na proizvod.

Prva studija o problemu izgradnje dinamičkih proizvodnih kapaciteta provedena je krajem 60-tih godina prošlog stoljeća [4], a opsežan pregled klasičnog problema izgradnje i razvoja modela proizvodnih kapaciteta može se naći kod Lussa [5]. Međutim, za današnje dinamično tržište, PS su obično suočeni s neizvjesnom potražnjom i potrebom za brzim izmjenama, kako tehnoloških tako i proizvodnih. Uz kontinuirani napredak tehnologije, javlja se potreba za rješavanjem problema skalabilnosti proizvodnih kapaciteta. Intenzivnim istraživačkim radom na području RPS-a početkom 21. stoljeća stvoreni su osnovni koncepti u konstrukciji strojeva prilagođeni za brze promjene u strukturi, kako hardverskih tako i softverskih komponenti, s ciljem brze prilagodbe proizvodnih kapaciteta i funkcionalnosti unutar grupe proizvoda u odnosu na iznenadne promjene na tržištu. ElMaraghy u svom radu [6] navodi da će se stari, feksibilni proizvodni sustavi (FPS) i nove RPS paradigme i dalje razvijati, a da njihovi okviri u kojima djeluju nisu potpuno jasni s aspekta proizvodnih značajki koje će biti sve izražajnije. Tako da ostaje pitanje: je li RPS sazrio FPS ili je li FPS budućnost RPS? Naime, potpuno rekonfigurabilni sustavi i strojevi danas još ne postoje na tržištu te su predmet istraživanja i nalaze se u različitim fazama razvoja. Definicija fleksibilnosti je vrlo široka, te podrazumijeva bilo kakve promjene, uključujući rekonfigurabilnost. U [7-8] navodi se fleksibilnost pretvorbe, pojam sličan rekonfigurabilnosti gdje se strojevi ili radne stanice izmjenjuju ili nadopunjuju. Prema tom stajalištu, skalabilnost je podskup obje, fleksibilnosti i rekonfigurabilnosti, kao što je prikazano na slici 1.1, a sve to dio je promjenjive proizvodnje (eng. *changeable manufacturing*).



Slika 1.1 Skalabilnost kao jedan od glavnih pokretača promjenjive proizvodnje [7]

Doprinos razvoju RPS kroz različite studije i primjene u praksi [2, 19, 20, 22, 26, 29], dao je sljedeća poboljšanja u modelima PS:

- troškovi planiranja i kontrole su smanjeni u fazi rasta obima proizvodnje, dok su značajno manji troškovi efekta rekonfigurabilnosti vezano uz performance, kvalitetu proizvoda, krivulju učenja kod zaposlenika, potencijalnu kompleksnost rada sustava i kontrole,
- dostignuta određena razina izmjenjive funkcionalnosti i skalabilnosti proizvodnih kapaciteta tijekom životnog vijeka PS,
- razvoj funkcija podrške i prepoznavanja uz primjenu informatičkih sustava podižu efekte rekonfigurabilnosti kroz:
 - pomoć pri izboru najbolje opreme (strojeva, kontrolne te logističke opreme),
 - prepoznavanje geometrije oblika novog izratka i automatskom generiranju CNC programa,
 - automatsku logističku potporu manipulacije reznih alata, steznih naprave, mjerne opreme i ostale opreme tijekom cijelog procesa,
 - praćenja proizvoda od početka do kraja procesa izrade,
 - mogućnost analize proizvodnje i njegove cijene u svakoj fazi procesa.

Unutar rekonfigurabilnosti, skalabilnost ima značajan utjecaj na optimalno funkcioniranje proizvodnje s postavljenim proizvodnim kapacitetima upravo toliko koliko ih treba u datom terminu potražnje. U terminologiji PS, skalabilnost znači stvaranje novokonfiguriranog PS dodavanjem (uklanjanjem) proizvodnih resursa na troškovno učinkovit način kako bi se prilagodila proizvodnja kada se za to javi potreba.

U kontekstu slike 1.1 i [9], skalabilnost je jedno od načelnih činitelja promjenjive proizvodnje. Rekonfigurabilne konfiguracije PS imaju daleko veću skalabilnost od konfiguracija proizvodnih ćelija jer kod ćelijskih oblika konfiguracija treba dodati cijelu jednu ćeliju da bi se povećao proizvodni kapacitet sustava. Kod RPS konfiguracija, s druge strane, strojevi mogu biti dodani na bilo koji segment procesa bez ometanja drugih operacija kroz određeni vremenski period. Skaliranje pojedine konfiguracije PS obično počinje na segmentima uskog grla sustava kako bi se smanjilo ukupno vrijeme ciklusa proizvodnje. Ponovno rekonfiguriranje cijelog sustava, nakon dodavanja stroja u sustav, zahtjeva promjene i na drugim segmentima u vidu promjena tehnoloških postupaka, ujednačenosti vremena trajanja operacija i sl. Pojam "skalabilnost" u okviru proizvodne zajednice počeo je dobivati veliku pozornost tek nedavno. Ta činjenica opravdava skalabilnost kao relevantan čimbenik u postavljanju PS te se u ovom trenutku može procijeniti prije svega kroz primjenu u razvoju PS, te manje u industrijskoj primjeni zbog inkubacijskog razdoblja potrebnog za prijenos znanja i tehnologije u industriju. Skalabilni modeli za PS u analitičkom obliku, prvenstveno su razvijeni u području RPS kao sposobnost brzog

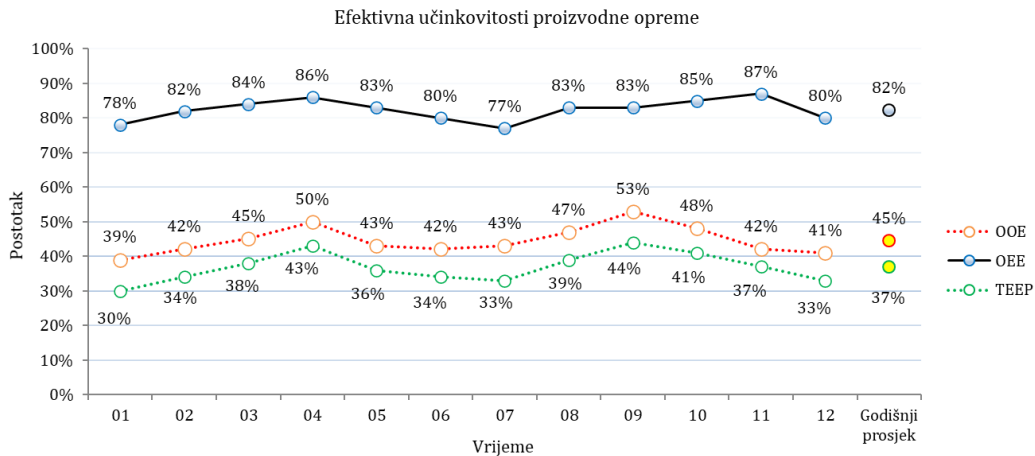
podešavanja proizvodnih kapaciteta (ili promjene propusnosti PS) prelaskom iz jednog u drugi, kada je to potrebno, a da bi se pritom ostvarili tržišni zahtjevi.

1.1 Postavljanje problema

Na dinamički zahtjevnom tržištu te zbog velikog utjecaja konkurencije, opstanak troškovno optimalnog PS ovisit će prvenstveno o dobro izabranim i izbalansiranim proizvodnim kapacitetima koji imaju sposobnost rekonfiguracije i moderno upravljanje. Također, ovisit će o visini investicijskih ulaganja, prostornom rasporedu, održavanju, te obučenosti i stručnosti radnog osoblja. Postojeći PS ne daju mogućnost punog iskorištenja proizvodne opreme u svakom trenutku perioda potražnje (PP), te unutar njih postoje vremenski ciklusi u kojima se nailazi na velika odstupanja od ciljne vrijednosti optimalne produktivnosti, a time i povećanih troškova proizvodnje. Zbog »fiksno« postavljenih kapaciteta, dolazi do slabe iskorištenosti i neekonomičnosti uslijed nepostizanja optimalnih vrijednosti ukupnog iskorištenja proizvodne opreme (eng. *Overall Equipment Effectiveness* - OEE)² i opće učinkovitosti rada (eng. *Overall Operations Effectiveness* - OOE), što je prikazano na slici 1.2 za realan primjer iz proizvodnje (podaci preuzeti iz tvornice P.P.C. Labin d.o.o.) Značajno slabija iskorištenost i neproduktivnost proizvodne opreme javlja se u fazi rasta proizvodnje do punih količina (eng. *rump-up*) i u fazi pada proizvodnje (eng. *rump-down*) prvenstveno zbog neadekvatno odabranog proizvodnog modela u tim fazama, a potom zbog manipulativnih i logističkih elemenata te njihove povezanosti na način da ne zadovoljavaju preduvjete RPS-a.

Iskorištenje proizvodne opreme i učinkovitost rada predstavljaju dva značajna pokazatelja produktivnosti. Na slici 1.2 prikazani su mjesečni (kroz 12 mjeseci) i godišnji pokazatelj iskorištenja i učinkovitosti u jednom proizvodnom subjektu koji proizvodi srednje do velike serije proizvoda iz aluminijskih slitina po proizvodnom modelu višepredmetnog FPS (VFPS). Proizvodne jedinice su organizirane u ćelije na kojima se vrši obrada jednog proizvoda. Na slici je vidljiva relativno slaba produktivnost prvenstveno kroz opću učinkovitost rada koja iznosi 45%, pa je ukupna efektivna učinkovitost proizvodne opreme (TEEP) na godišnjoj razini 37% što znači da 63% vremena proizvodna oprema ne stvara dodanu vrijednost. Drugi pokazatelj slabije produktivnosti je vrijeme faze rasta proizvodnje do pune količine u kojoj su postavljeni proizvodni kapaciteti prema maksimalnoj potražnji i takvi ostaju dok se ne realizira proizvodnja u punoj količini. U današnjim tržišnim uvjetima kada je PP za maksimalne količine kratak, faze rasta i pada količine određenog proizvoda uzimaju visoki udio u ukupnom vremenu proizvodnje.

² OEE predstavlja jednu od mjera produktivnosti, umnožak vrijednosti kvalitete, učinka i raspoložljivost (proizvodno vrijeme koje je stvarno produktivno) dok OOE predstavlja opću učinkovitost rada. Njihov umnožak je ukupna efektivna učinkovitost opreme (eng. *Total Effective Equipment Performance* – TEEP).



Slika 1.2 Prikaz ukupne efektivne učinkovitosti proizvodne opreme

U drugoj polovici 20-tog stoljeća, proizvođači srednjih i velikih serija uživali su u stabilnim tržištima s dugim životnim vijekom proizvoda. Tada je primjena namjenskih i fleksibilnih PS bila optimalna pa su udjeli vremena rasta do pune količine proizvodnje bili zanemarivi, a i opća učinkovitost rada bila je puno veća. U novije vrijeme tvrtke se suočavaju s učestalim i nepredvidivim promjenama na tržištu, uključujući i brzo uvođenje novih proizvoda te čestim variranjem PP. Iz tih razloga konstruktori se suočavaju s dilemama kakvi su PS optimalni. Ako je novi PS konstruiran za proizvodnju manje propusnosti u odnosu na zahtjeve koje će tržište imati u budućnosti, to će se odraziti na financijski gubitak u udjelu na tržištu, a ako je konstruiran da proizvede veću propusnost od stvarne koju će tržište trebati u budućnosti, onda će sustav biti djelomično neiskorišten, što znači znatan gubitak u početnim investicijama - kupnja, montaža i održavanje opreme koja nije u funkciji. Rješenje ove dileme je projektiranje modernih PS koji posjeduju nove karakteristike koje omogućuju buduću nadogradnju svojih kapaciteta prema karakteristikama skalabilnosti na troškovno učinkovit i pravovremen način. Kapaciteti PS-a koji posjeduju karakteristike skalabilnosti, mogu biti povećani brzo, točno kada tržištu treba, s više proizvoda te inkrementno, točno dodanim (ili oduzetim) kapacitetima prema potrebama tržišta. Mogućnost inkrementalnog dodavanja kapaciteta omogućuje troškovno učinkovito širenje cjelokupnog proizvodnog kapaciteta PS i proizvodnju više proizvoda bez povećanja proizvodnog troška samog proizvoda. U budućnosti će skalabilan sustav promijeniti pristup u načinu donošenja odluke o kapacitetima, eliminirajući pokušaje predviđanja ekonomskih uvjeta te davati brze odgovore na fluktuacije tržišta i potražnju u minimalnom vremenu. Krajnji rezultat bit će smanjenje troškova zbog manje iskorištenih kapaciteta te veća fleksibilnost [2].

Problem skalabilnosti proizvodnih kapaciteta rješava se, uglavnom, modeliranjem dinamičkih sustava proučavanjem učinka ograničenja kapaciteta na performanse sustava [10] te analizom učinka uskog grla proizvodnje na iskorištenost kapaciteta [11]. Razvijaju se i drugi modeli te

metode kako rješavati problem optimalne konfiguracije sustava primjenom indikatora konvertibilnosti i skalabilnosti proizvodnih kapaciteta i time pružanja novih mjernih podataka za informaciju o proizvodima i procesima [12-13]. Nadalje, razvijaju se analitički hijerarhijski procesi za odabir PS među mogućim alternativama kako bi se selektirali proizvodi za formiranje familije proizvoda³ [15] dok su istraživani i optimalni rekonfigurabilni sustavi za probleme prostornog rasporeda zasnovani na otvorenom mrežnom modelu čekanja [16]. U velikoj mjeri se počinju koristiti meta-heurističke metode [17] za optimiziranje rasporeda proizvodne opreme i raspored operacija. Korištenjem takvih metoda utvrđuje se skup ekonomskih rješenja, a kako bi se prevladala složenost istraživanje, ove metode uspoređuju optimalnu konfiguraciju u skladu s izvedljivošću sekvenci u procesu. Pristupi koji se temelje na smanjenju ukupnog broja proizvodne opreme i maksimiziranju propusnosti sustava uz njihov istovremeni preustroj i rebalans osiguravaju usklađivanje sa potrebama i zahtjevima tržišta, [18-19].

Na području istraživanja modela višepredmetnih RPS (VRPS) postoji malo znanstvenih radova i prvenstveno su koncipirani za primjenu modularnih strojeva gdje se u svakoj fazi obrade koristi isti tip stroja sastavljen od baze stroja i promjenjivih modula. Praktična primjena RPS je u začetku, rekonfigurabilni strojevi su još u prototipnoj fazi. U praksi veliki problem stvaraju još uvijek nepripremljeni standardi počevši od sustava priključaka, do numeričkog upravljanja, manipulativne i logističke opreme pa i koncepata samih radnih modula kao dijelova RPS. Pokretanjem nove paradigme Industrije 4.0 započelo se intenzivno raditi na standardizaciji elemenata PS što će doprinijeti bržem i sveobuhvatnijem stvaranju realnog koncepta RPS.

1.2 Metodologija istraživanja

Svaki PS formiran je modelom koji može proizvoditi određeni asortiman proizvoda pri određenim proizvodnim uvjetima. U tijeku istraživanja analizirat će se rekonfiguracija PS na osnovama zadanih tržišnih uvjeta i postavljenih proizvodnih kapaciteta. Nadalje, analizirati će se arhitektura sustava višepredmetnih PS na osnovama RPS koji se sastoje od više paralelnih CNC strojeva u svakoj fazi obrade, gdje u svakoj fazi obrade mogu i ne moraju biti isti strojevi. U radu će se koristiti metoda modeliranja genetskim algoritmom (GA) (eng. *genetic algorithm* - GA) gdje će se uz postavljenu funkciju cilja i ograničenja simulirati optimalni skalabilni PS koji generira minimalni trošak uz optimalnu učinkovitost te iskoristivost opreme i prostornog rasporeda. Uz empirijsko istraživanje analizirat će se i najnovija saznanja na području RPS, odnosno skalabilnosti, kao jednu od glavnih karakteristika novorazvijenih PS. Sintezom dobivenih informacija prikazat će se utjecaj skalabilnosti na optimalno formiranje VRPS.

³ Prema [143] familija proizvoda je grupa proizvoda koja ima neke specifične sličnosti u konstrukcijskim karakteristikama ili proizvodnom procesu pa će se u daljnjem tekstu koristiti izraz grupa proizvoda.

1.3 Sadržaj rada

Rad je podijeljen na sedam poglavlja. U drugom poglavlju analizirani su RPS, njihovi osnovni čimbenici te primjena u proizvodnji. Dan je pregled dosadašnjih znanstvenih istraživanja na području modeliranja PS. Treće poglavlje opisuje dominantne modele PS sa naglaskom na višepredmetne PS i RPS. Daje kvalifikaciju između fleksibilnosti i rekonfigurabilnosti te broja i oblika konfiguracija. U četvrtom poglavlju opisuje se utjecaj skalabilnosti i njezine karakteristike na formiranje VRPS. Dani su primjeri industrijske prakse i znanstvene metode koje daju smjernice i okvire u konstrukciji skalabilnosti s glavnim učincima na PS. Predstavljena je arhitektura skalabilnih strojeva i načela konstrukcije. Peto poglavlje opisuje projektiranje koncepta skalabilnog VRPS-a razvojem modela izračuna optimalnog troška rekonfiguracije postavljanjem funkcije cilja i algoritma za višestruki vremenski period. U šestom poglavlju prikazana je metoda na konkretnom primjeru iz proizvodne prakse, na višepredmetnom rekonfigurabilnom sustavu, uz komentare dobivenih rezultata. Dana je usporedba dobivenih rezultata s poznatim rješenjima iz područja RPS te usporedba dobivenih rezultata s realnim PS u proizvodnji. U sedmom poglavlju dana su zaključna razmatranja te osvrt na provedeno istraživanje.

1.4 Očekivani znanstveni doprinos istraživanja

U RPS, gdje nema potrebe za ostatkom (viškom) kapaciteta, a da se zaštite od neizvjesnosti, proizvođači trebaju imati za cilj iznaći način kako povećati iskoristivost proizvodne opreme. Stoga, u svim fazama projektiranja skalabilnih višepredmetnih PS te pripadajućim procesima, takav cilj mora biti jasno definiran, a kvalitetna rješenja moraju doprinositi uspješnosti poslovanja tvrtke. Iako je predstavljen rad usmjeren na skalabilnost kapaciteta u modernim VRPS, primjenjivost je univerzalna i kod ostalih sustava koji usvoje načelo dinamičkog upravljanja kapacitetima kroz rezultate postavljenog modela. Iako je samo istraživanje empirijski orijentirano, očekuje se da će dobivena saznanja i rezultati istraživanja, u znanstvenom smislu, doprinijeti i razvoju metodologije konstruiranja te realizacije proizvodnih procesa, a svakako će doprinijeti i evaluaciji ekonomskih pokazatelja. Dobiveni rezultati mogu se klasificirati kao nove spoznaje koje su potvrđene kroz razvijeni dinamički model, a djeluju kao validacija predloženog modela. U okviru istraživanja primijenjena je metodologija kojom će se predložiti optimalni skalabilni PS i projekcija na pokazatelje početnih troškova, kako bi se dobio odgovor s kojim parametrima je potrebno planirati, projektirati ili izvršiti reinženjering strukture PS na bazi minimizacije cjelokupnih troškova proizvodnje. Usvajanjem načela dinamičkog upravljanja kapacitetima dolazi se do novih znanstvenih spoznaja u istraživanju utjecaja skalabilnosti na proizvodni i poslovni sustav.

Analizirat će se i parametri koji nisu ranije uzimani u obzir u ovom znanstvenom području:

- skalabilnost višepredmetnih PS kroz veću dinamiku u primjeni različitih tipova strojeva u pojedinoj fazi obrade,
- utjecaj vremena dobave proizvodne opreme na konstrukciju skalabilnog sustava,
- razina rekonfigurabilnosti i propusnosti PS-a,
- tehnološko ekonomska analiza u uvjetima rekonfigurabilnosti.

1.5 Hipoteza istraživanja

Projektiranje skalabilnih proizvodnih sustava u uvjetima globalizacije tržišta i rasta konkurentnosti postaje ključni čimbenik uspjeha te važan dio formiranja PS s ciljem osiguranja nesmetane dobave proizvoda. U takvom dinamičkom okruženju gdje su zahtjevi u dobavama proizvoda sve više podložni iznenadnim oscilacijama, potrebno je osigurati upravo toliko kapaciteta koliko ih u određenom trenutku treba. Modeliranjem potrebnih i raspoloživih kapaciteta utječe se na njihovu visoku iskoristivost uz optimalne troškove.

Značajan doprinos u istraživanju optimalnih troškova RPS primjenom načela skalabilnosti dali su: ElMaraghy [6], Putnik i sur. [7], Abdi i sur. [14], Koren i sur. [31], Son [76], Youssef i sur. [82], Wang i sur. [92], Spicer i sur. [99], Tang i sur. [111], Dou i sur. [113], temeljeći svoja istraživanja na praktičnoj primjeni skalabilnosti koristeći različite algoritme, matematičke modele i metode u cilju pronalaženja cjenovno optimalnih konfiguracija sustava. Predmet istraživanja su uglavnom konstrukcije linijski PS temeljeni na CNC strojevima (samostalne jedinice, fleksibilni sustavi, hibridi namjenskih i fleksibilnih PS) sa svrhom optimizacije protoka i prostornog rasporeda na način dodavanja i oduzimanja strojeva na brz i cjenovno efikasan način. Arhitektura PS se temelji na postavljanu više faza obrade koje sadrže više paralelnih strojeva ili bazičnim strojevima koji koriste višefazne module za vršenje pojedinih operacija, povezanih transportnim sustavima. Kritični segment operativne efikasnosti je balansiranje operacijama gdje bi svaki stroj trebao imati slično vrijeme ciklusa obrade. Skaliranje sustava se vrši dodavanjem i oduzimanjem stroja gdje je u svakoj fazi obrade nalazi isti tip stroja. Međutim takvi sustavi su kruti i uglavnom prilagođeni kod postavljanja novih PS. U skladu sa definiranim problemom i ciljem istraživanja postavljena je sljedeća hipoteza:

Postići optimalnu produktivnost i iskoristivost proizvodne opreme na modelu višepredmetnog rekonfigurabilnog proizvodnog sustava definiranjem načela skalabilnosti proizvodnih kapaciteta kojim će se zadovoljiti ciljevi proizvodnje uz minimalne kapitalne troškove, upotrebom više tipova strojeva u istoj fazi obrade za više perioda potražnje, a sve u cilju održivosti proizvodnog sustava na dinamički zahtjevnom tržištu.

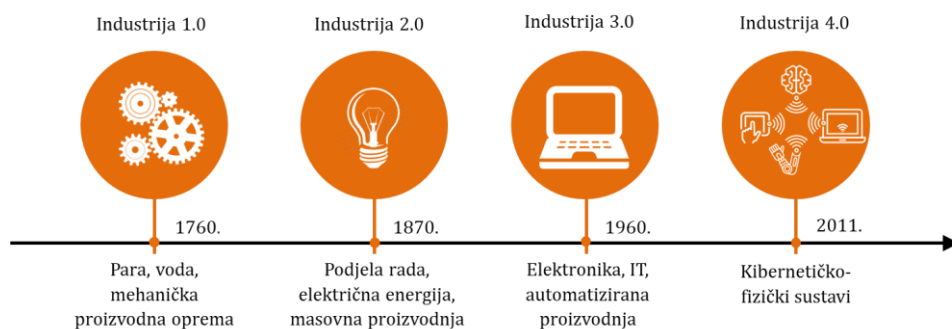
Takav pristup postavljanja PS prihvatljiv je i za novu i za postojeću proizvodnu opremu uz optimalno postavljanje sustava za manipulaciju. Omogućeno je korištenje proizvodne opreme uz više varijacija redoslijeda obrade, a potreba za međuskladištenjem izradaka je minimalna. Novo razvijena metoda projektiranja PS, korištenjem matematičkog modela, omogućuje brži proces rekonfiguracije s mogućnošću upotrebe više tipova proizvodne opreme uz ograničenje njihovih vremena dobave koja je uvjetovana njihovom složenošću. Tako se u ranoj fazi postavljanja koncepta ili nadogradnje postojećeg PS mogu dobiti podaci o optimalnoj konfiguraciji u određenom PP te minimalno potrebnim početnim troškovima uz održavanje zahtijevane razine kvalitete proizvodnog procesa. Da bi se odgovorilo na izazove promjenjivog okruženja i unapređenja vlastite konkurentnosti, tvrtke moraju definirati nove postupke projektiranja i optimizacije PS utemeljene na znanstvenim istraživanjima te tako proširiti do sada poznate kriterije za odabir koncepta PS uvođenjem novih tehnologija u svoje procese.

1.6 Primjena rezultata istraživanja

Rezultati i spoznaje dobivene ovim znanstvenim istraživanjem bit će primjenjivi u svim PS koji kao primarnu djelatnost imaju proizvodnju, kako u projektiranju novih tako i u rekonfiguraciji postojećih skalabilnih PS-a. Dobivanjem vrijednosti o stvarno potrebnim proizvodnim kapacitetima, moguće je optimalno balansirati kapitalne troškove te omogućiti visoku razinu produktivnosti u uvjetima izrazitih dinamičkih oscilacija koje su neminovne u budućim vremenima. Značajan doprinos ovog istraživanja je u vidu nadogradnje postojećih sustva i njegovim pretvaranjem u RPS čime se povećava produktivnost i ekonomičnost poslovanja, a eliminiraju prijelazni periodi u kojima je iskorištenost strojeva manja. Novim tehnološkim saznanjima i mogućnostima te razvojem novih tehničkih komponenti koje karakteriziraju novu paradigmu Industrije 4.0, bit će moguće standardizirati i pojednostaviti procese dodavanja i oduzimanja strojeva, podignuti razinu automatizacije te učiniti proizvodnju vrlo učinkovitom. Definiranje novih utjecajnih čimbenika jesu daljnji koraci projektiranja PS. Kako reaktivnost na zahtjeve iz tržišta postaje vrlo značajan čimbenik u poslovanju, upravljanje proizvodnim kapacitetima na osnovama prikazanim u ovom radu postaje pogodan alat za upravljačku strukturu u tvrtkama.

2 REKONFIGURABILNI PROIZVODNI SUSTAVI

Analizirajući proizvodnju u kontekstu vremena, svijet se dramatično promijenio u posljednjih 100 godina kao odgovor na ekonomske i društvene okolnosti. Potaknuti različitim zahtjevima u različitim razdobljima, uvedene su proizvodne tehnologije i nove paradigme za rješavanje gospodarskih izazova kao odgovori na društvene potrebe. Povijesno gledajući industrijski razvoj čovječanstva pokretan je kroz nekoliko industrijskih revolucija koje su stvarale nove proizvodne sustave kao što je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1 Industrijske revolucije kroz povijest (<http://www.novomics.com/>)

Prijelazom na nove proizvodne procese, kada je stroj zamijenio ljudski rad, dogodila se prva industrijska revolucija koja je trajala u razdoblju od 1760-tih godina pa do polovice 19. stoljeća. Ta paradigma stvorila je općenito najveću preobrazbu društva pojavom mehaničkih strojeva pokretanih parom, proizvodnje kemijskih spojeva, proizvodnje željeza te razvoja strojnih alata i stvaranja tvorničkih sustava.

Druga industrijska revolucija poznata kao „Tehnološka revolucija“ bila je faza brze industrijalizacije koja je trajala u periodu između 1870. pa do pojave numeričkog upravljanja. To je razdoblje rasta već postojećih industrija i proširenje novih, poput industrije čelika, nafte, električne energije, te korištene električne energije za stvaranje modela masovne proizvodnje.

Glavni tehnološki napredak tijekom tog razdoblja bio je električni motor na izmjeničnu struju, telefon, žarulja, fonograf, motor s unutarnjim izgaranjem, itd. Suočavajući se s zahtjevom troškovne učinkovitosti, Henry Ford izumio je pokretnu traku 1913. godine, kojom započinje masovna proizvodnja.

Treća industrijska revolucija poznata kao „Digitalna revolucija“ predstavlja pomak od mehaničke i analogne elektroničke tehnologije do digitalne elektronike koja je započela krajem pedesetih do kasnih 1970-ih godina s usvajanjem i umnožavanjem digitalnih računala i digitalnih zapisa koja se nastavlja do današnjih dana. Implicitno, pojam se također odnosi na sveobuhvatne promjene koje donosi digitalna računalna i komunikacijska tehnologija tijekom druge polovice 20. stoljeća. U industrijskom svijetu ova revolucija donosi numerički upravljive strojeve, robotizaciju (uglavnom manipulativnu), razvoj FPS te primjenu informatičkih i komunikacijskih tehnologija.

Industrija 4.0 je naziv trenda automatizacije i razmjene podataka u proizvodnim tehnologijama. Izraz "Industrie 4.0", skraćeno I4, nastao je 2011. godine iz jednog od strateških projekata njemačke vlade, koji promiče informatizaciju proizvodnje, a javno je uveden iste godine na sajmu u Hannoveru („Hannover Messe“). Industrija 4.0 temelji se na digitalnoj revoluciji, koja predstavlja nove načine na koje se tehnologija ugrađuje u društva, pa čak i u ljudsko tijelo. Obilježena je novim otkrićima u brojnim tehnološkim područjima, uključujući intuitivnu robotiku, umjetnu inteligenciju, nano tehnologiju, kvantno računalstvo, biotehnologiju, internet stvari, aditivne tehnologije, autonomna vozila te automatizaciju.

2.1 Izazovi novih proizvodnih sustava

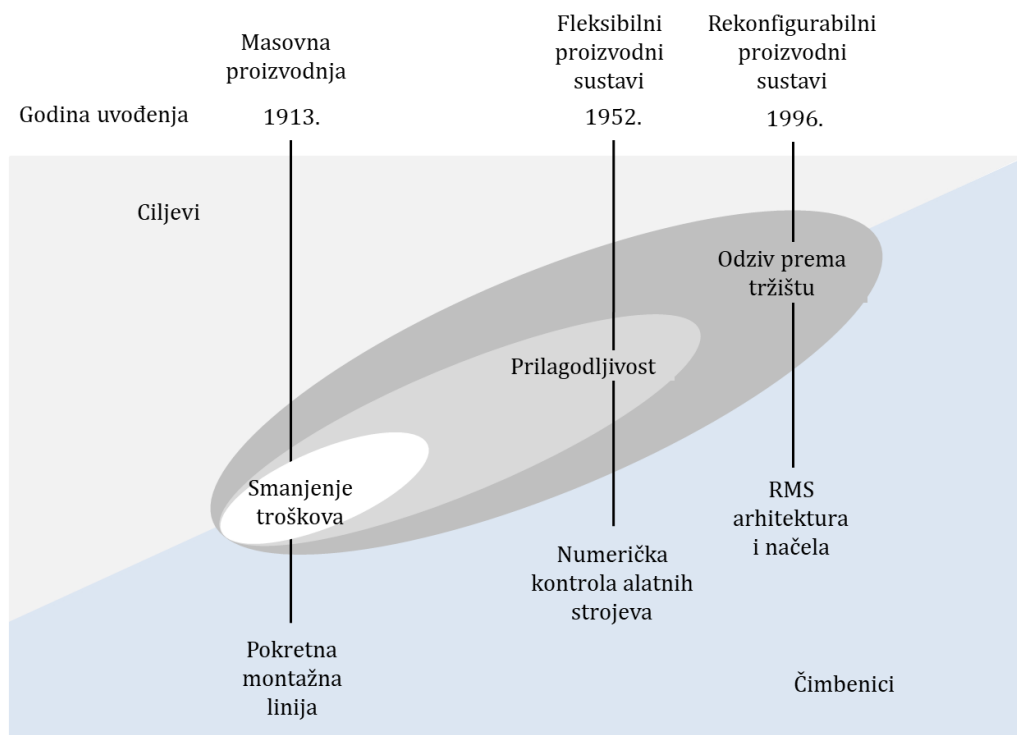
Sedamdesetih godina prošlog stoljeća, japanska proizvodna industrija počela je formulirati načela vitke proizvodnje (eng. *lean production*), te je dosljedna kvaliteta proizvoda postala glavna žarišna točka. Krajem 1970-ih, razvoj strojeva s računalno-numeričkim upravljanjem (eng. *Computer Numerical Control, CNC*) omogućio je stvaranje FPS, a time i proizvodnju različitih proizvoda na istom PS sa znatno kraćim ciklusima obrade. Globalizacija koja je započela devedesetih godina transformirala je konkurentnost te su se proizvodne tvrtke počele suočavati s nepredvidivim promjenama na tržištu, uključujući brzu, varijabilnu potražnju za proizvodima i čestim uvođenjem novih proizvoda [20]. Glavni činitelji promjena su:

- povećanje frekvencije predstavljanja novih proizvoda (personalizacija),
- učestale promjene postojećih proizvoda u proizvodnji,
- velike fluktuacije kako u potražnji za proizvodima tako i u njihovoj kombinaciji,
- promjene u regulativama na razini država,
- učestale promjene u tehnologiji i procesima.

To je u projektiranju PS u novim tvornicama postao veliki izazov, jer utječe na performanse proizvodnje dugi niz godina nakon samog projektiranja i postavljanja proizvodnje. Postalo je od iznimne važnosti da nove tvornice posjeduju novu vrstu PS dizajniranog za brze promjene u skladu s nepredvidljivim tržišnim zahtjevima, a koje su ujedno cjenovno optimalne na način da će [1]:

- lansirati nove modele proizvoda čija će proizvodnja započeti u vrlo kratkom vremenu, uz vrlo brzu prilagodbu kapaciteta PS prema zahtjevima tržišta,
- osigurati brzu integraciju novih funkcija i procesnih tehnologija u postojeće sustave,
- jednostavno prilagoditi PS promjenjivim količinama proizvoda za personalizirano tržište (u kojima se nove tehnologije i funkcije mogu lako integrirati).

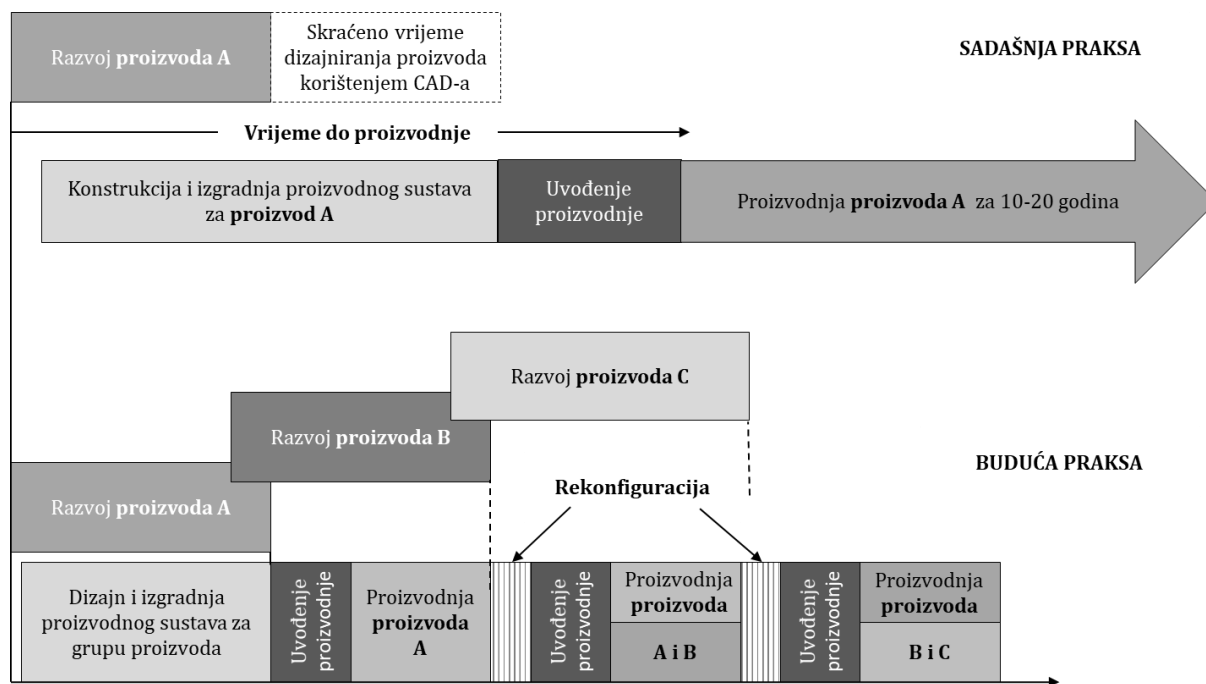
Na slici 2.2 simbolično su prikazani ciljevi koji su trebali biti postignuti pri svakoj novoj proizvodnoj paradigmi, a koje su omogućavali tehnološki čimbenici.



Slika 2.2 Inovacije u PS pokretane novim tehnološkim čimbenicima [2]

U fazi konstrukcije proizvoda upotrebom razvijenih računalnih softvera značajno je smanjeno vrijeme razvoja novog proizvoda ili izmjene postojećeg. Međutim takva razvojna metodologija još uvijek nije razvijena kod izgradnje PS tako da je ukupno vrijeme za optimalno funkcioniranje PS (razvoj novog ili nadogradnja postojećeg sustava te izgradnja sustava za proizvodnju do punih količina) postalo usko grlo. Skraćivanjem vremena uspostave PS do pune proizvodne količine može donijeti velike ekonomske uštede. To se može postići ubrzanom konstrukcijom na osnovi modularnih proizvodnih elemenata kao što je prikazano na slici 2.3. Usvajanje novog proizvoda ili

izmjene na postojećim (prilagodba), nove je funkcije u proizvodnji moguće prilagoditi kroz rekonfiguraciju, dodavanjem (ili oduzimanjem) proizvodnih funkcija kroz integriranje novih tehnologija. Tijekom životnog vijeka proizvoda i PS u novim tržišnim okvirima, postojat će mnogo faza promjena tako da pojam izgradnja sustava do pune proizvodne količine postaje kritični element u uspješnoj rekonfiguraciji [22].



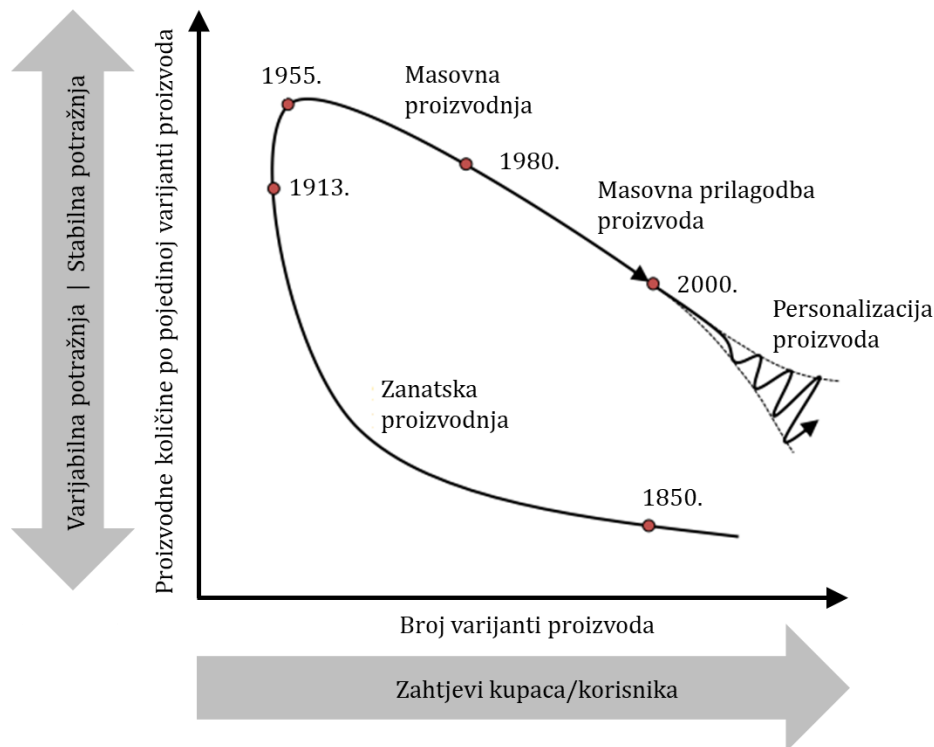
Slika 2.3 Vrijeme i ciklusi razvoja proizvoda i uvođenja proizvodnje [22]

Iz prikaza na slici 2.3 evidentna je potreba za odgovarajućim PS čiji je proizvodni kapacitet podesiv prema fluktuacijama potražnje za proizvodom i čija je funkcionalnost prilagodljiva novom proizvodu. Trenutačni PS nisu u stanju ispuniti ove zahtjeve koje diktira nova, konkurentna okolina.

2.2 Proizvodni sustavi i njihova evolucija

PS se može okarakterizirati kao konkretan sustav s potpuno definiranim vezama i proizvodnim tokovima između elemenata sustava, koji je umjetan, stvoren i organiziran ljudskim radom, s ciljem zadovoljenja ljudskih potreba. On je ujedno dinamičan, otvoren, neizoliran od utjecaja vanjskih sustava, posjedujući brojne veze sa svojim okruženjem u kojem se stanje mijenja tijekom vremena što ga ujedno čini i stohastičkim jer se njegovo ponašanje može predvidjeti samo s određenom vjerojatnošću uslijed zahtjeva potražnje.

ElMaraghy u svom radu [6] sažima razvojne faze PS koji su evoluirali od sustava radioničkih postrojenja (*eng. „job shops“*) koja imaju strojeve opće namjene, male proizvodne serije, veliku raznolikost te značajnu ljudsku angažiranost, do velikoserijskih proizvodnih linija koje su koristile namjenske proizvodni sustave (NPS) ili transfer linije, niskog stupnja raznolikosti, a pokretane ekonomijom obujma. U osamdesetim godinama 20-tog stoljeća uveden je koncept fleksibilne proizvodnje kao odgovor na potrebe masovne prilagodbe te većeg odaziva na promjene u proizvodima, tehnologiji proizvodnje i tržištima. FPS su također razvijeni za postavljanje proizvodnje srednjih do velikih serija i tipova proizvoda. U devedesetim godinama prošlog stoljeća, optimizacija, agilnost, smanjenje otpada, kvaliteta i vitka proizvodnja identificirani su kao ciljevi i ključni pokretači za osiguranje opstanka na globalno konkurentskom tržištu. Koncept RPS-a intenzivno se počinje razvijati zadnjih 15-tak godina kao pokušaj postizanja izmjenjive funkcionalnosti i skalabilnosti kapaciteta. Na ove zaključke nadovezao se je Koren [2] prikazujući dominante modele PS u ovisnosti o nastalim promjenama tržišta i društvenih potreba (slika 2.4).



Slika 2.4 Tržišne i društvene potrebe u usporedbi sa nastalim modelima proizvodnje [2]

Značajke pojedinog PS mogu se iskazati putem broja varijanti proizvoda iz jedne grupe proizvoda, putem vrste i prostornog rasporeda proizvodne opreme koja formira osnovni PS, putem oblika protoka izradaka kroz sustav, putem načina vođenja proizvodnje te način povezivanja komponenti unutar strukture sustava [21]. Sve te značajke utječu na primjenu određenih modela iskazanu kroz proizvodnost, opću fleksibilnost i upravljivost, stupanj automatizacije te ekonomičnost [24].

2.2.1 Namjenski proizvodni sustavi (NPS)

Karakteristike ovih sustava temelje se na relativno jeftinoj fiksnoj automatizaciji, a uglavnom proizvode ključne proizvode ili sastavne dijelove u velikim količinama kao što su primjerice, u automobilskoj industriji blok motora, glava motora ili bregasta osovina. Svaki namjenski proizvodni sustav namijenjen je proizvodnji samo jednog proizvoda ili vrlo uske grupe sličnih proizvoda, gdje promjene konstrukcijskih značajki i oblika nisu česte. Glavna karakteristika je velika krutost, s visokom razinom proizvodnosti koja se postiže simultanom obradom s više alata u zahvatu koji djeluju u više smjerova obrade na više proizvodnih stanica u lancu.

NPS zahtijevaju značajna kapitalna ulaganja. Kada su zahtjevi za obimom proizvodnje visoki, tada je sustav optimalno iskorišten, a cijena po proizvodu je niska. Isplativi su sve dok je potreba za proizvodima velika i dok je proizvodni sustav iskorišten u punom kapacitetu. U novim tržišnim uvjetima s velikim fluktuacijama u potrebnoj količini proizvoda i čestim izmjenama u konstrukciji izradaka, primjena ovog modela proizvodnog sustava nije ekonomična u smislu skalabilnosti proizvodnih kapaciteta.

2.2.2 Fleksibilni proizvodni sustavi (FPS)

Kao odgovor na krutost NPS, razvili su se FPS koji mogu proizvoditi različite grupe proizvoda, sličnih dimenzija, geometrijskih značajki i tolerancija, u promjenjivim količinama, takvi da se mogu proizvesti na istoj ili sličnoj proizvodnoj opremi. Ovaj model karakterizira numerički upravljivu strojnu opremu opće namjene, višeg cjenovnog razreda, te numerički upravljivu automatizaciju, što je vidljivo na slici 2.5. Zbog karakteristike obrade samo jednog alata u zahvatu, propusnost je znatno niža nego kod NPS te je sukladno tome niža produktivnost. Viša cijena opreme i manja propusnost u proizvodnji generira relativno višu proizvodnu cijenu.

Gradbeni elementi FPS su CNC strojevi (u obradnom sustavu) ili roboti (u montažnom sustavu ili automatskim linijama za zavarivanje) koji su opremljeni sofisticiranim upravljačkim sustavima i integriranim sustavom za manipulaciju koji prenose proizvode između strojeva ili jedinica za montažu. Uspješan rad cijelog FPS temeljen je na koordinaciji različitih proizvodnih operacija. Kako bi se operacije izvele u kratkom vremenu, CNC strojevi opremljeni su sa skladištem i izmjenjivačem reznih alata u svrhu izvođenja različitih operacija na izratku. Ako je skladište alata na stroju dovoljno veliko da sadrži sve alate za proizvodnju nekoliko skupina proizvoda, CNC stroj se može programirati za proizvodnju različitih varijacija proizvoda bez znatnijih investicija u PS. U obradnom sustavu izradak je centriran i stegnut na steznoj napravi čime se omogućuje prijenos izratka na slijedeću strojnu operaciju. Stezne naprave su konstruirane sukladno geometriji izratka tako da je omogućena pristupačnost reznog alata. Stezne naprave su stegnute na radnu paletu tako da je moguć transport između strojeva.



Slika 2.5 Izgled FPS za proizvodnju automobilskih dijelova malih serija [38]

2.2.3 Usporedba NPS i FPS

NPS temeljeni su na fiksnoj (ili tvrdoj) automatizaciji i proizvode jedan proizvod u vrlo velikim količinama. Mijenjanje bilo kojeg elementa u sustavu (npr. dodavanje nove operacije), zahtjeva mnogo zastoja i troškova u proizvodnji kako bi se proizvodna linija dovela u funkciju i optimalnu efikasnost. Rekonstrukcija proizvodne linije za novi proizvod može zahtijevati i puno više vremena gdje je linija potpuno neprofitabilna.

S druge strane, FPS se sastoji od CNC upravljivih strojeva i ostale programirane automatizacije koja je u mogućnosti izvoditi mnogo različitih operacija. FPS može proizvoditi različite proizvode unutar svojih prostornih gabarita na istom sustavu. Proizvodni kapaciteti su puno manji nego kod NPS-a te je za istu količinu proizvodnje početni trošak puno veći. Zajednički nazivnik oba PS je da koriste fiksni hardver. Praktična prednost NPS-a je veća propusnost nego što ima FPS. FPS sastavljen od CNC strojeva je puno skuplji i sporiji za proizvodnju iste količine proizvoda. To je uvjetovano i time što CNC strojevi koriste uglavnom jedan alat u zahvatu za razliku od NPS-a koji koristi više reznih alata u zahvatu (npr. obradna glave sa više različitih vretena). Dodatna prednost kod NPS-a je ta što se vrši obrada na više obradnih površina istovremeno. Usporedbe ovih PS dane su u tablici 2.1.

Potrebne radne vještine osoblja su različite kod oba PS. NPS zahtjeva operatere s poznavanjem osnovnih vještina dok korištenje CNC obradnih sustava zahtjeva od operatera puno veće vještine te poznavanje rada na računalnim sustavima (izrada upravljačkog programa, zamjenu istrošenih reznih alata u magazinu alata, izvođenje osnovnih zahvata održavanja i dijagnostiku, prepoznavanje informacija na ekranu, a to su prvenstveno problemi vezani uz zastoj stroja te njihovo uklanjanje) [2].

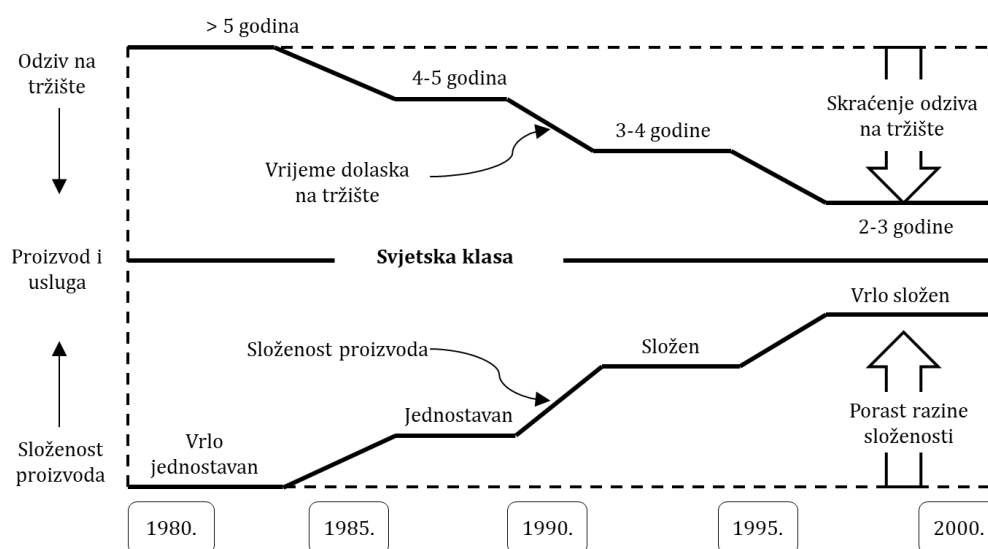
Tablica 2.1 Usporedba u ključnim elementima između NPS-a i FPS-a [2]

Namjenski proizvodni sustavi - NPS	Fleksibilni proizvodni sustavi - FPS
Ograničenja:	Ograničenja:
– Nefleksibilnost – samo za obradu jednog tipa proizvoda	– Veliki početni trošak
– Fiksni kapaciteti proizvodnje	– Sporost – obrada sa samo jednim alatom u zahvatu u jednoj jedinici vremena
Prednosti:	Prednosti:
– Jeftinija proizvodnja za obradu velikih količina proizvoda	– Konvertibilnost – sposobnost preusmjeravanja funkcionalnosti za veće grupe proizvoda
– Brzina i obrada sa više reznih alata u zahvatu	– Skalabilnost – promjenjivi kapacitet proizvodnje
Vještine operatera:	Vještine operatera:
– Osnovne	– Zahtijevaju poznavanje računalnih programa

Za razliku od namjenskih proizvodnih linija, CNC strojevi nisu projektirani oko određene grupe proizvoda, već se projektiraju i izrađuju po standardnom obrascu prije nego li su oblik i karakteristike proizvoda koji će se na njima obrađivati uopće poznati. Pošto proizvođači CNC strojeva ne znaju njihovu specifičnu primjenu u vrijeme kad ih projektiraju i proizvode, projektiraju CNC obradne strojeve na način da posjeduju što je moguće više ugrađene funkcionalnosti. Takve su ugrađene funkcionalnosti u praksi često nedovoljno iskorištene i doprinose ukupnim gubicima u investiranom kapitalu.

2.2.4 Rekonfigurabilni proizvodni sustavi (RPS)

Danas nova tržišta i kupci zahtijevaju proizvode veće kvalitete, personaliziranog izgleda, kraćeg vremena isporuke i nižih cijena. Evolucija proizvodnje u smislu vremena pojave na tržištu i složenosti proizvoda sažeto je prikazana na slici 2.6.

**Slika 2.6** Evolucija proizvodnje kroz prizmu složenosti proizvoda i pojave na tržištu [27]

Proizvodne tvrtke su, u skladu s takvim tržišnim zakonitostima, dužne nuditi više varijacija novih proizvoda u sve većem broju kako bi bile konkurentnije. Kao rezultat toga, vijek trajanja proizvoda postaje kraći, a struktura proizvoda postaje sve složenija. Dobar primjer je automobilska industrija gdje se raznolikost i složenost novih automobila višestruko povećava od "vrlo jednostavnog" do "vrlo složenog", dok se istodobno smanjilo vrijeme od konceptualnog dizajna do pojave na tržištu. Ova se evolucija dogodila i u drugim područjima kao što su računalna i softverska industrija. U svjetlu navedenih analiza namjenski i fleksibilni PS samo su djelomično dobro rješenje PS koji može biti konkurentan u takvim okolnostima. Strateški cilj tvrtki je pratiti zahtjeve tržišta koje se neprestano mijenja te prilagođavati PS brzim i troškovno učinkovitim promjenama karakteristika. To je moguće postići jedino povećanjem ili smanjenjem fizičke strukture sustava što je nemoguće postići tradicionalnim modelima PS [28]. Evolucijske vrijednosti proizvodnog okruženja, prikazane u tablici 2.2, podrazumijevaju da proizvodne tvrtke moraju biti spremne na promijene nesigurnih i često promjenjivih tržišnih uvjeta.

Tablica 2.2 Evolucija proizvodnog okruženja [27]

Tradicionalni	U nastajanju
– Stabilnost	– Agilnost (okretnost)
– Kvaliteta kao izvor kompetitivne prednosti	– Znanje i inovativnost kao izvor kompetitivne prednosti
– Fokus na kontinuirana poboljšanja	– Fokus na brzom reorganiziranju
– Lokalna konkurencija	– Globalna konkurencija
– Lokalno tržište	– Globalno tržište
– Zatvoren sustav	– Otvoren sustav
– Poslovanje kao pojedinačni entitet	– Integracija poslovanja i komunikacije
– Vrijednosti definirane na osnovi cijene i kvalitete	– Vrijednosti definirane na osnovi: brzine, zadovoljstva, personalizacije, cijene i kvalitete

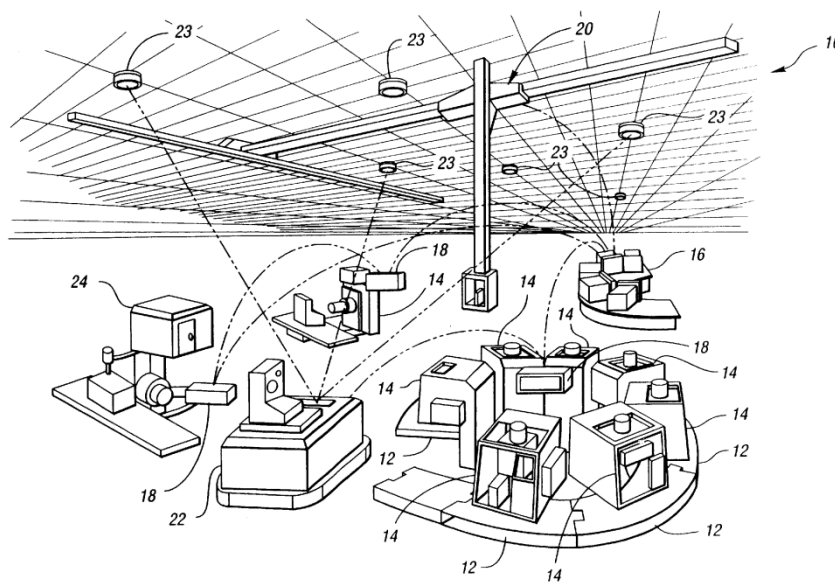
Niti jedan od tradicionalnih modela PS nemaju dobar odziv na takve vrste promjena. Iako FPS imaju dobar odziv na promjene proizvoda, oni nisu projektirani za strukturalne promjene i kao takvi ne mogu odgovoriti na nagle tržišne promjene niti na moguće duže pojave kvara u sustavu. Troškovno učinkovit odgovor na tržišne promjene zahtijevao je novi proizvodni pristup koji kombinira prednosti NPS-a i FPS-a, a koji je istovremeno sposoban reagirati na promjene brzo i učinkovito. Da bi postigli takav novi PS potrebno je, kako navodi Koren [22]:

- dizajnirati sustav i njegove strojeve prilagodljivom strukturom koja omogućuje skalabilnost proizvodnog sustava kako bi odgovorio na zahtjeve tržišta i prilagodljivost na nove proizvode. Struktura se može prilagoditi na razini sustava (npr. dodavanjem ili oduzimanjem stroja) i na razini stroja (promjenom konstrukcije stroja i kontrolnog računalnog programa, dodavanjem vretena i osi te promjenom magazina alata i integracijom naprednih kontrolnih upravljača),

- dizajnirati PS za grupe proizvoda s prilagodljivom fleksibilnošću,
- primijeniti sve značajke RPS na sustav u cjelini ali i na sve sastavne dijelove sustava.

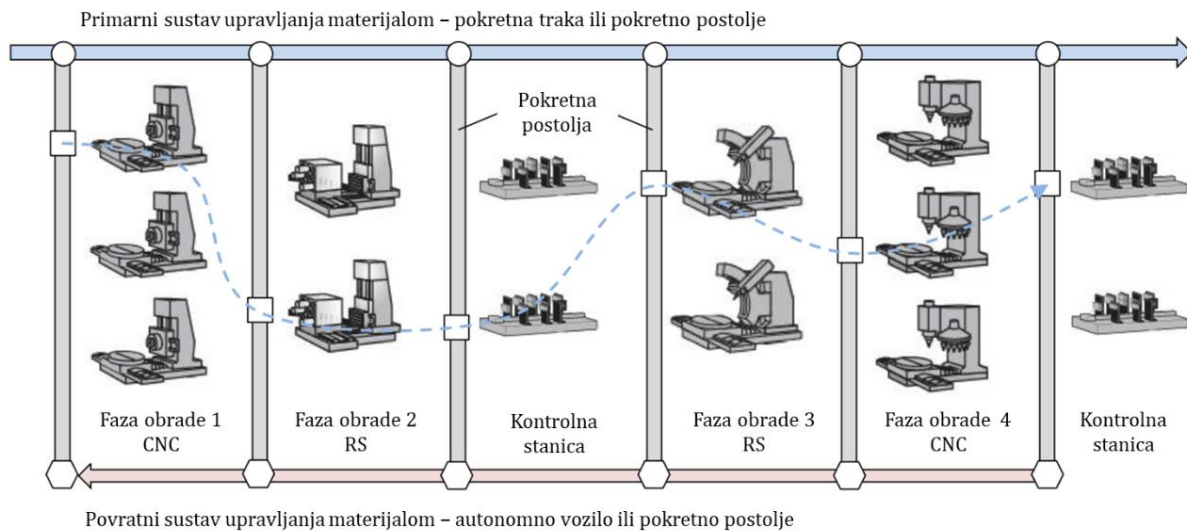
Tri su osnovna smjera koja definiraju razliku između dosadašnjih, tradicionalnih modela i novog modela RPS-a: kapacitet, funkcionalnost i trošak. Dok su namjenski i fleksibilni PS fiksni u kapacitetima i funkcionalnosti, u RPS oni su promjenjivi tijekom vremena kao reakcija sustava na posljedice promjenjivosti tržišta. Veličina investicije sustava u odnosu na planirani kapacitet. kod NPS ona je konstantna do maksimalnog planiranog kapacitetu, a kod povećanja potražnje za proizvodima, koji prelaze maksimalne kapacitete, potrebno nadograditi novi sustav koji će u većem dijelu vremena ostati neiskorišten. Kod FPS, sustav je skalabilan po konstantnoj stopi rasta (dodavanjem stroja u paralelu). Troškovi su u ovom slučaju intenzivni jer FPS koristi punu funkcionalnost za svaku stopu rasta. RPS je također skalabilan ali u ovisnosti o inicijalnoj konstrukciji i reakcijama tržišta. Reaktivnost sustava na brze izmjene u potrebama na tržištu osigurana je prilagodljivom strukturom, koja se podrazumijeva za grupa proizvoda.

Iz navedenih činjenica može se izvesti definicija modela RPS-a: sustav projektiran na način da je sposoban naglo promijeniti strukturu, kako mehaničkog tako i informatičkog sučelja, a u cilju brze promjene proizvodnih kapaciteta i funkcionalnosti unutar jedne grupe proizvoda kao odgovor na iznenadne promjene tržišta [28], (slika 2.7).



Slika 2.7 Prikaz koncepta preraspodjele resursa [43]

Rekonfiguracijom PS omogućiti će se dodavanje, uklanjanje ili modificiranje specifičnih karakteristika procesa, kontrole, upravljačke strukture ili strukture strojeva u cilju prilagodbe proizvodnih kapaciteta. Ovaj model PS bit će otvoren i pružit će prilagođenu fleksibilnost za grupa proizvoda, s ciljem poboljšanja, nadogradnje i ponovnog konfiguriranja (slika 2.8).



Slika 2.8 Skica RPS konfiguracije sa povratnim transportnim sustavom [20]

Koren i sur. [22] i ElMaraghy [6] u svojim radovima navode da u RPS, ukoliko iz početka nije projektiran na takav način, proces rekonfiguracije može biti dugotrajan, skup i nepraktičan. Međutim upotrebom novih razvojnih dostignuća na području informatike i PS kao što je nova paradigma Industrije 4.0, omogućeno je da se koncept rekonfigurabilnih strojeva i PS nadomjesti postojećim konceptima FPS uz adekvatnu automatizaciju i digitalnu povezanost.

2.3 Tehnološke karakteristike koje uvjetuju rekonfigurabilnost

Zajednički nazivnik za tradicionalne proizvodne sustave jesu njihovi fiksni strojni sklopovi (eng. *hardware*), u nastavku hardver i fiksna programska oprema (eng. *software*), u nastavku softver. Na primjer, može se mijenjati samo dio programa na CNC stroju ali ne i programska arhitektura kontrolnog algoritma. Zbog toga su takvi sustavi statički, a ne dinamički. Pojavom novih tehnologija – u programskoj opremi je to modularna otvorena arhitektura, kojoj je cilj omogućiti rekonfiguraciju upravljačkog sustava, a kod strojnih sklopova to su modularni strojevi koji su dizajnirani kao sinteza gibljivih modula – cilj je ponuditi više strojnih opcija. Takve tehnologije u nastajanju pokazuju trend u konstrukciji sustava s rekonfigurabilnom programskom opremom i rekonfigurabilnim strojnim sklopovima. Međutim niti takvi napredni elementi nisu dovoljan preduvjet za potpunu rekonfigurabilnost PS. Prema osnovnom konceptu RPS-a cilj je iskorištenje sistemskog pristupa u dizajnu PS koji omogućava simultanu rekonfiguraciju cijelog sustava, strojne i kontrolne programske opreme. Novi model RPS bi trebao stvoriti novu generaciju rekonfigurabilnih strojeva koji će omogućiti rekonfiguraciju za dostizanje cjenovno optimalne skalabilnosti.

Sa takvom konstrukcijom funkcionalnosti i proizvodnih kapaciteta PS nije više fiksna već je promjenjiva tijekom vremena kao odgovor na zahtjeve tržišta. Model RPS-a omogućuje fleksibilnost ne samo raznolikog strojnog parka nego i cijelog poslovnog sustava. I RPS i RS trebaju biti konstruirani i izrađeni korištenjem osnovnih hardverskih i softverskih modula koje je moguće brzo integrirati korištenjem određenog sučelja. Kako bi se ispunili zahtjevi otvorene, modularne strukture stroja, moduli i sučelja moraju biti specificirani na standardiziran način [2, 22].

2.4 Fleksibilnost i rekonfigurabilnost sustava

Može se primijetiti da postoji dovoljno zajedničkih temelja u konceptima i primjeni između reprezentativnih modela koji predviđaju da će budući RPS biti fleksibilniji. Neke od funkcija za podršku proizvodnji te inteligentni softveri, bit će neophodni elementi koji će postići učinkovitu rekonfiguraciju, a to su:

- softver koji može pomoći pri odabiru najbolje opreme (strojeva) na temelju njihovih mogućnosti, točnosti i fleksibilnosti te najboljih materijala, alata, rashladnog sredstva, koncepta stezanja koji će se koristiti za izradu bilo kojeg izratka iz grupe proizvoda,
- buduća programska podrška putem CAD/CAM softvera koji će prepoznati geometrijske oblike preuzete iz CAD datoteke klijenata i automatski generirati CNC programe koji će uključivati odgovarajuće brzine, posmake, odabir alata i pribora, te sekvencioniranje procesa i operacija,
- alati, stezni elementi, kontrolna oprema i zalihe koji se mogu automatski preuzeti iz automatiziranog skladišta za pohranu i preuzimanje (ASPP) (eng. *Automated Storage and Retrieval System, ASRS*) i uvesti u proces u odgovarajuće vrijeme,
- proces svakog kodiranog izratka može se automatski pratiti kroz različite faze proizvodnje, omogućujući proizvodnju i analizu troškova u svakoj fazi proizvodnje.

Proizvodni elementi bi stoga trebali ostati tijekom čitavog procesa prepoznati kako bi se učinkovito koristili najnoviji proizvodni hardveri i softveri (rekonfigurabilni alati) koji prate sadašnje procese i projiciraju buduća stanja u cilju izbjegavanja pretjerane kupnje.

2.4.1 Rekonfiguracija sa raspoloživom proizvodnom opremom

U strojogradnji još uvijek vrijede klasični mehanički koncepti potpomognuti senzorikom, sve naprednijim informatičkim sustavima, kako u upravljanju, tako i u povezivanju. Rekonfigurabilni strojevi bi trebali biti novi razvojni korak kao esencijalni činitelj RPS-a. Međutim, takvi strojevi trenutno još nisu dostupni te je tehnologija s takvom mogućnošću još uvijek u različitim stupnjevima razvoja. Postoje načini za postizanje potencijalnih prednosti preoblikovanja PS kako

bi korisnicima strojeva proizvodnja bila profitabilnija. Na primjer, moguće je rekonstruirati ne-rekonfigurabilne strojeve (NRS) (eng. *Non-reconfigurable machine tools*, NRMT) s alternativnim konfiguracijama i mogućnošću ponovne konfiguracije, pod uvjetom da se na takve strojeve dodaju određene značajke sustava kako bi se olakšala njihova implementacija. Takvu alternativnu konfiguraciju trebao bi se ukloniti i zamijeniti u jednoj smjeni, kada se određeni dio procesa obavlja izvan proizvodne linije. Takav strojni sustav bi bilo jednostavno implementirati po principu „uključi i proizvodi“ (eng. *plug and produce*), gdje sva proizvodna oprema dijeli zajedničku površinu i visinu, zajedničku specifikaciju temelja, zajedničko sučelje za manipuliranje materijalom i zajedničko sučelje za uklanjanje strugotine.

Ukratko, dok rekonfigurabilni strojevi i komponente predstavljaju važan građevni blok u bilo kojem RPS-u i omogućuju postizanje mnogih njegovih prednosti, zahtijevaju se mnoge poticajne tehnologije koje bi osigurale da RPS postane pristupačan u stvarnosti. U međuvremenu, pomoću prije navedenih koncepata, NRS koji koriste postojeću tehnologiju mogu se inteligentno koristiti kako bi se iskoristili značajni dijelovi predviđenih prednosti RPS-a.

2.4.2 Utjecaj promjenjivosti na fleksibilnost i rekonfigurabilnost PS-a

Koncept rekonfigurabilne proizvodne infrastrukture koja ima mogućnost promjene proizvodne opreme i rekonfiguracije sustava, definira se jednim općim pojmom, pojmom promjenjivosti [19]. Doboviček [24] i Wiendahl [69] zaključuju da tradicionalno korišten pojam fleksibilnosti nije preporučljivo primjenjivati na cijelu tvornicu te su klasificirali pojmove promjenjivosti kroz njezine pokretače i sposobnosti na hijerarhijskoj skali koja povezuje fleksibilnost i rekonfiguraciju. Važno je procijeniti stupanj promjenjivosti postojećih PS, s obzirom na neke prevladavajuće glavne trendove u industriji, uključujući:

- pomak od velikog broja varijacija prema prilagodbi mase,
- sve kraći životni vijek proizvoda,
- povećana važnost pouzdanosti isporuke u odnosu na vremensko razdoblje i iskoristivost,
- širenje procjepa između životnih ciklusa proizvoda, tehnologije i opreme,
- promjena lokacije PS nekoliko puta unutar životnog ciklusa proizvoda zbog globalizacije.

Stoga PS ne bi trebali imati samo sposobnost brzog preoblikovanja, zbog novih tehnologija i zahtjeva tržišta, već se od njih očekuje i prostorna prilagodba, pa čak i lokacije. Osim toga, od njih se očekuje i optimalna razina kvalitete u proizvodnji prilikom navedenih promjena. Unutarnji i/ili vanjski upravljački sustavi povezuju sve elemente u cjelinu diktirajući razine koje treba mijenjati (stroj, oprema, sustav, struktura, razina autonomije, površina ili mjesto na internetskoj mreži). Ta se promjena ne ograničava samo na tehničke sustave, nego je nužno proširiti i na organizaciju i zaposlenike kako bi se postigla odgovarajuća razina promjenjivosti. Stoga ovaj proces

transformacije postaje važan poslovni proces koji mora biti unaprijed planiran i uspješno vođen. Danas proizvođači strojeva i opreme provode interne transformacije kako bi razvili potencijal za promjenu unutar svojih sustava i kvantificirali postojeću razinu ili stupanj promjenjivosti. S druge strane, zahtjevi tržišta i vanjski čimbenici određuju nužne zahtjeve za promjenama i ciljani stupanj promjenjivosti. Ove unutarnje i vanjske čimbenike treba kontinuirano uspoređivati kako bi se postigla ravnoteža između tržišnih zahtjeva i proizvodnih performansi.

2.4.3 Fizička ("tvrda") i logička ("mekana") rekonfigurabilnost

Vrijedno je razmotriti različite tipove rekonfigurabilnosti PS, koji se mogu klasificirati i analizirati kao fizičke (tvrde) i logične (meke) metode RPS. Fizička rekonfigurabilnost uključuje rekonfigurabilnost: strojeva, operacija, procesa, miješanja proizvoda, rukovanja materijalom, kontrole u procesu proizvodnje, usmjeravanja i planiranja proizvodnje, te skalabilnost volumena. Skalabilnost kao jedna od komponenti rekonfigurabilnosti postiže se povećanjem (smanjenjem) kapaciteta kao i sposobnošću modifikacije hardvera (dodavanjem, oduzimanjem ili zamjenom), što predstavlja jednu od oblika fizičke rekonfiguracije prema trenutnoj definiciji RPS-a.

Logična rekonfigurabilnost podrazumijeva mogućnost preustroja koji se može primijeniti današnjom tehnologijom, s ili bez fizičke rekonfiguracije, kako bi se postigla veća fleksibilnost i agilnost. Na primjer, moguće je upotrebom senzora i sučelja te metodama prepoznavanja izvršiti prilagodbu procesa novom proizvodu iz grupe proizvoda bez potrebe za fizičkim promjenom konfiguracije uz uvjet da će stezna mjesta na izratku ostati ista [6].

Postupna implementacija hardverskih komponenti dodavanjem mehaničkih stupnjeva slobode (npr. četvrtu i petu os gibanja), glave strojeva i vretena, alata i magazina alata te indeksiranih stolova za stavljanje/skidanje izradaka, učinkoviti su načini izvršenja inkrementalne promjene u hardveru sustava prema potrebi. Proizvodna oprema koja ima mogućnost primjene više tehnologija (npr. tokarilice, glodalice, brusilice, 3D printeri, itd.) dobiva na popularnosti (prvenstveno primjenom aditivnih tehnologija). Ovi strojevi dolaze s minimalnim ili potpunim konfiguracijama, kao i mnogim kombiniranim konfiguracijama, a mogu se proširiti inkrementalno prema potrebama. Njihovi kontrolni sustavi su dizajnirani za rad s bilo kojom od ovih konfiguracija.

2.5 Ključne karakteristike RPS-a

RPS mora sadržavati sljedeće ključne karakteristike: prilagodljivost, konvertibilnost, skalabilnost, modularnost, integrabilnost i dijagnostibilnost, a treba biti izgrađen primjenjujući hardverske i softverske module koji se mogu brzo i pouzdano integrirati s namjenom da se postigne željena funkcionalnost. Prilagodljivost, skalabilnost, konvertibilnost, ključna su svojstva RPS-a. dok

modularnost, integrabilnost i dijagnostibilnost su dodatna svojstva koja omogućuju brzu rekonfiguraciju sustava ali ne garantiraju promjene u kapacitetu proizvodnje i funkcionalnosti sustava [65]. Ove karakteristike su primjenjive i za konstrukciju cijelog PS.

2.5.1 Prilagodljivost

Ova značajka u znatnoj mjeri razlikuje RPS-e od FPS i NPS, a omogućuje smanjenje troškova kako strojeva tako i cijelog PS. Svojstvo prilagodljivosti predstavlja sposobnost PS da proizvodi određen broj različitih izradaka. Takvo svojstvo se PS-u dodjeljuje pri njegovom projektiranju, a ovisi o veličini planirane grupe proizvoda jer većina proizvodnih resursa unutar sustava koristi se za proizvodnju svakog pojedinog proizvoda promatrane grupe. Prilagodljivost ima dva aspekta: prilagođenu fleksibilnost i prilagođenu kontrolu. Prilagođena fleksibilnost u RPS-u znači da dominantno svojstvo ili karakteristika jedne grupe proizvoda određuje ukupnu sposobnost konfiguracije sustava. To znači da su strojevi i oprema izrađeni s namjenom proizvodnje izradaka iz grupe proizvoda u cilju osiguranja potrebne fleksibilnosti i niske razine troškova. Nadalje, daje mogućnost korištenje alata s više vretena ili prilagodljive stezne naprave, čime se poboljšava produktivnost bez ugrožavanja fleksibilnosti. Prilagođena kontrola postiže se integriranjem kontrolnih modula koji sadrže dijagnostiku odgovarajućeg tipa za odabrani sustav i koriste se, npr. algoritme kompenzacije, metode kontrole diskretnih događaja, itd., istovremene za više značajki izradaka uz pomoć tehnologije otvorene arhitekture koja osigurava upravo potrebnu kontrolu funkcija dijagnostike [33]. Prednosti takve prilagodbe, jesu točnost i ponovljivost.

2.5.2 Konvertibilnost

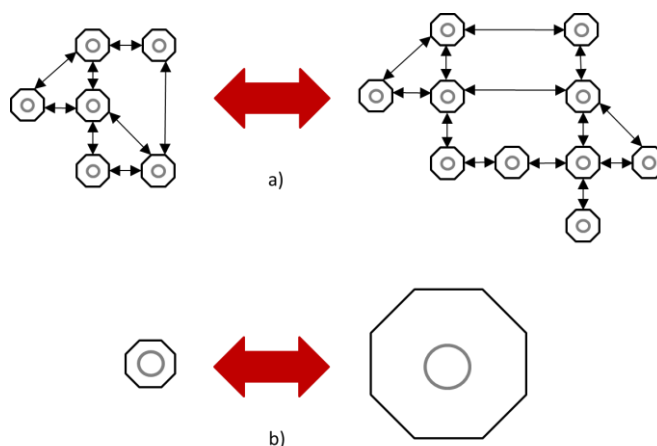
Svojstvo konvertibilnosti predstavlja sposobnost lake i brze adaptacije PS za proizvodnju nekog drugog proizvoda ili serije proizvoda iz postojeće grupe proizvoda. Konvertibilnost se može promatrati u nekoliko razina. Na razini strojeva, konverzija može biti potrebna prilikom završetka perioda proizvodnje jednog izratka i početka perioda proizvodnje drugog izratka iz iste grupe. Takva konverzija može zahtijevati promjenu alata (npr. od vretena s malim okretnim momentom i velikim brzinama za obradu izradaka iz aluminijskih legura do vretena s velikim okretnim momentom, malih brzina, za obradu izradaka iz titanijskih legura) ili promjenu određenog parametra procesa (ručno podešavanje pasivnih stupnjeva slobode, dijela programskog bloka ili stezne naprave) [26]. Konverzija na razini strojeva koja se izvodi na dnevnoj bazi mora biti brza i učinkovita (npr. do 10 min.). Kako bi se to postiglo, sustav mora sadržavati mehanizme koji omogućuju laku konverziju sustava između perioda proizvodnje dvaju proizvoda, kao i načine provjere koji omogućuju brzu kalibraciju strojeva nakon konverzije. Više razine konvertibilnosti mogu uključivati i dodavanje funkcija strojeva (npr. proširivanje veličine magazina reznih alata ili

dodavanje okretnog stola na troosnom CNC stroju) ili cijelog stroja u cilju povećanja raspona funkcionalnosti PS za proizvodnju novog proizvoda. Na razini PS [30] konvertibilnost uključuje tri elementa: stroj, strojnu konfiguraciju i elemente za manipulaciju.

2.5.3 Skalabilnost

Dok konvertibilnost predstavlja mogućnost transformacije funkcionalnosti postojećih PS, skalabilnost predstavlja sposobnost efektne i brze promjene kapaciteta, njihove preraspodjele unutar postojećeg PS ili zamjene proizvodne opreme (dodavanje/oduzimanje). Skalabilnost podrazumijeva i dodavanje vretena obradnom stroju kako bi se povećala produktivnost stroja ili dodavanje jednog stroja na jedan od segmenata PS čime se omogućuje povećanje proizvodnog kapaciteta cijelog sustava za određeni inkrement. Rekonfigurabilne konfiguracije PS imaju daleko veću skalabilnost od konfiguracija proizvodnih ćelija jer kod takvog oblika konfiguracija treba biti dodana cijela jedna linija da bi se povećao proizvodni kapacitet sustava. Kod konfiguracija RPS strojevi mogu biti dodani na bilo koji segment procesa bez ometanja drugih operacija kroz duži vremenski period. Skaliranje pojedine konfiguracije PS obično počinje na segmentima „uskog grla“ sustava kako bi se smanjilo ukupno vrijeme ciklusa proizvodnje. Ponovno rekonfiguriranje cijelog sustava nakon dodavanja stroja u sustav zahtjeva i promjene na drugim operacijama u vidu promjena tehnoloških postupaka, ujednačenosti vremena trajanja operacija i sl. Skalabilan PS je onaj koji ima sposobnost jednostavnog proširenja ili nadogradnje kada se za to javi potreba [7]. Pri tome se razlikuju dva principa skalabilnosti:

- I. princip: Nekoliko jednakih elemenata konfiguracije nekog sustava mogu biti povezani zajedno kako bi se osigurala skalabilnost sustava, slika 2.12 a),
- II. princip: Jedan element konfiguracije može povećati ili smanjiti svoje parametre kako bi pružio odgovarajuću skalabilnost, slika 2.12 b).



Slika 2.9 Prvi a) i drugi b) princip skalabilnosti [7]

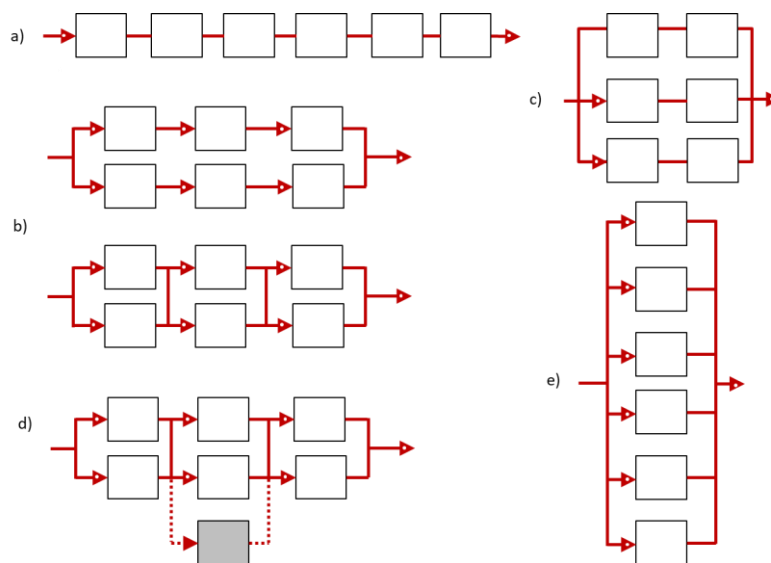
Ako se želi postići puna ekonomska učinkovitost primjene skalabilnosti tijekom cijelog životnog vijeka PS tada sustav po tim principima treba biti konstruiran u početnoj fazi projektiranja sustava jer su troškovi skalabilnosti najmanji. Skalabilnost se može mjeriti vrlo jednostavno mijenjanjem kapaciteta sustava prema izrazu (2.1) [31]:

$$S_s = \left(1 - \frac{k_i}{C}\right) \cdot 100\% \quad (2.1)$$

pri čemu je:

- S_s skalabilnost sustava,
- k_i najmanji inkrement kapaciteta,
- C postojeći proizvodni kapacitet.

Ako je minimalan prirast kapaciteta, kojim se propusnost sustava može prilagoditi kako bi zadovoljila novu potražnju na tržištu, mali, tada je sustav vrlo skalabilan. Na primjer, ako za serijsku liniju, na slici 2.10 a), treba povećati proizvodni kapacitet da bi zadovoljio veću potražnju na tržištu, potrebno je dodati novu proizvodnu liniju. Korak povećanja ove nove serijske linije udvostručuje proizvodni kapacitet sustava. Matematički, minimalni prirast dodavanja proizvodnih kapaciteta u serijskoj liniji je 100% sustava, tj. dodavanje cijele nove linije, što čini skalabilnost serijske linije 0%. Udvostručenje kapaciteta linije (kada dvostruki kapacitet nije stvarno potreban) bit će skupo jer ne postoji jamstvo da će se dodatni kapacitet ikada u potpunosti iskoristiti, pri čemu će rizik biti značajan financijski gubitak. Dakle, nula skalabilnosti znači da se, radi povećanja kapaciteta PS, cijela proizvodna linija mora udvostručiti. Kada je potražnja na tržištu nestalna, projektiranje PS s nula skalabilnosti nije dobro inženjersko rješenje [19].



Slika 2.10 Konfiguracije sa različitim postavkama skalabilnosti [7]

Izračuni skalabilnosti za ostale sustave na slici 2.10 pokazuju da konfiguracija b) ima skalabilnost od 50%, a konfiguracija c) u iznosu 66,7% (tj. dva stroja moraju biti dodani za povećanje kapaciteta). Konfiguracije d) i e) imaju skalabilnost od 83,4%, što je najviše moguće za konfiguracije s 6 strojeva. Minimalni prirast od 16,6%, u tim slučajevima jedan stroj, moguće je dodati za povećanje kapaciteta sustava. To je prikazano kao primjer u konfiguraciji 2.10 d), gdje je dodan stroj u drugoj fazi obrade. Konfiguracija prikazana na slici 2.10 c), sa sustavom obrade u dvije faze i s tri stroja po fazi obrade, može biti kompromis između razumne skalabilnosti i troška ulaganja. U tom slučaju, ako proizvod zahtijeva strojnu obradbu na gornjoj i bočnoj obradnoj površini, tri stroja u prvoj fazi mogu biti 3-osni vertikalni strojevi za operacije glodanja, a tri stroja u drugoj fazi mogu biti 3-osna horizontalna stroja za operacije bušenja. Uzimajući navedeni primjer, u paralelnom sustavu, svih šest strojeva na slici 2.10 e) moraju biti 5-osni CNC obradni centri što sustav čini puno skupljim jer takvi strojevi uobičajeno koriste velika skladišta alata koji sadrži sve alate potrebne za obradu cijelog izratka. U sustavu na slici 2.10 c) skalabilnost kapaciteta mora se provoditi u koracima od 33,3% dodavanjem jednog vertikalnog stroja i jednog horizontalnog stroja, umjesto u koracima od 16,6% kao kod paralelne konfiguracije. Općenito, najmanji koraci prilagodbe skalabilnosti mogu se postići samo kada je izvorni sustav čisto paralelan. Međutim, početni trošak paralelnog sustava je najviši od svih konfiguracija sustava. U konačnici može se vidjeti da su reaktivnost sustava u njegovoj konvertibilnosti i skalabilnosti ključni parametri PS te igraju važnu ulogu u pridobivanju konkurentske prednosti.

2.5.4 Modularnost

Sa sposobnošću razdvajanja PS i funkcija na operativne jedinice kojima se može manipulirati prema zahtjevima procesa i dinamike potražnje, postiže se optimalni raspored kako bi odgovarao određenom skupu potreba. U RPS, mnoge komponente su tipično modularne (bazni elementi, stolovi, osi gibanja, upravljači, kontrolne komponente, softver, alati) te se mogu zamijeniti ili nadograditi kako bi bolje odgovarale novim zahtjevima kad je to potrebno. Svojstvo modularnosti zasnovano je na ideji standardnih, unaprijed provjerenih jedinica sustava koji predstavljaju elemente sustava povezane standardiziranim sučeljem. Ovo svojstvo primjenjivo je na sve tehničke elemente tvornice (proizvodne sustave, građevinske objekte, instalacije te informatičke sustave) kao i na organizacijske strukture (funkcijske organizacijske jedinice). Moduli se lakše održavaju i ažuriraju, čime se smanjuju troškovi životnog ciklusa sustava. Temeljna pitanja pri dizajniranju s modularnim pristupom jesu:

- koji su odgovarajući građevni blokovi ili moduli?,
- kako bi trebali biti povezani da bi se sintetizirali u funkcionalnu cjelinu?

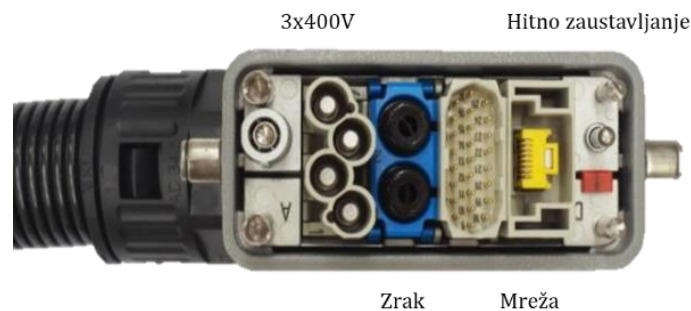
Izbor osnovnih modula i način na koji su povezani omogućuju stvaranje sustava koji se mogu jednostavno integrirati, dijagnosticirati i prilagoditi. Sustav se može standardizirati u onoj mjeri u kojoj se moduli mogu pojednostaviti i ekonomično proizvoditi s ciljem ponovnog korištenja [32]. Usvajanje modularnosti u proizvodnji može tvrtkama omogućiti dizajniranje procesa koji mogu brže reagirati na promjenjive tržišne potrebe te troškovno učinkovitije. Modularni sustavi mogu se prepoznati kada objedinjavaju tri osnovne karakteristike:

- podijeljeni su u diskretne module, od kojih je svaki skalabilan, primjenjivi u cijelom sustavu s mogućnošću ponovnog korištenja,
- koriste komponente koje su međusobno povezane modularnim sučeljem,
- sučelja su u skladu s priznatim industrijskim standardima.

Osim smanjenja troškova u implementaciji i radu te povećanju fleksibilnosti, modularnost također nudi prednosti u skaliranju i prilagodbi po načelu „prikluči i proizvodi“ (eng. *plug and produce*)⁴. Novi kompenzacijski i kalibracijski algoritmi mogu se jednostavno integrirati u upravljač stroja, što rezultira sustavom koji se kontinuirano razvija radi veće točnosti. Modularnost je uspješno primjenjiva u fazi konceptualnog dizajna kako bi se postigla skalabilnost rekonfiguriranjem funkcionalnih modula pomoću mješavine automatiziranih i ručnih operacija te spriječila prekomjerna investicija.

2.5.5 Integrabilnost

Integrabilnost je vitalna značajka RPS-a. Svojstvo integrabilnosti sustava predstavlja sposobnost lakog i brzog integriranja (trenutnih i budućih) komponenti i podsustava u ostatak sustava. Iako u svijetu postoji mnogo proizvođača strojeva i komponenti, samo mali dio ih je sposoban opskrbljivati potpuno integrirane fleksibilne sustave. Razlog tome je nedostatak metodologije integracije u sustav [26]. Kako bi se pomoglo boljoj integraciji komponenti u sustav potrebno je ustanoviti skup pravila i standarada za njihovu integraciju, koncept prikazan na slici 2.11.



Slika 2.11 Sustav standardiziranog priključka „prikluči i proizvodi“ [46]

⁴ Engleski marketinški naziv za hardversku opremu koja se može koristiti bez dodatnih podešavanja odmah nakon uključivanja u rad.

Takvi bi standardi u domeni proizvodne opreme trebali dozvoliti projektantima strojeva i komponenti da povežu grupe modula s njima pripadajućim funkcijama, omogućujući time integraciju stroja i čitavog proizvodnog sustava. Nadalje, upravljački dijelovi stroja također moraju biti dizajnirani za integraciju u sustav. Integrabilnost je postignuta kada svi strojevi u PS neprimjetno razmjenjuju informacije u stvarnom vremenu, uključujući njihov status putem informacijske mreže čime participiraju u poboljšanju učinkovitosti sustava.

2.5.6 Dijagnostibilnost

Svojstvo dijagnostibilnosti predstavlja brzinu identifikacije problema kvalitete i pouzdanosti PS. Dijagnostibilnost ima dva aspekta: otkrivanje kvarova stroja ili detektiranje ispada komponente te identifikaciju ishodišnog uzroka pogreške [26]. Identifikacija ishodišnih uzoraka pogreške je posebno važna iz razloga čestih promjena konfiguracija. Razvijaju se sustavne metode mjerenja koje olakšavaju prepoznavanje izvora problema kvalitete proizvoda u PS-u i njihovo ispravljanje korištenjem kontrolnih tehnologija, statistika i tehnika obrade signala.

Iskoristivost PS-a uvjetovana je pouzdanošću i održivosti svojih komponenata i njihove konfiguracije, uključujući uvjete u kojima sustav funkcionira. PS mora imati značajke koje osiguravaju da RPS ne ugrožava dostupnost i dijagnozu. Na primjer, mogućnost povećanja brzine vretena radi lakšeg procesa obrade može smanjiti životni vijek ležajeva vretena i učiniti ih nepouzdanim; stoga ležajevi u takvim primjenama moraju biti oblikovani na način da upravljački sustav može preračunati njihovu ubranu istrošenost. To je važan aspekt dijagnostibilnosti.

2.5.7 Utjecaj karakteristika RPS-a na ciljeve rekonfigurabilnosti

Na osnovu dosadašnjih saznanja može se između karakteristika i ciljeva sustava pokazati utjecaj rekonfigurabilnosti na povećanje reaktivnosti (prema zahtjevima tržišta) i produktivnosti te troškove u životnom ciklusu proizvodnje, kao što je prikazano u tablici 2.3. Konvertibilnost, modularnost, integrabilnost i dijagnostibilnost smanjuju vrijeme i troškove rekonfiguracije i time poboljšavaju odaziv sustava. Osim modularnosti, i preostalih pet karakteristika doprinose smanjenju troškova životnog ciklusa sustava, omogućujući mu promjenu oblika tijekom svog životnog vijeka u skladu s promjenama na tržištu, zahtjevima potrošača i razvoja novih tehnologija u proizvodnom procesu. Izgradnja modularnog sustava može biti skuplja zbog dodatnih troškova sučelja. Kada modularne komponente postanu proizvodi široke potrošnje, ekonomija obima na taj način može smanjiti ukupni trošak sustava.

Tablica 2.3 Karakteristike RPS-a koje podupiru produktivnost i smanjenje troškova [26]

RPS karakteristika	Vrijeme rekonfiguracije	Produktivnost	Trošak u životnom vijeku
Prilagodljivost Fleksibilnost ograničena na grupu proizvoda		✓	✓
Konvertibilnost Dizajnirano za promjene funkcionalnosti	✓	✓	✓
Skalabilnost Dizajnirano za promjene kapaciteta		✓	✓
Modularnost Komponente su modularne	✓		
Integrabilnost Sučelje za brzu integraciju	✓		✓
Dijagnostibilnost Projektiran za dijagnostiku	✓	✓	✓

Rekonfigurabilni hardver i softver trebaju biti dizajnirani za konvertibilnost i skalabilnost s točno potrebnom funkcionalnošću i kapacitetom, kada je to potrebno. Analizirajući odnos između šest osnovnih karakteristika RPS-a mogu se definirati dva dovoljna uvjeta za postojanje RPS-a:

- proizvodni sustav koji posjeduje karakteristike modularnosti i integrabilnosti ima visoku vjerojatnost da bude RPS,
- Karakteristike modularnosti, integrabilnosti i dijagnostibilnosti smanjuju vrijeme rekonfiguracije sustava i vrijeme proizvodnje do punih količina.

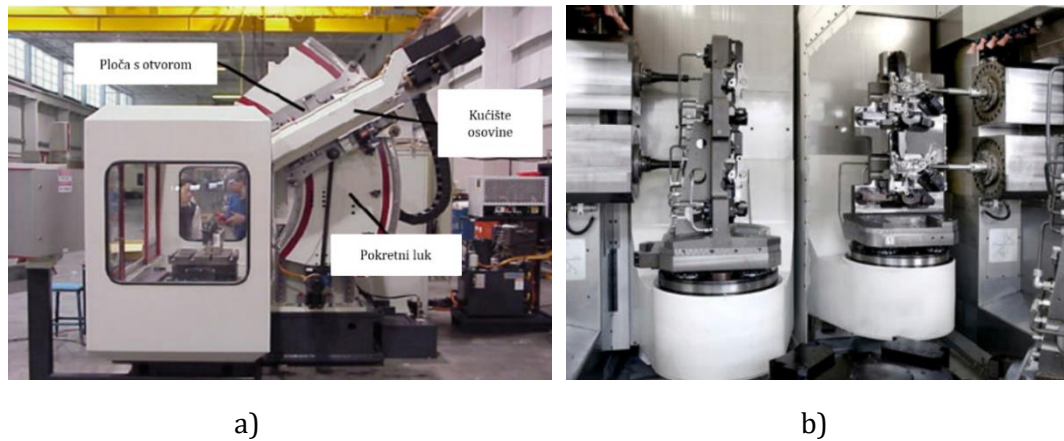
Zaključno, karakteristike prilagodljivosti, skalabilnosti i konvertibilnosti su najbitnije RPS značajke, a ostala tri - modularnost, integrabilnost i dijagnostibilnost - podržavaju karakteristike koje čine RPS učinkovit u smislu vremena rekonfiguracije.

2.6 Rekonfigurabilni stroj

Rekonfigurabilni stroj (RS) je stroj čija se struktura može promijeniti kako bi se osigurala ili alternativna funkcionalnost ili inkrementalno povećala stopa proizvodnje sa ciljem zadovoljenja zahtjeva za promjenama kao što je prikazano na slici 2.12. RS se može kontinuirano vraćati na prvobitno stanje funkcionalnosti ili modificirati kako bi pružio novu funkcionalnost ili proizvodni kapacitet prema potrebi, što znači da ima dva osnovna konstrukcijska svojstva [2]:

- prilagodba funkcionalnosti promjenom geometrije u cilju prilagodbe proizvodnje novom proizvodu iz grupe proizvoda (upravo potrebna funkcionalnost),
- povećanje stope proizvodnje dodavanjem strojnih dijelova (upravo potreban kapacitet).

Konstrukcijska rješenja su slikovito prikazani kroz dva primjera RS, prikazano na slici 2.12:



Slika 2.12 a) Prototipni RS (The Arch-type Reconfigurable Machine Tool (RMT)) [2]
 b) Viševretni obradni centar (www.directindustry.com/prod/riello-macchine-transfer)

- promjena funkcionalnosti RS na slici a) posjeduje dvije karakteristike: prilagodljivost (grupa proizvoda s površinama pod različitim kutovima), i konvertibilnost (brza izmjena kuta z osi),
- promjena kapaciteta RS na slici b) posjeduje karakteristike: modularnost (svako vreteno je modul), integrabilnost (omogućena brza mehaničko-električna integracija nosača vretena), prilagodljivost (fleksibilnost samo za horizontalno bušenje) i skalabilnost (dodavanje do četiri vretena).

RS su uvjetovani prvenstveno zbog novih paradigmi na tržištu te, u skladu s time, ekonomske opravdanosti. U fazi projektiranja PS, prema dinamici potražnje, trebalo bi razmisliti najprije o mogućnosti nabavke osnovnog CNC obradnog stroja (prilagođen za primjenu više vretena) s jednim vretenom te zatim, prema potrebi, dodavati vretena i istodobno obrađivati nekoliko izradaka, kada potražnja na tržištu opravdava ulaganje (podesivi kapacitet). Isto tako, umjesto da se ulaže u vrlo složene CNC obradne strojeve opće namjene, ekonomičnije je imati jednostavniji stroj s dovoljno funkcionalnosti za proizvodnju samo dijela grupe proizvoda bez kupnje puno dodatnih neiskorištenih funkcionalnosti (prilagodljiva funkcionalnost). Kupnja samo određenog kapaciteta i funkcionalnosti potrebnih za proizvodnju dijela grupe proizvoda, daje prednost RS u odnosu na ostale koncepte i modele strojeva. RS predstavljat će novu klasu strojeva koji premošćuje jaz između velike fleksibilnosti i visoke cijene potpuno fleksibilnih strojeva te niske fleksibilnosti i niske cijene potpuno namjenskih strojeva [39, 78]. Također, RS bit će dizajnirani za prilagođenu fleksibilnost, tj. fleksibilnost potrebnu za proizvodnju određene grupe proizvoda koji mogu izvršiti unaprijed dizajniran skup potrebnih operacija s velikom pouzdanošću, ponovljivošću i visokom produktivnošću. Ograničena, ali prilagođena fleksibilnost omogućuje smanjenje početnih troškova te brzu reakciju kada se mijenja redoslijed ili obim obrade (ili tip proizvoda), što ujedno predstavlja i ekonomsku korist.

2.6.1 Principi konstrukcije RS

U ovom radu se analiziraju samo takvi obradni sustavi, koji izvode procese tokarenja, glodanja, bušenja, urezivanja navoja i drugih postupaka obrade odvajanjem čestica, kao glavne procese obrade. Izazov je konstruirati optimalni rekonfigurabilni obradni sustav u smislu cijene, produktivnosti, kvalitete izrade i potrebnog vremena rekonfiguracije. Dijelovi takvog sustava su i rekonfigurabilne stezne naprave, rekonfigurabilni kontrolni strojevi (RKS) koji mogu biti ugrađeni unutar proizvodne linije te otvorena upravljačka arhitektura. Stroj se klasificira kao rekonfigurabilni ako njegova konstrukcija prati sljedeća načela [39, 40-45, 77]:

- dizajniran je oko određene grupe proizvoda, skup proizvoda sa sličnim karakteristikama,
- konstruiran je samo za prilagodljivu fleksibilnost (ograničenu količinom fleksibilnosti koja se odnosi na nekoliko specifičnih značajki definiranih konstrukcijom),
- konstruiran je za jednostavnu i brzu konvertibilnost što sugerira da konfiguracija treba biti oblikovana tako da omogući jednostavnu i brzu promjenu strojnih elemenata, brzo dodavanje ili uklanjanje elemenata te brzo postavljanje opreme u proizvodnu funkciju,
- konstruiran za skalabilnost: omogućuje dodavanje-uklanjanje elemenata koji povećavaju produktivnost ili učinkovitost rada. Osnovni konstrukcijski dizajn dopušta promjenjive konfiguracije kako bi se stroj postavio na različite lokacije duž proizvodne linije,
- dopušta rekonfiguraciju stroja na nekoliko mjesta duž proizvodne linije koja obavlja različite zadatke na različitim mjestima, koristeći istu osnovnu strukturu,
- koncipiran na osnovama modularnosti, korištenjem uobičajenih gradbenih blokova i zajedničkih sučelja. Standardna električna, mehanička, upravljačka i softverska sučelja trebaju omogućiti brzu integraciju zajedničkih elemenata ili gradbenih blokova koji su prethodno projektirani.

2.7 Odabir konfiguracije PS

Konstruktor PS mora definirati: konfiguraciju sustava tj. način na koji su strojevi uređeni i međusobno povezani u sustavu, opremu - broj i vrstu strojeva, sustav za rukovanje materijalom i ugrađenu kontrolnu opremu te način planiranja procesa - dodjeljivanje operacija svakom stroju u sustavu. Tip sustava treba pažljivo odrediti u fazi projektiranja jer jednom određen stvara velike troškove za željene promjene. Ovisno o poslovnim ciljevima, trebaju se, između ostaloga, razmotriti neka od ključnih mjerila izvedbe te im dodijeliti prioritete prilikom odabira konfiguracije sustava: trošak ulaganja, otpornost na kvarove i zastoje strojeva, brzina reaktivnosti na zahtjeve tržišta (tj. povećanje propusnosti kako bi odgovarala budućoj većoj (ili manjoj) potražnji).

2.7.1 Formiranje proizvodnih kapaciteta

Formiranje kapaciteta novog PS (ili nadogradnja postojećeg) s ciljem učinkovite prilagodbe tržišnoj potražnji, veliki je projektni izazov u okruženju budućih nepredvidljivih tržišnih promjena te ima presudnu važnost za profitabilnost tvornice u nadolazećem periodu. U osnovi sadrži karakteristiku skalabilnosti. Proizvodni kapacitet predstavlja maksimalni broj proizvoda koji PS može proizvesti u definiranom vremenskom periodu. Ako buduća potražnja postane niža od proizvodnog kapaciteta sustava, strojevi će biti neiskorišteni, što za posljedicu ima veći udio fiksnog troška i gubitak kapitala. Ako je buduća potražnja veća od proizvodnog kapaciteta, nastaju gubici u prilikama za prodaju što povlači za sobom gubitak tržišnog udjela. U tu svrhu razvijeni su različiti modeli s ciljem pomoći pri postavljanja optimalnih kapaciteta u fazi formiranja PS te potencijalne strategije proširenja kapaciteta za buduće tržišne uvjete:

- modeliranje proizvodnih kapaciteta koji koriste postojeće proizvodne modele (NPS i FPS), te njihovo kombiniranje sa RPS uz korištenje modernih manipulativnih sustava te sučelja koja omogućavaju brzu prilagodbu kapaciteta,
- korištenje i razvijanje algoritama (heurističke metode, Monte Carlo simulacijski model i sl.) koji imaju značajnu ulogu pri konstrukciji hibridnih proizvodnih sustava te modeliranja problema planiranja kapaciteta,
- modeliranje investicijskih i operativnih troškova rekonfiguracije koji uključuju trošak fizičkih kapaciteta kao i troškove povezane s procesom rekonfiguracije za određivanje optimalnih konfiguracija sustava u fazi projektiranja,
- modeliranje prilagodbe kapaciteta korištenjem stohastičkih metoda u pristupu kontroli povratne veze, gdje se kapacitet može dodati ili ukloniti iz sustava po jedinici troška.

2.7.2 Planiranje funkcionalnosti

Pod funkcionalnošću PS podrazumijeva se sposobnost promjene sustava ili prilagodbe novim karakteristikama proizvoda, u istu grupu proizvoda. Ovo načelo traži dizajniranje sustava s osnovnim karakteristikama konvertibilnosti te iskazuje promjene u procesu planiranja i postavljanja konfiguracije. Razvili su se matematički modeli za proučavanje koordinirane evolucije proizvoda, procesa i PS (eng. *co-evolution*) te formiranja optimalne strategije investiranja [9]:

- modeliranje mjera konvertibilnosti za PS,
- modeliranje problema višefazne obrade za optimalnu strategiju rekonfiguracije za sustav koji proizvodi dva i više proizvoda,
- matematičko modeliranje za proučavanje koordinirane evolucije proizvoda i PS,

- matematičko modeliranje kojim se analiziraju različite karakteristike rekonfiguracije (npr. vrijeme rekonfiguracije i razdoblje krivulje rasta proizvodnje do punih količina) koje utječu na konstrukciju PS.

Dolazi do izražaja sve veća primjena simultanog inženjeringa u ranoj fazi konstrukcije PS, gdje se proizvodi prilagođavaju proizvodnim procesima uz minimalne zahtjeve za korekcijom PS. Također se analizira omjer minimalnih ulaganja između NPS, FPS i RPS u cilju održavanja sustava konkurentnim s mogućnošću prilagodbe grupe proizvoda. Planiranje RPS-a ima ključnu ulogu prilikom razvoja pravila preustroja sustava jer je neophodno, ovisno o vremenskom intervalu u kojemu je potreban novouvedeni ili samorekonfigurabilan PS, prilagoditi ga dugoročnoj razini proizvodnje u smislu propusnosti i održavanja kvalitete proizvoda, kako bi se postigao održivi PS u dinamičnom tržišnom okruženju.

2.7.3 Održavanje kvalitete

Kritični element pri formiranju PS je osiguranje kvalitete proizvoda te je nužno optimalno ugraditi kontrole sustave (karakteristika dijagnostibilnosti). U proizvodnom procesu svaki stroj i alat ima određeno dimenzijsko odstupanje od nominalne vrijednosti te se ono akumulira kako se izradak kreće duž PS-a. U serijskim ili paralelno postavljenim serijskim linijama postoji samo jedna proizvodna putanja te je praćenje varijacija relativno jednostavno, a domet dimenzijskih odstupanja mali. Kod RPS-a broj mogućih proizvodnih putanja je velik. Uz pretpostavku da postoje faze obrade F i broj paralelnih strojeva u svakoj fazi obrade PA postoji matrica $[F \cdot PA]$ proizvodnih putanja. Takvo mnoštvo putanja uzrokuje dva problema:

- povećavaju se dimenzijske varijacije u kvaliteti izratka zbog raznolikosti putanja,
- u slučaju RPS-a, a zbog raznolikosti putanja, iznimno je teško pratiti neispravan stroj provjerom kvalitete gotovog proizvoda.

Na osnovu tih konstatacija važno je u PS ugraditi optimalni kontrolni sustav putem kontrolnih stanica direktno uključenih u proizvodni proces (eng. *in-line control systems*) čiji bi zadatak bio brzo pronaći uzrok odstupanja te prilagoditi sustav novim uvjetima (npr. izbor novog alata, poduzeti preventivno održavanje, uključiti rezervni kapacitet i sl.). Prilikom oblikovanja konfiguracije sustava, potrebno je definirati kritična mjesta ili lokacije gdje bi trebali biti instalirani RKS-i. Potrebno je u RPS-u osigurati manipulativne sustave i povratne transportere koji usmjeravaju izratke koji se trebaju doraditi ili koje treba izdvojiti kao neispravne. Optimiziranje broja i lokacija RKS-a važna je aktivnost koja se rješava matematičkim modelima jer s jedne strane smanjena učestalost kontrole smanjuje kapitalne troškove sustava, dok s druge strane povećanje broja kontrolnih stanica smanjuje broj izradaka loše kvalitete.

2.7.4 Formiranje grupe proizvoda

Kako bi se smanjili troškovi i poboljšala učinkovitost sustava proizvodi se grupiraju u grupe, od kojih svaka zahtijeva vlastitu konfiguraciju RPS sustava (karakteristika prilagodljivosti). Nakon što jedna grupa proizvoda prestane s proizvodnjom, sustav se preoblikuje kako bi započeo proizvodnje druge, morfološki slične, grupe proizvoda. Iz tog razloga, pronalaženje sličnosti između proizvoda i stvaranje odgovarajuće grupe proizvoda poboljšava učinkovitost sustava. Grupe proizvoda sastoje se od proizvoda koji dijele sličnosti. Da bi se formulirala grupa proizvoda, potrebno je uspostaviti model indeksa sličnosti. Tako su razvijeni slijedeći modeli:

- u svom radu Kimura i Nielsen [51], razvili su okvir za analizu odnosa između funkcionalnosti proizvoda (strukture) i proizvodnih resursa. Takav okvir donosi metodu dizajna koji ostvaruje traženu funkcionalnu raznolikost proizvoda uz učinkovito korištenje proizvodnih resursa,
- Abdi i Labib [14], predložili su novu "rekonfiguracijsku vezu" koja uključuje zadatke odabira grupe proizvoda u svakoj fazi konfiguracije. Koriste se analitički procesi (eng. *analytic hierarchy process, AHP*) uzimajući u obzir tržišne i proizvodne zahtjeve,
- model sličnosti među različitim proizvodima s obzirom na zahtjeve za proizvodom kao što su modularnost, kompatibilnost, ponovljivost i potražnja. Na temelju matrice sličnosti primijenjen je algoritam povezivanja klastera za formuliranje grupe proizvoda,
- model analitičkog mrežnog procesa (AMP) (eng. *Analytical network process, ANP*) [118] uključuje sve gore navedene odlučujuće čimbenike i glavne kriterije te elemente koji utječu na stvaranje i selekciju grupe proizvoda,
- na operativnoj razini proučavaju se problemi na razini operacija i rasporeda koji optimiziraju niz sekvenci u proizvodnji različitih proizvoda kako bi se poboljšala učinkovitost sustava.

2.7.5 Uravnoteženje RPS

Plan procesa specificira komponente i radnje (operacije, zahvate) potrebni za obradu izradaka u proizvod ili produkt. Proces planiranja u jednom RPS-u zahtijeva razmatranje više grupa proizvoda ili više generacija proizvoda u korelaciji s fazama obrade. I u ovom slučaju koriste se razni matematički modeli za formiranje rekonfigurabilnog plana procesa kako bi se smanjila vremena neaktivnosti proizvodnog sustava (GA, SMZ, itd.). Da bi sustav bio kontinuirano uravnotežen i time postignuta optimalna produktivnost, svaki put kad sustav mora proizvoditi novi proizvod, potreban je novi plan procesa. Operacije trebaju biti raspoređene među strojevima u skladu s postavljenim fazama obrade i dinamikom potražnje. Cilj je omogućiti postizanje ujednačenih vremena obrade za svaki stroj ili fazu obrade u sustavu kako bi PS bio uravnotežen

uz maksimalnu propusnost. U RPS okruženju razvijeni su različiti modeli i metode za formuliranje i rješavanje problema uravnoteženja linije kao što su u svom radu Wang i Koren [53] razvili algoritam za optimizaciju temeljen na GA koji istodobno određuje u kojoj fazi obrade se dodaju strojevi te kako rebalansirati modificirani sustav pomicanjem operacija unutar faza obrade kako bi se povećala propusnost. Razvijeni su i modeli koji rješavaju problem uravnoteženja linija u RPS s ciljem minimiziranja vremena postavljanja opreme upotrebom GA metode te modeli optimizacije koji putem cjelobrojnog programiranja definiraju kompromis između uvođenja nove opreme i ponovnog korištenja stare. U industrijskim okruženjima postoji nekoliko praktičnih ograničenja, a to su odnos prednosti redoslijeda operacija, usklađivanje kombinacija postojeće proizvodne opreme i novih RPS, minimalno vrijeme postavljanja opreme između dva konfiguracijska perioda, itd. Potrebno je razviti sustav kontrole koji omogućuje preraspodjelu operacija i balansiranje sustava u skladu s postojećim ograničenjima.

2.7.6 Učinkovito održavanje RPS

Na razini RPS-a, koncept održavanja treba postaviti tako da se zajedno povećava pouzdanost stroja i propusnost cijelog PS, za razliku od postojećih pristupa kojima je održavanje usredotočeno na pojedinačne strojeve. Donošenje odluka o održavanju na razini sustava je složeno iz sljedećih razloga [54-55]:

- postoje različite vrste politika održavanja (npr. kontrola, preventivno održavanje, korektivno održavanje), a sve se istodobno moraju rješavati na razini sustava,
- potrebno je integrirati više izvora podataka, od razine stroja (npr. tehnička ispravnost strojeva) do razine sustava (npr. planiranje održavanja na osnovi prediktivnih postavki, stanje alata i njihova dostupnost, dostupnost osoblja za održavanje, itd.).

Pravila održavanja u RPS-u trebaju biti usklađena s procesom rekonfiguracije. Zbog složenosti problema, većina pravila održavanja u RPS-u razvijena su pomoću simulacijskih algoritama:

- metodu rekonfigurabilnog vremenskog okvira održavanja da bi se u realnom vremenu rasporedilo oportunističko održavanje na razini sustava, čime se može brzo reagirati na različite procese rekonfiguracije u sustavu,
- uzimajući u obzir radni proces rekonstrukcije proizvodnih/operacijskih sustava, predložena je dinamička interaktivna metodologija (tj. stroj i sustav) održavanja kako bi se zadovoljile brze promjene tržišta.

Ova predložena načela više su isplative nego uobičajena načela preventivnog održavanja. Problem rješavanja održavanja u RPS sustavima još uvijek je nedovoljno istražen.

3 VIŠEPREDMETNI PROIZVODNI SUSTAVI

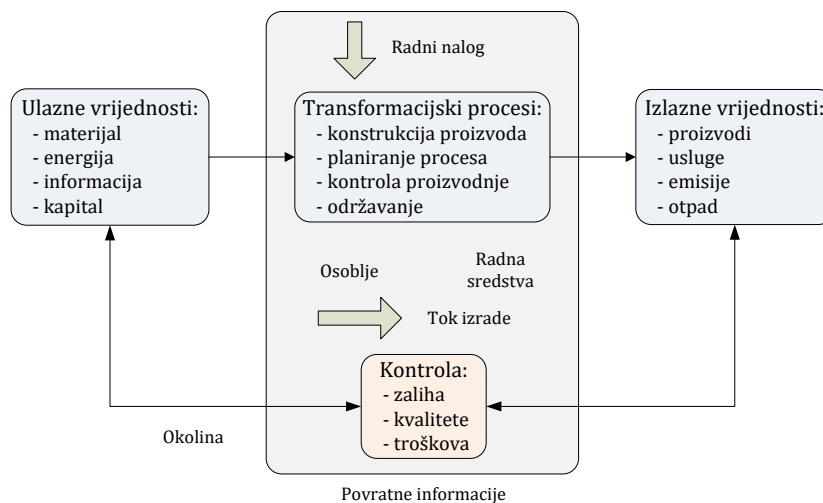
3.1 Definicija i značajke PS

Svaki tip organizirane proizvodnje u osnovi pokreće sustav koji predstavlja uređenu cjelinu, skup pojedinih proizvodnih dijelova organiziranih i održavanih kroz strukturu proizvodne organizacije. Sastoji se od podsustava i komponenti koji su u međusobnom odnosu i sinergijski djeluju u cilju ostvarenje određenog dobra. U literaturi se o ovoj temi uvode brojne definicije, korištenjem i klasificiranjem karakteristika PS [57-62, 64]:

- organizacijski oblik koji integrira grupu različitih funkcija kao podsustava neophodnih za realizaciju industrijske proizvodnje kao skup aktivnosti usmjerenih na fizičke promjene ulaznih repromaterijala u finalne proizvode,
- složena socijalna i materijalna tvorevina kojom se obnaša proces stvaranja vrijednosti – materijalnih i drugih dobara,
- aktivnost u kojoj se resursi, točno određenim redoslijedom, kombiniraju i transformiraju na kontrolirani način uz dodavanje vrijednosti sve do krajnjeg proizvoda,
- PS može se definirati kao kombinacija ljudi, strojeva i opreme koji su međusobno povezani preko protoka materijala i informacija,
- Predstavlja transformaciju sirovina ili komponenti u gotove proizvode,
- sustav namijenjen obradi (izradi) proizvoda u okviru kojeg se vrši pretvorba informacija i energije u gotov proizvod (izradak) posredstvom ljudi i radnih sredstava, a sastoji se od niza temeljnih modula.

U svojim doktorskim disertacijama Ljubetić [63] i Mikac [23] preciznijim pristupom pri određivanju pojma PS formuliraju temeljne module koje nazivaju osnovnim PS. Pod tim se podrazumijevaju sustavi namijenjeni kompletnoj obradi proizvoda (ili grupe proizvoda), u okviru kojeg se izvodi pretvorba informacija, materijala i energije u gotov proizvod, posredstvom ljudi i radnih sredstava određenih karakteristika i u okviru određene prostorne

strukture. Na slici 3.1 shematski je prikazan temeljni modul PS koji se sastoji od ulaznih veličina, proizvodnog (transformacijskog) procesa i izlaznih veličina te kontrole (povratne informacije). Vidljivo je da je PS otvoreni sustav jer na njega utječe okruženje u kojem se nalazi, koji kontinuirano mora održavati dinamičan odnos s okolinom koja je neophodna za PS i koja se neprestano mijenja. PS ima svoje unutarnje (financije, računovodstvo, marketing, ljudski resursi i dr.) i vanjsko (dobavljači, kupci, konkurencija, sindikati i dr.) okruženje. Između vanjskog i unutarnjeg okruženja poželjno je razviti optimalne odnose koji se postižu povratnim informacijama koje su nužne za kontrolu i poboljšanje učinkovitosti sustava.



Slika 3.1 Prikaz PS kroz tok izrade

Svaki osnovni PS prema ovoj postavci može biti zasnovan na samo jednom stroju (ili radnom mjestu) ili na grupi strojeva određenih karakteristika i određene prostorne strukture, koje zatim u fazi eksploatacije imaju značajan upliv na način odvijanja proizvodnog procesa. Tako definirani osnovni PS-i, različite unutarnje strukture, mogu biti povezani u nadređene više sustave tvoreći model integralnog PS, čije značajke u najvećoj mjeri ovise o značajkama pojedinih osnovnih PS. Takav PS može biti [66]:

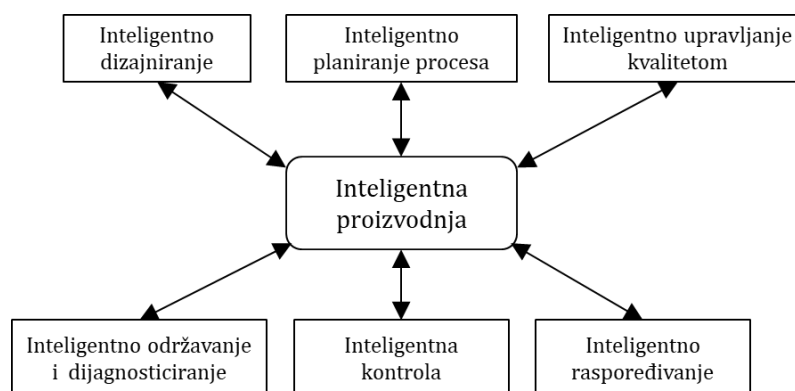
- konkretan sustav s potpuno definiranim vezama između elemenata sustava,
- dinamičan, jer se stanje sustava mijenja tijekom vremena,
- složen, jer se najčešće sastoji od više elemenata povezanih tokovima proizvodnje, od kojih svaki pojedinačno predstavlja složen zaseban podsustav,
- otvoren, neizoliran od utjecaja vanjskih sustava, posjedujući brojne veze sa svojim okruženjem,
- stohastičan, jer se ponašanje PS može predvidjeti samo s određenom vjerojatnošću prema zahtjevima tržišta,
- dio šireg poslovnog sustava, i to onaj dio u kome nastaje proizvod.

U novije vrijeme uvodi se pojam inteligentnog PS koji ima sposobnost samoregulacije i/ili samokontrole. To je integrirani koncept tvornica budućnosti gdje se proizvodi izrađuju u umjetnom životnom okruženju. Istraživački timovi koji rade na implementaciji ekspertnih sustava, stvaraju koncepte dodavanjem umjetne inteligencije. Takvi sustavi danas uključuju:

- dobivanje informacija o stanju sustava povezano u svjetsku mrežu podataka,
- sustave procjene vrijednosti, koji analizira informacije o stanju sustava iz okoline uključene u svjetski model, te generiraju alternativna rješenja temeljem tih analiza,
- podsustave koji generiraju ponašanja i procjenjuju alternative razvijene od strane sustava procjene vrijednosti te njihovim korištenjem definiraju ciljeve i planove,
- senzorski procesorski podsustav koji omogućuje komunikaciju i razmjenu informacija između svjetske mreže podataka, podsustava i izvršnih elemenata sustava, kao i između inteligentnog PS i njegovog okruženja.

Razvijanjem novih dinamičkih sustava te prihvaćanje heurističkih metoda kao globalne tehnike optimizacije složenih problema, doveli su do stvaranja inteligentnih PS kao izvediv koncept koji se može postići i na postojećim PS. Takvi sustavi mogu postati inteligentni praćenjem i kontrolom stanja proizvodne opreme, biti „pametni“ dodavanjem senzora za praćenje i kontrolu stanja proizvoda koji se obrađuje ili biti inteligentno redizajnirani za proizvodnju dijelova željene kvalitete bez potrebe za prepoznavanjem i kontrolom procesa.

Inteligentni PS koriste tehnologiju i računalne modele koji mogu umanjiti uporabu ljudskog mozga ili rutine čime umanjuju rizik mogućih nepoželjnih ishoda te omogućuju projektiranje postupaka koji kombiniraju proizvodnju više tipova proizvoda u skladu sa zahtjevima tržišta i osiguravaju prioritete u proizvodnji. Takav sustav postaje samoregulirajući, što je prikazano na slici 3.2, vršeći kontrolu proizvodne operacije automatskim mehanizmom povratnog hoda, prati rad proizvodne opreme i osigurava informacije za prediktivno održavanje, prati stanje izratka duž cijelog procesa proizvodnje te u slučaju odstupanja vrši automatsku korekciju postavki.



Slika 3.2 Komponente inteligentnog proizvodnog sustava

Tijekom proizvodnje sustav uči i stvara nove inteligentne procese kako bi se proizveli proizvodi željene kvalitete bez potrebe za njihovim vizualnim prepoznavanjem (i time ručnim podešavanjem) i naknadnom kontrolom procesa.

PS sastavljeni su od više podsustava koji su u interakciji i aktivni tijekom proizvodnje. Mogu se izdvojiti glavni podsustavi [67]:

- obradni (u interakciji između izradaka, opreme i alata),
- transportni (transportna i logistička oprema, manipulacija, skladištenje),
- prostorni (proizvodni, pomoćni, skladišni, saobraćajni),
- energetske (energetski izvori, mreže),
- informacijski sustav (baza, oprema, podrška),
- sustav radnog osoblja (režijski, proizvodni i pomoćni radnici, rukovodioci),
- sustav organizacije (makro i mikro organizacija).

3.2 Osnovni modeli višepredmetnih PS

3.2.1 Definicija modela

Pod modelom PS podrazumijevaju se takvi PS na kojima se može na optimalan način proizvoditi određeni asortiman izradaka pri stalnim proizvodnim uvjetima. Mogu biti vrlo različiti, određujući vremensku i prostornu značajku odvijanja proizvodnog procesa putem povezivanja proizvodne opreme u jednu zaokruženu cjelinu, uz podršku informatičke tehnologije [60].

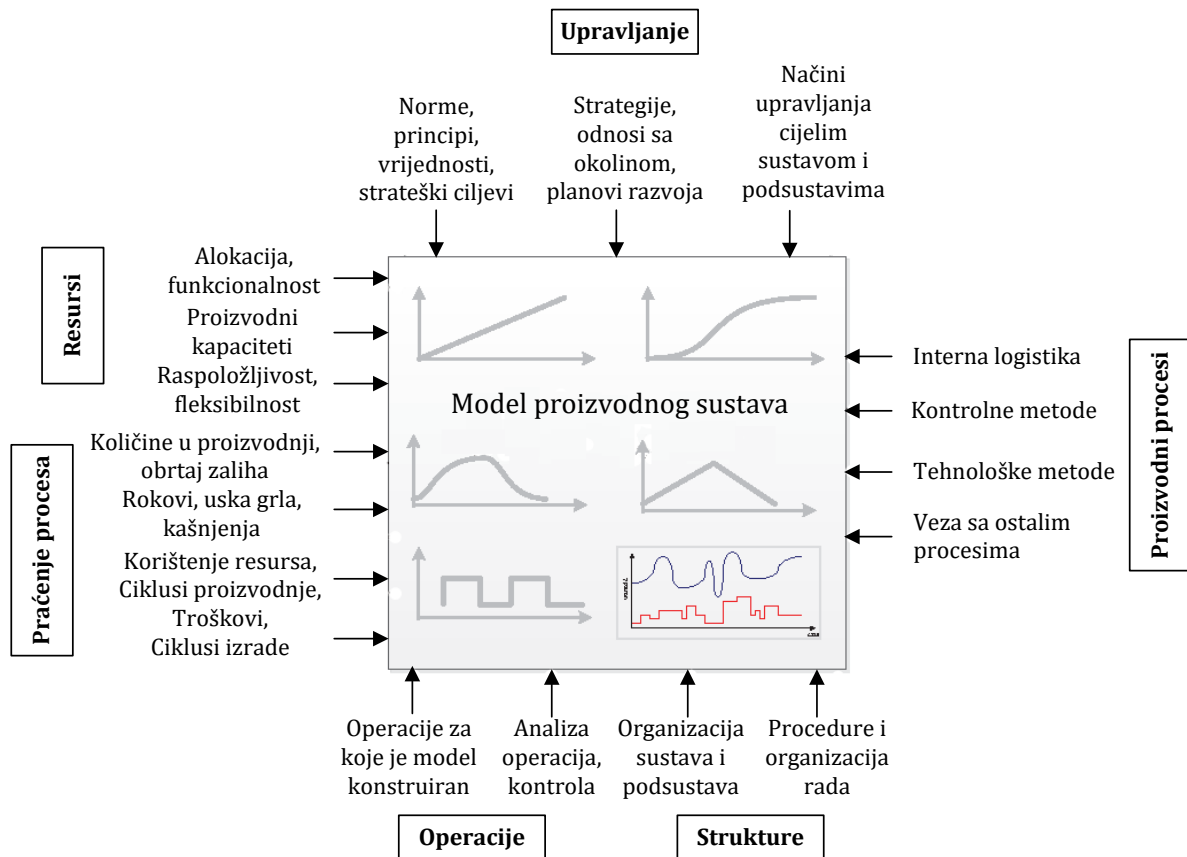
Različitost zahtjeva, koji se postavljaju pred PS i potreba da se tim zahtjevima što potpunije udovolji, dovodi do formiranja osnovnih PS specifičnih konfiguracija i karakteristika. Ovo je naročito izraženo kod višepredmetnih PS, s vrlo različitim značajkama u spektru koji je znatno bogatiji od onog pri jednopredmetnim PS. Svaki PS je na različite načine ovisan o cijelom nizu čimbenika među kojima su, prema [63] i [23], najznačajniji prostorna i vremenska značajka odvijanja proizvodnog procesa koje ujedno određuju proizvodnu, transportnu i upravljačku opremu namijenjenu kompletnoj obradi jednog ili grupe izradaka.

Pojavom prvih proizvodnih struktura i njihovom sistematizacijom na osnovi pojedinih karakteristika iskazanih kroz asortiman obrađivanog proizvodnog programa, značajki odabrane proizvodne opreme i njenim prostornim rasporedom te propusnom moći, definicijom proizvodnog toka i iskorištenja sustava, prevladavale su opće klasifikacije temeljene na prostornom rasporedu radnih mjesta i protoku materijala. Kompletnije podjele proizlaze iz osnova uvjeta odvijanja procesa te obuhvaćaju [64]:

- pojedinačni raspored (obrada se vrši na pojedinačnom stroju),
- linijski raspored (obrada se vrši za jedan ili više izradaka pri čemu svaki stroj obavlja jednu operaciju (ili klaster operacija) uz neprekidan progresivan tok materijala),
- grupe strojeva po svrsi (za obradu grupe izradaka s varijabilnim hodogramom),
- raspored strojeva po vrsti (radionički raspored za obradu izradaka s različitim hodogramom).

Svaki od definiranih modela postavlja drugačiji okvir i preduvjete koji utječu na proizvodni ciklus, produktivnost, efikasnost i troškove. Razvojem tehnologija, a prvenstveno informatičkih i komunikacijskih, formiraju se novi oblici i modeli PS koje karakterizira veći udio automatizacije, te naposljetku i autonomije u odnosu na udio ljudskog (fizičkog) rada. Na osnovi tih činjenica, razvijaju se nove proizvodne strukture temeljene na NC i CNC strojevima koji su počeli dominirati u višepredmetnim PS krajem 70-tih godina prošlog stoljeća. Tako nastaju fleksibilne proizvodne ćelije (FPC) i FPS koje obuhvaćaju CNC obradni centar, spremnik alata, autonomni manipulacijski sustav za izratke i alate te kontrolno-mjerni sustav. Započinje primjene senzora za nadzor nad stanjem alata te sustavi koji povezuju više istih ili različitih CNC strojeva sa zajedničkim direktnim upravljačkim sustavom (DNU) i integriranim pomoćnim procesima, a kako bi se ostvarila proizvodnja grupe različitih izradaka. Iz ovih definicija vidljive su suštinski drugačije karakteristike novih proizvodnih struktura u odnosu na konvencionalne osnovne PS. Stupanj automatizacije, vrsta primijenjenih strojeva te način njihovog informatičkog povezivanja uz novu organizaciju transporta i dinamiku potražnje (količine i udjeli tipova proizvoda), omogućuju suptilnije podjele unutar proizvodnih struktura temeljenih na fleksibilnoj automatizaciji te njihovo modeliranje, kao što je prikazano na slici 3.3.

Uz spomenute proizvodne strukture, uvodi se pojam fleksibilnih proizvodnih linija s usmjerenim tijekom obrade za koju je karakteristična visoka iskoristivost proizvodne opreme. Nadalje, PS se mogu dijeliti prema vremenu izvršenja operacija tj. na proizvodne linije koje imaju različita vremena operacija i NPS, odnosno transfer linije, gdje su operacije vremenski povezane (karakterizira ih taktno vrijeme operacija). Pri tome su za svaki od modela linija moguće fiksne, ali i fleksibilne varijante koje podrazumijevaju obradu više različitih izradaka na CNC opremi standardne ili specijalne konstrukcije na kojoj se mogu izvoditi jedna ili više operacija [64]. Fleksibilni sustavi se mogu i detaljnije dijeliti s aspekta primijenjenosti proizvodne opreme gdje je moguća podjela na univerzalne i specijalne (namjenske) fleksibilne sustave, a kod vezivanja više sustava uz druge fleksibilne strukture u jednu cjelinu uvodi se pojam fleksibilnih otočnih segmenata i fleksibilnih mreža.



Slika 3.3 Modeliranje PS

Daljnijim razvojem tehnoloških i proizvodnih modela u posljednjih 15-tak godina razvija se koncept RPS u pokušaju postizanja promjenjive funkcionalnosti i skalabilnosti kapaciteta [22, 68]. Predlaže se model PS u kojemu se dodaju, uklanjaju ili zamjenjuju dijelovi stroja, strojevi, ćelije ili jedinice za manipulaciju kako bi se brže reagiralo na promjenjive zahtjeve tržišta. Zagovornici ovog pristupa [6, 22, 49] vjeruju da PS takvih karakteristika imaju potencijal ponuditi dugoročno jeftinije rješenje, u odnosu na NPS i FPS, na način da se može produžiti životni vijek i povećati iskoristivost PS. Rekonfiguracija hardvera također zahtijeva velike promjene u programskoj opremi – softveru koji se koristi za kontrolu pojedinih strojnih jedinica, kompletnih ćelija i sustava, kao i za planiranje i kontrolu pojedinačnih procesa i same proizvodnje. Sve to pridonosi rastućoj složenosti proizvodne opreme, procesa i PS.

Svaki model ima određene značajke, koje se mogu formalizirati kao opće i konceptijske, te se svaki višepredmetni PS može formirati uzimajući u obzir slijedeće čimbenike:

- proizvodni program (asortiman, obim) i dinamika proizvodnje,
- proizvodna oprema, definirana na osnovi konstrukcije i načina gradnje, prema konceptu konfiguracije i utrošku pripremo završnih vremena (t_{pz}) te produktivnosti,
- struktura modela koju karakteriziraju pojedinačni proizvodni kapaciteti gdje je $i=1$ i PS gdje je $i=1, 2, \dots, I$

- prostorni raspored temelji se na jednorodnom, dvorednom rasporedu te rasporedu po vrsti opreme. Hodogram obrade (prikaz kretanja izratka kroz proces) uglavnom je jednosmjernan i dvosmjernan dok koeficijent korelacije koji prikazuje odnos između redosljeda operacija i proizvodne opreme može biti homogen i nehomogen [71]. Za RPS karakterističan je promjenjivi prostorni raspored u ovisnosti o dinamici potražnje.
- protok materijala može biti tekući linijski ili fleksibilni gdje pojedini proizvodni kapaciteti mogu obrađivati više različitih tehnoloških operacija, a prijelaz s jedne na drugu tehnološku operaciju izvodi se bez t_{pz} .
- propusna moć ili propusnost – brzina kojom se proizvod kreće kroz proizvodni proces i označava prosječan broj proizvedenih proizvoda u jedinici vremena (eng. *throughput*) je kod višepredmetnih PS definirana dvjema karakteristikama: brojem operacija na jednom proizvodnom kapacitetu i uskim grlom. Kod rekonfigurabilnih višepredmetnih PS, propusnost ima veliki značaj zbog velikih dinamičkih oscilacija u zahtjevima potražnje i postavljenih proizvodnih kapaciteta na osnovama RPS-a,
- iskorištenje sustava koje podrazumijeva ukupni stupanj iskorištenja svih proizvodnih kapaciteta sadržanih u PS [64] gdje postoje tehnički i ekonomski stupanj iskorištenja.

3.2.2 Osnovni modeli višepredmetnih PS

Višepredmetni PS čine osnovu proizvodnih kapaciteta većeg dijela poduzeća metaloprerađivačke industrije. Činjenica je da se proizvodnja najvećeg dijela proizvodnje realizira u uvjetima srednje serijske ili maloserijske proizvodnje, kod kojih ne postoje tehničko-ekonomski uvjeti za formiranje jednopredmetnih PS. Pri tome se u okviru jednog PS obrađuju različiti dijelovi, koji imaju određen, veći ili manji nivo tehnološke sličnosti. Razvoj tržišnih zahtjeva ide u smislu smanjenja količina istovrsnih proizvoda u skladu s tendencijom smanjenja životnog vijeka i povećanja broja varijanti proizvoda te sve češćih inovacija proizvoda, što ukazuje na sve veću zastupljenost i značaj višepredmetnih PS. Zbog stalne težnje za smanjenjem troškova proizvodnje, uz rad s minimalnim količinama proizvoda u skladištima, postavlja se zahtjev da se u proizvodnju lansiraju sve manje količine, kako bi se osigurao što ravnomjerniji dotok pojedinih vrsta proizvoda na montažu ili kao konačni proizvod. Također treba očekivati, da će promjene strukture proizvodnog programa u toku korištenja PS uzrokovati planirane i neplanirane promjene ukupnih količina [56, 63]. Kod odabira PS bitne su sljedeće značajke (varijable):

- značajke ovisne o tržištu,
- značajke ovisne o proizvodnom programu,
- značajke ovisne o materijalnim i finansijskim sredstvima.

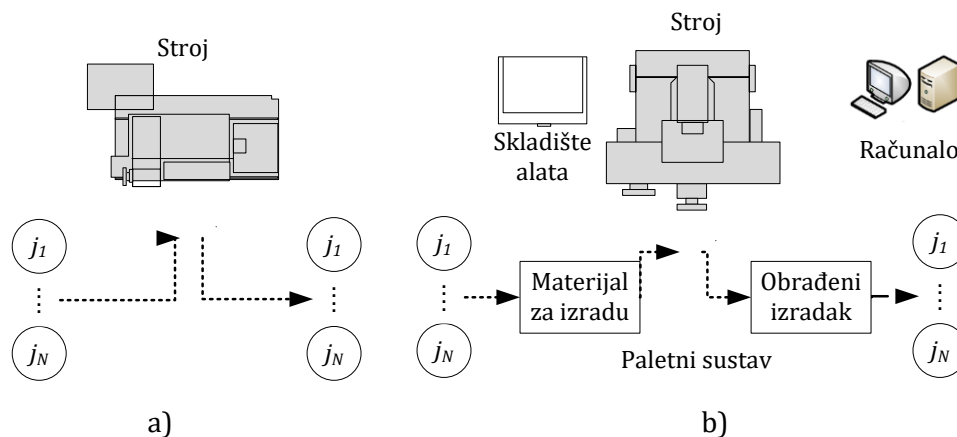
Gore navedene zahtjeve moguće je ostvariti na PS-u koji ima traženi nivo fleksibilnosti, koji postiže određenu produktivnost, ekonomičnost i rentabilnost te sigurno postiže propisanu kvalitetu uz visoki stupanj pouzdanosti. Različiti rezultati formiranja PS za pojedini konkretni slučaj ovisit će o broju i karakteristikama izradaka, opremi različitih karakteristika, financijskim sredstvima većeg ili manjeg iznosa te zahtjevima tržišta u vidu priznavanja određene uporabne vrijednosti proizvoda. Stoga će kao rezultat postavljenog modela biti formirani PS na bazi različitih tehnoloških rješenja, koja karakteriziraju tehnološki proces, kao i različiti tokovi materijala, koji kompletiraju strukturu PS-a kao cjeline, a važan utjecaj ima i odgovarajući tok informacija. Takva rješenja mogu se opet sistematizirati u određeni broj modela, polazeći pri tome od definicije osnovnog PS. Polazeći od strukture osnovnog PS, razlikuju se sljedeći proizvodni modeli obrade višepredmetnih PS, Te se može identificirati nekoliko pojava oblika:

- pojedinačni proizvodni kapacitet - PPK,
- raspored strojeva prema vrsti opreme - RPV,
- raspored strojeva sličnog redoslijeda - SSR,
- višepredmetni linijski sustav - VLS,
- fleksibilni proizvodni sustav - FPS,
- rekonfigurabilna proizvodni sustav - RPS,

Svaki od navedenih modela se bitno razlikuje po svojim značajkama, području primjene i rezultatima koje ostvaruje, uz isto tako različiti utjecaj na PS kao cjelinu. Isto tako utjecaj okruženja nije isti kod svakog modela.

3.2.2.1 Pojedinačni proizvodni kapacitet (PPK)

Kako i sam naziv ukazuje, u pojedinim slučajevima moguće je uspostaviti tehnološki proces koji se realizira u okviru jednog autonomnog radnog mjesta što ovisi o konfiguraciji i karakteristikama izratka te o značajkama opreme, kao što je prikazano na slici 3.4.

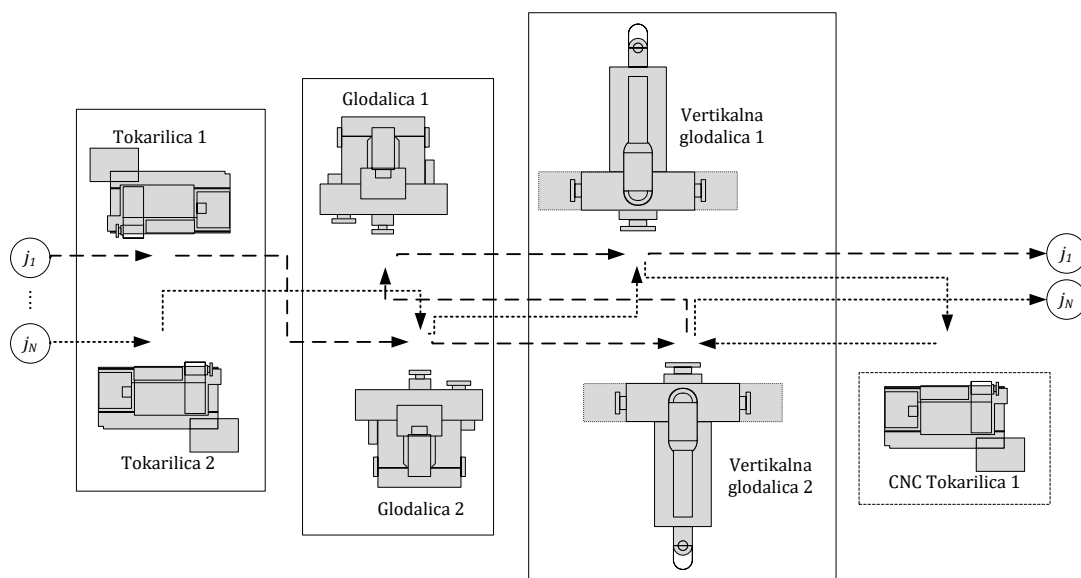


Slika 3.4 Hodogram obrade kod: a) pojedinačnog proizvodnog kapaciteta, b) fleksibilne ćelije

Kod takvih sustava, organizacija tehnološkog procesa je maksimalno pojednostavljena s jednostavnim tokovima materijala i informacija. Ukupan ciklus obrade je obično kratak, bez međuoperacijskog transporta. Fleksibilnost na promjenu geometrije i količine je visoka kao i efikasnost i upravljivost procesa, a iskorištenje proizvodne opreme je vrlo dobro. Kod čestih izmjena proizvoda ili kod izvođenja više operacija na istom izratku, povećanje ciklusa obrade može biti značajno. U novije vrijeme, na području razvoja strojne opreme i korištenjem CNC strojeva, položaj modela pojedinačnog rasporeda se značajno poboljšao prihvaćanjem vrlo kompleksnih obrada na različitim izradcima.

3.2.2.2 Raspored strojeva prema vrsti opreme (RPV)

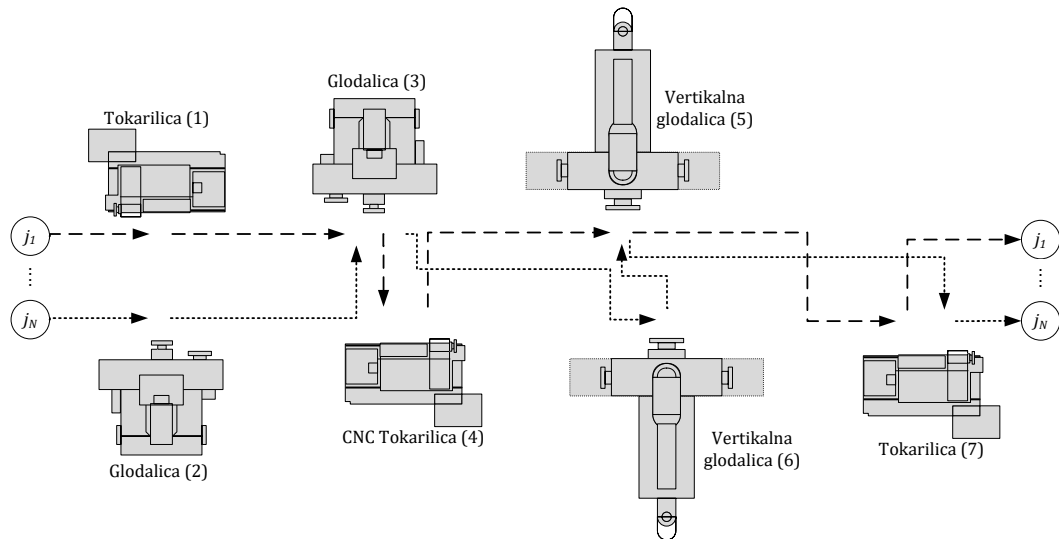
Ovaj model predstavlja oblik PS koji se temelji na razmještanju proizvodne opreme u radionicama prema vrsti opreme, unutar kojih su pojedini strojevi obično raspoređeni po veličini ili tipu obrade te prema ostalim karakteristikama, kao što je prikazano na slici 3.5. Takvi sustavi namijenjeni su proizvodnji širokog asortimana različitih dijelova u manjim količinama ($Q < 100$ izradaka). Karakterizira ga osnovni nedostatak, a to je raznovrstan i kompliciran hodogram obrade, ovisan o redosljedu operacija. Što je veći broj različitih izradaka koji se obrađuju u okviru sustava i što su lansirane količine manje, veća je složenost logistike i raspodjele, manja preglednost i dulji ciklusi proizvodnje. Ovakav model karakteriziraju PS za izradu prototipova, alatnice, tvornice za proizvodnju strojeva i slično te su ujedno i najstariji oblik višepredmetnih PS. Dugoročno gledano opstanak takvog sustava bit će zamijenjen sa sustavima veće efikasnosti ili nadograđen „pametnim“ transportnim rješenjima koji će omogućiti veću produktivnost.



Slika 3.5 Hodogram obrade kod modela rasporeda strojeva prema vrsti opreme

3.2.2.3 Raspored strojeva sličnog redoslijeda (SSR)

Kod ovog modela PS prostorni raspored radnih mjesta prilagođen je toku materijala grupe izradaka određene tehnološke sličnosti koji imaju različite tokove materijala pri vođenju procesa. Zahtjev na takav raspored omogućiti će jednostavnije tokove većeg broja izradaka, koji se obrađuju u okviru grupe. Protok materijala kroz proces je znatno jednostavniji od prethodnog modela, kao što je prikazano na slici 3.6.



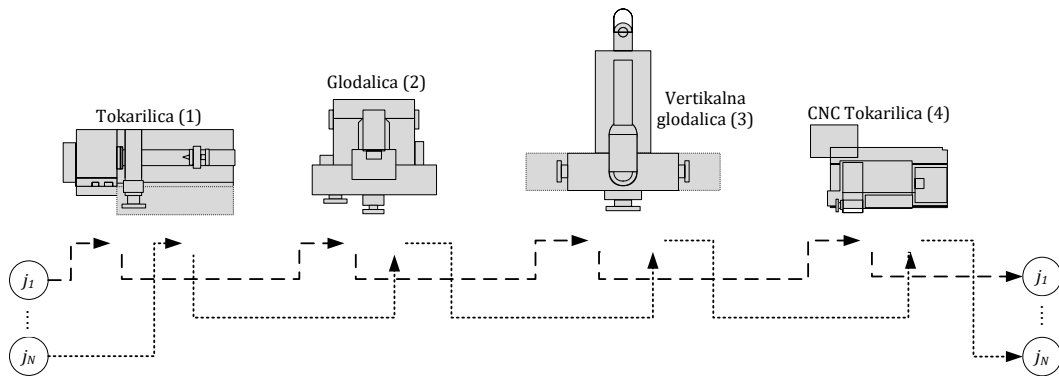
Slika 3.6 Hodogram obrade kod modela strojeva sličnog redoslijeda

Pojednostavljenim hodogramom obrade stvoreni su uvjeti za postizanje znatno kraćeg ciklusa obrade, a bitno se smanjuju i vremena transporta, međuoperacijskih čekanja te zastoja [48]. Kod takvog modela PS, transportni putevi i ciklusi obrade su u pravilu relativno kratki, a dozvoljeni su i hodovi unatrag. Razmještaj radnih mjesta približno odgovara redoslijedu operacija što osigurava relativno dobru efikasnost i upravljivost procesa pa su i uvjeti za postizanje kvalitete relativno dobri. Nedostaci su u smanjenoj fleksibilnosti na promjenu geometrije i količine ovisno o karakteristikama proizvodne opreme te u umanjenoj iskoristivosti opreme kada se istovremeno odvija veći broj tehnoloških procesa i kada su prisutne različite putanje kretanja pojedinih izradaka.

3.2.2.4 Višepredmetni linijski sustav (VLS)

Kod grupe izradaka za koju postoji visoka tehnološka sličnost u dovoljno velikim količinama za svaki izradak ostvaruju se preduvjeti za formiranje modela VLS. Visoka tehnološka sličnost podrazumijeva mogućnost uspostavljanja tehnoloških procesa za pojedine izratke uz progresivan tok materijala po strogo određenoj putanji. To znači da se na istim radnim mjestima izvode slične operacije na raznim izradcima uz mogućnost, da kod proizvodnje pojedinih izradaka pojedina radna mjesta nisu u funkciji. Razmještaj radnih mjesta u skladu je s redoslijedom operacija dok je

kretanje materijala jednosmjerno uz čvrsti hodogram obrade unutar linije [23]. Logistička vremena unutar sustava, kao i vremena ciklusa i vremena čekanja, poprimaju minimalne vrijednosti zbog visoke organizacije toka materijala. Karakteristična je vrlo dobra upravljivost i efikasnost takvog PS, kratak ciklus proizvodnje i dobru iskoristivost opreme, a tehnološka rješenja pojedinih operacija imaju znatno izraženiji utjecaj na ciklus obrade (slika 3.7). Nedostatak se očituje samo u smanjenoj fleksibilnosti kod promjene geometrije i količina što ovisi o karakteristikama korištene opreme.



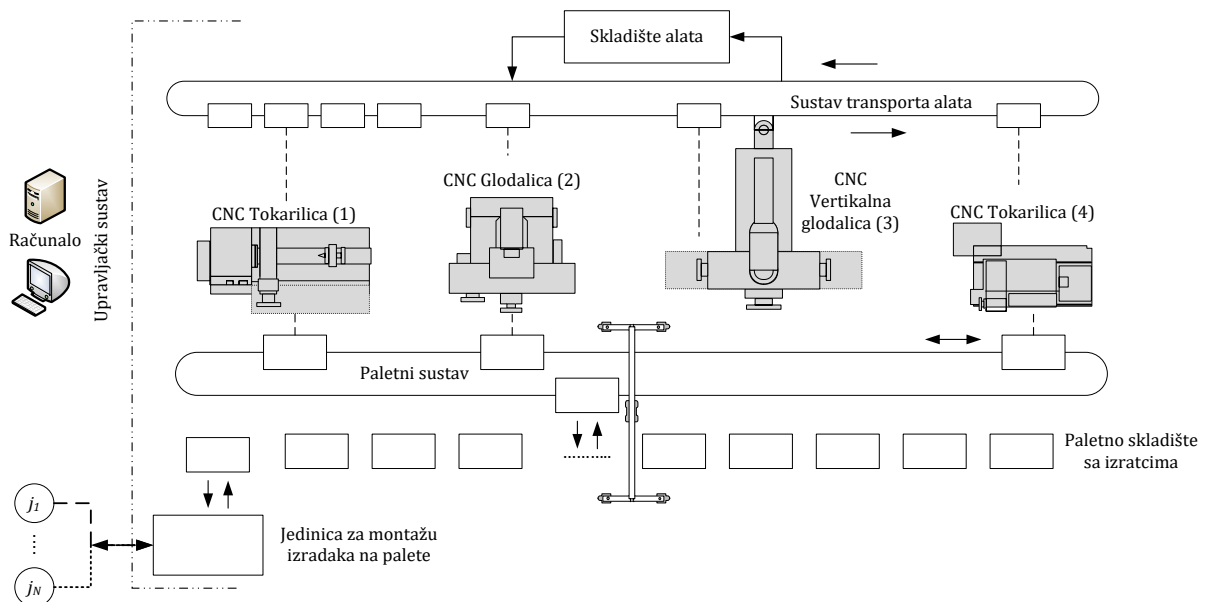
Slika 3.7 Hodogram obrade kod modela višepredmetnog linijskog sustava

Karakteristika ovog modela PS upućuje na zaključak [62], da je višepredmetn linija u stvari specijalni slučaj grupnog rasporeda prema svrsi.

3.2.2.5 *Fleksibilni proizvodni sustav (FPS)*

Ovaj model sustava obuhvaća skup proizvodne opreme, povezanih upravljačkim i transportnim sustavima, na kojem se istovremeno vrši automatska obrada različitih operacija na grupi različitih izradaka različitih razina kompleksnosti. Vodeće računalo koordinira odvijanje procesa, kao i za pokretanje sustava potrebnu logistiku. Glavna značajke FPS jesu da se različiti izradci mogu istovremeno obrađivati na raznim strojevima. Sustavom su obuhvaćeni i prateći pomoćni procesi (skladištenje, transport, rukovanje, pranje, ...) [25]. U cilju odvijanja procesa, upravljački podaci iz računala predaju se procesu, a podaci o procesu neophodni za njegovo praćenje dostavljaju se računalu radi obrade i donošenja upravljačkih naredbi u realnom vremenu. FPS namijenjen je proizvodnji određenog spektra izradaka i za izvođenje određenih vrsta obrada što znači da u konkretnom slučaju ima i sasvim određenu strukturu. Tehnološki proces proizvodnje pojedinog izratka temelji se na maksimalno integriranim operacijama, što osigurava kompletnu obradu na minimalnom broju strojeva. Obradni sustav FPS čini numerički upravljana proizvodna oprema, pri čemu su CNC obradni centri u prosjeku najzastupljenija vrsta strojeva [63]. Transportni sustavi mogu biti izvedeni na razne načine pri čemu veličina sustava igra važnu ulogu. Najučestaliji su transportni sustavi zasnovani na kolicima sa šinama za sustave s manjim brojem

strojeva te induktivno vođena vozila kod većih sustava (slika 3.8). Usko vezan sa sustavom toka materijala je i sustav radnih naprava, odnosno steznih pribora. Dok su kod valjkastih izradaka u primjeni redovito stezne glave s čeljustima prilagođenim pojedinoj vrsti izradaka, kod prizmatičnih kompleksnih izradaka u primjeni su radne naprave vezane na palete i prilagođene formi pojedinog izratka.

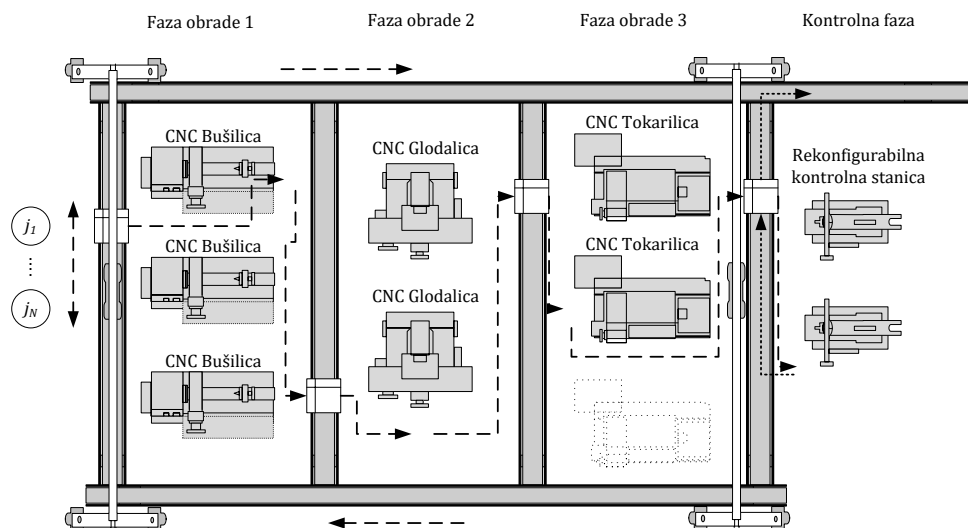


Slika 3.8 Hodogram obrade kod FPS

Sastavni dio ovog sustava su i skladišta izradaka, kao i skladišta alata sa stanicom za prednamještanje alata. Upravljanje sustavom obuhvaća u osnovi upravljanje nalogima, upravljanje CNC programima, raspoređivanje pojedinih operacija na pojedine strojeve, upravljanje odvijanja procesa, prihvaćanje podataka o procesu i donošenje odluke o promjeni stroja za izvođenje operacija u slučaju zastoja. Ovaj model proizvodnog sustava osigurava kratke cikluse obrade te fleksibilnost na promjenu geometrije i količina. Kao i kod fleksibilnih ćelija moguće je povremeno odvijanje procesa bez nadzora poslužioca tj. smanjeni nadzor. Upravljanje računalom i optimiziranje parametara u realnom vremenu osigurava vrlo dobru iskoristivost opreme. Što je razina složenosti i upravljanja viša potrebna su i veća znanja u segmentu programiranja i izrade algoritama, nadzora i održavanja procesa što predstavlja zahtjev za visoko kvalificiranim i odgovornim osobljem. Navedene karakteristike ukazuju na prednosti ovog modela prvenstveno kod proizvodnje srednjih i velikih serija uz stabilnu dinamiku potražnje. Po svojim karakteristikama i zastupljenosti ovog modela danas čini ključni element fleksibilne integrirane proizvodnje. Izrazito visoka upravljivost, efikasnost, pouzdanost, kratak ciklus obrade i fleksibilnost prednosti su koje treba platiti kroz povećane zahtjeve za radnim osobljem i pripremu proizvodnje te kroz visoku cijenu sustava.

3.2.2.6 Rekonfigurabilni proizvodni sustav (RPS)

Razvojem novih tržišnih prilika koje karakterizira dinamična potražnja za proizvodima, javlja se potreba za formiranjem odgovarajućih PS gdje RPS (slika 3.9) obećava prilagođenu fleksibilnosti na zahtjev u kratkom vremenu, dok postojeći FPS omogućuju opću fleksibilnost dizajniranu za očekivane varijacije, građeni na osnovi pretpostavke o potrebama u proizvodnom procesu.



Slika 3.9 Hodogram obrade kod RPS

Promjenjiva proizvodna okolina i agresivna konkurencija na globalnoj razini kao i brze promjene u tehnološkim procesima zahtijevaju pozornost s aspekta produljenja životnog vijeka PS i jednostavnost integriranja novih tehnologija u funkciju sustava. Ovakav sustav koristi modularnu opremu s ciljem ostvarivanja potrebne funkcionalnosti sustava za proizvodnju grupe proizvoda. Prednosti i nedostaci primjene RPS-a jesu:

- prilagodljiva fleksibilnost kroz skalabilnost i rekonfigurabilnost,
- manje ukupno vrijeme za implementaciju novog sustava i rekonfiguraciju postojećeg,
- brza proizvodna modifikacija i integracija novih tehnologija i funkcija u postojeće sustave, korištenjem osnovnih procesnih modula (hardvera i softvera),
- automatsko odvijanje proizvodnog procesa,
- kontrola otvorene arhitekture (rekonfigurabilni softver) i modularni strojevi (rekonfigurabilni hardver) ključne su tehnologije za RPS,
- opći uvjeti za postizanje kvalitete su vrlo visoki,
- efikasnost proizvodnog sustava i iskoristivost opreme je vrlo visoka,
- vrlo visoki zahtjevi u tehnološkoj pripremi proizvodnje,
- visoki zahtjevi za sustav osiguranja i snabdijevanja alatima, steznim napravama,

- visoki zahtjevi na kvalifikacije i odgovornost osoblja, koje vrši poslove pripreme, nadzora i održavanja sustava.

PS nove generacije trebat će nove i učinkovite alate za prilagodbu učestalim promjenama novih proizvoda i kratkim ciklusima uhodavanja proizvodnje bez ozbiljnog narušavanja postojeće proizvodnje. Jedan od temelja za uvođenje RPS je uvjerenje da postoji određena veća ekonomska korist, uslijed povećanja potražnje ponovnim korištenjem opreme ili uslijed smanjenja potražnje reduciranjem viška kapaciteta i/ili viška funkcionalnosti, nego što je prisutno kod drugih PS.

3.3 Odnosi između fleksibilnosti i rekonfigurabilnosti

Rekonfigurabilna proizvodnja je nova paradigma PS koja ima za cilj postizanje ekonomičnih i brzih promjena projektiranjem PS za grupu proizvoda i s posebnim značajkama za olakšavanje rekonfiguracije. Grupa proizvoda je također preduvjet za postavljanje uspješnog RPS, budući da se oslanjaju na ekonomiju opsega postignutu kapitaliziranjem u sličnosti geometrije i/ili obrade, ponekad primjenom grupne tehnologije. Nove tehnologije koje omogućuju stvaranje RPS i neke od njegovih glavnih gradbenih blokova kao što su rekonfigurabilni strojevi još uvijek su u domeni razvoja. Intenzivna je suradnja znanstvene zajednice i prakse u stvaranju standarada koji su potrebni za modularnost, promjenjivost i jednostavnu integraciju. Takvi standardi osiguravaju preduvjete koji su neophodni za komunikaciju između tehnologa koji razvijaju PS i dobavljača opreme. Na osnovi postavljenih standarada FPS pronalaze se rješenja i modeli novih PS u okviru RPS-a. U tablici 3.1. klasificirane su osnovne značajke oba sustava.

Realizacijom RPS bitno je postići promjenjivu funkcionalnost i skalabilnost proizvodne opreme tijekom životnog ciklusa PS što je objašnjeno u poglavlju 2.4. Fizička rekonfiguracija postiže se putem priključnih modula strojeva i pridruženih upravljačkih sustava dok logička rekonfiguracija uključuje mnoge aspekte fleksibilnosti koji se mogu postići kroz dobar dizajn sustava i softverska rješenja. Logička rekonfiguracija je po prirodi jeftinija i treba je uvijek iskoristiti prije no što se pribjegne drugim rješenjima. U svim se slučajevima treba uvijek provesti analiza troškovne koristi kako bi se odabrao najprikladniji pristup očekivanom životnom ciklusu PS.

Postavlja se pitanje jesu li RPS ili FPS, troškovno učinkovitiji tijekom vremena, uzimajući u obzir ukupni životni ciklus cijelog sustava? Kod RPS-a, u usporedbi sa FPS, početni troškovi su na početku manji te su manji tijekom životnog vijeka PS zbog svojstva inkrementalnosti. Međutim, pored hardverskih modula i njihovih sučelja, postoje mnogi pridruženi troškovi povezani s rekonfiguracijom. Trošak programa za planiranje i kontrolu koji podržava rekonfiguraciju te trošak prilagodbe, glavne su troškovne stavke koje se moraju uzeti u obzir svaki put kada se sustav ili njegove komponente preuređuju.

Tablica 3.1 Klasifikacija i usporedba FPS i RPS-a [57]

FPS	RPS
Opseg	
Funkcionalnost i kapacitet su unaprijed dizajnirani. Fleksibilnost i robusnost su nerazdvojni i ugrađeni „a priori“.	Funkcionalnost i kapacitet su varijabilni i konfigurirani po potrebi, kada je to potrebno.
Preduvjet	
Grupa proizvoda koja se oslanja na sličnost u geometriji i obradi.	Grupa proizvoda gdje raspon proizvoda može biti širi ili uži u usporedbi s FPS-om.
Značajke sustava	
Unaprijed planirane, alternativno usmjeravane između strojeva (ili radnih stanica) (logička/meke rekonfiguracija). Ograničena proširivost hardverskog sustava (fizička/tvrda rekonfiguracija). Varijabilna funkcionalnost ugrađena unutar dizajniranog opsega. Ograničena mogućnost ekspanzija (ili smanjenja) infrastrukture. Unaprijed određeni alternativni procesni planovi (logička/meke rekonfiguracija).	Varijabilno usmjeravanje između faza (logička/meke rekonfiguracija) planirano po potrebi. Širenje kapaciteta (modula) putem identičnih strojeva (fizička/tvrda rekonfiguracija). Ekspanzija funkcionalnosti (fizička/tvrda rekonfiguracija). Promjenjiva infrastruktura (fizička/tvrda rekonfiguracija). Alternativni procesni planovi. Moguće ponovno konfigurirati/mijenjati po potrebi (logička/meke rekonfiguracija).
Značajke strojeva	
Svestrani (CNC), promjenjivi broj osi gibanja, vretena, alata i steznih naprava. Više glava, više vretena, strojeva s više zadataka.	Modularnost, značajke brzih promjena i standardnih sučelja. Namjenske, ali promjenjive funkcije (osi, alati, itd.).
Kontrolne značajke	
Predinstalirana i unaprijed optimizirana kontrolna sučelja.	Promjenjive, ponovno prilagodljive kontrole i otvorena arhitektura.
Inteligencija	
Senzorske povratne informacije, prilagodljiva kontrola, neke operacije bez utjecaja ljudskog faktora.	Senzorske povratne informacije, prilagodljiva kontrola, potencijal buduće samorekonfiguracije.
Životni vijek	
Ograničen, dijelom opsega grupe proizvoda i dijelom potražnje sa tržišta.	Proširiv rekonfiguracijom i ponovnim korištenjem.
Trošak	
Početni troškovi sustava nastali su na početku razvoja procesa. Po potrebi uz manja povećanja nastaju i povezani troškovi.	Inkrementalni početni troškovi sustava po potrebi. Dodatne ponovljive rekonfiguracije prate troškove uspostavljanja procesa tijekom cijelog životnog ciklusa.

Neki nematerijalni troškovi, koji se odnose na učinak rekonfiguracije i performanse sustava, na kvalitetu proizvoda, na udio osposobljavanja za proizvodno i režijsko osoblje, potencijalno povećavaju složenost rada i kontrolne sustave koji se ne mogu zanemariti. Proizvođači opreme, u potrazi za produktivnošću i profitabilnošću sve češće uključuju proizvodno i tehnološko osoblje u smislu bolje optimizacije i prilagodbe proizvodne opreme namijenjene RPS. Oni postaju

najfleksibilniji dio PS što predstavlja nove izazove u dizajnu, radu i kontroli PS koji nadilaze jednostavnu ergonomiju, sigurnost i korisnost. Oni uključuju [6]:

- iskorištavanje ljudske fleksibilnosti i kreativnosti,
- modeliranje ljudi i njihove interakcije s strojevima i sustavima,
- optimalno oblikovanje usklađenih ljudskih/strojnih/PS, koji omogućuju učinkovit i profitabilan suživot i suradnju,
- razvijanje metodologija za rješavanje kvalitete u hibridnim ljudskim/strojnima sustavima.

Tehnologija koja je danas dostupna, koristi se kako bi se postigla korisna i pristupačna, iako ograničena, fizička i logička rekonfiguracija unutar PS, sve dok se ne razviju i dokažu nove tehnologije. U svom radu ElMaraghy [6] navodi da će, kako se razvijaju stari FPS i novi RPS, granice između tih dviju modela vjerojatno biti „zamagljene“, a značajke nadopunjavanja i kontinuiteta će postati očiglednije. Ostaje pitanje: je li RPS zreli FPS ili je FPS budućnost RPS-a?

3.4 Značajke rekonfigurabilnih višepredmetnih PS

Na formiranje višepredmetnog rekonfigurabilnog PS utječe niz elemenata i parametara koji daju kvalitetno rješenje u cilju zadovoljenja dinamičke potražnje sa tržišta i cjenovne isplativosti postavljene konfiguracije. To svakako ne podrazumijeva i apsolutno najbolja rješenja, ali daju bitnu osnovu za postavljanje kriterija čiji će ocjenjivani efekti rezultirati optimalnim PS. Izlazne se značajke najčešće definiraju kao: promjenjivost, upravljivost, proizvodnost, pouzdanost, troškovi, potrebne efektivne površine, socijalni aspekt i utjecaj na okolinu, iako se u određenim konkretnim situacijama mogu i trebaju uključiti i dodatne značajke:

- promjenjivost, koja predstavlja ključni parametar za višepredmetni RPS [6, 70], predstavlja mogućnost promjene proizvodnog programa i tehnoloških procesa bez posebnih promjena proizvodne opreme i njezinih struktura, ovisno o njenim značajkama te značajkama materijalnih i informacijskih tokova. Kompleksnost promjenjivosti procjenjuje se s više različitih aspekata definirajući u suštini raznorodne elemente promjenjivosti koji pokazuju sposobnost prilagodbe sa stanovišta zahtjeva na geometriju izratka, tok procesa obrade, veličinu serije i rast kapaciteta,
- upravljivost, koja se osigurava adekvatnom organizacijskom strukturom, predstavlja ukupnu sposobnost PS da uz minimalni utrošak vremena ostvari osnovne ciljeve i zadatke. Osnovni preduvjeti upravljivosti jesu definiranje: ulaznih kanala (veza) kroz koje će radno mjesto primati i slati informacije, procesa transformacije na radnom mjestu, potrebnih sredstva i energije za realizaciju procesa transformacije, izlaznih kanala (veza) prema drugim radnim mjestima što predstavlja povratnu vezu,

- proizvodnost, predstavlja mjeru tehničke sposobnosti opreme na osnovu zbira vremenskog opterećenja svih radnih mjesta u okviru modela PS po jedinici proizvoda [23]. Pretpostavke visoke proizvodnosti su kratka vremena operacija (strojna i pomoćna) te kratka pripremno završna vremena t_{pz} po jedinici proizvoda što podrazumijeva upotrebu produktivnije i promjenjivije opreme te alata,
- pouzdanost predstavlja otpornost na učestalost pojava tehnički uvjetovanih zastoja kao posljedica izravnih kvarova proizvodne opreme ili neizravnih kvarova komponenti sustava kao i mogućnošću njihovog brzog otklanjanja [26] i od velike je važnosti u RPS zbog optimalno postavljenih kapaciteta. Pouzdanost PS ovisi o pouzdanosti pojedinih komponenti te njihovom broju, kvaliteti i načinu integracije u sustav i predstavlja ključni element stabilnosti u radu,
- raspoloživost sustava podrazumijeva vremensku raspoloživost ili vrijeme koje je na raspolaganju za proizvodnju [24]. Kod RPS-a od velike je važnosti postići optimalno iskorištenje proizvodne opreme zbog karakterističnih osnovnih značajki, prvenstveno skalabilnosti, čime se postiže upravo potreban kapacitet što opet u znatnoj mjeri utječe na ekonomičnost u eksploataciji. Jedna od glavnih komponenti raspoloživosti predstavlja stupanj iskorištenja bruto raspoloživog vremena η_T ovisan o modelu PS i udjelu t_{pz} ,
- vrijeme ciklusa izrade predstavlja ukupno vrijeme potrebno za dovršenje procesa izrade nekog proizvoda koji je u toku, na osnovi ponavljanja i uključuje niz višestrukih aktivnosti i događaja koji se provode uzastopno. Struktura ciklusa izrade sastoji se od vremena raznolikih tehnoloških operacija [23], vremena transportnih aktivnosti i vremena različitih zastoja. Obzirom na izazovnu prirodu poslovanja u vrijeme dinamičnih potražnji, minimiziranje vremena ciklusa za različite procese igra ključnu ulogu u postizanju konkurentne prednosti,
- mjerljiv kriterij ocjene pojedinog rješenja PS predstavlja veličina početnih ulaganja u sustav. Struktura i obim jednokratnih ulaganja, značajke su određenog modela PS kao rezultat investicijskog projekta te ima utjecaj na visinu troškova i na visinu prihoda [63]. Struktura početnih ulaganja u PS može biti vrlo složena [24, 64] te kod složenih PS obuhvaća ulaganja u obradni sustav, sustav tokova materijala, informatički sustav, instaliranje sustava te priprema i uvođenje sustava (projektiranje sustava, obuka radnog osoblja i probni rad),
- troškovi pripreme i eksploatacije u konačnici terete jedinicu proizvoda [63, 64]. Formiranjem različitih konfiguracija PS utječe se i na različitost strukture troškova vođenja proizvodnje.

3.5 Projektiranje višepredmetnih RPS

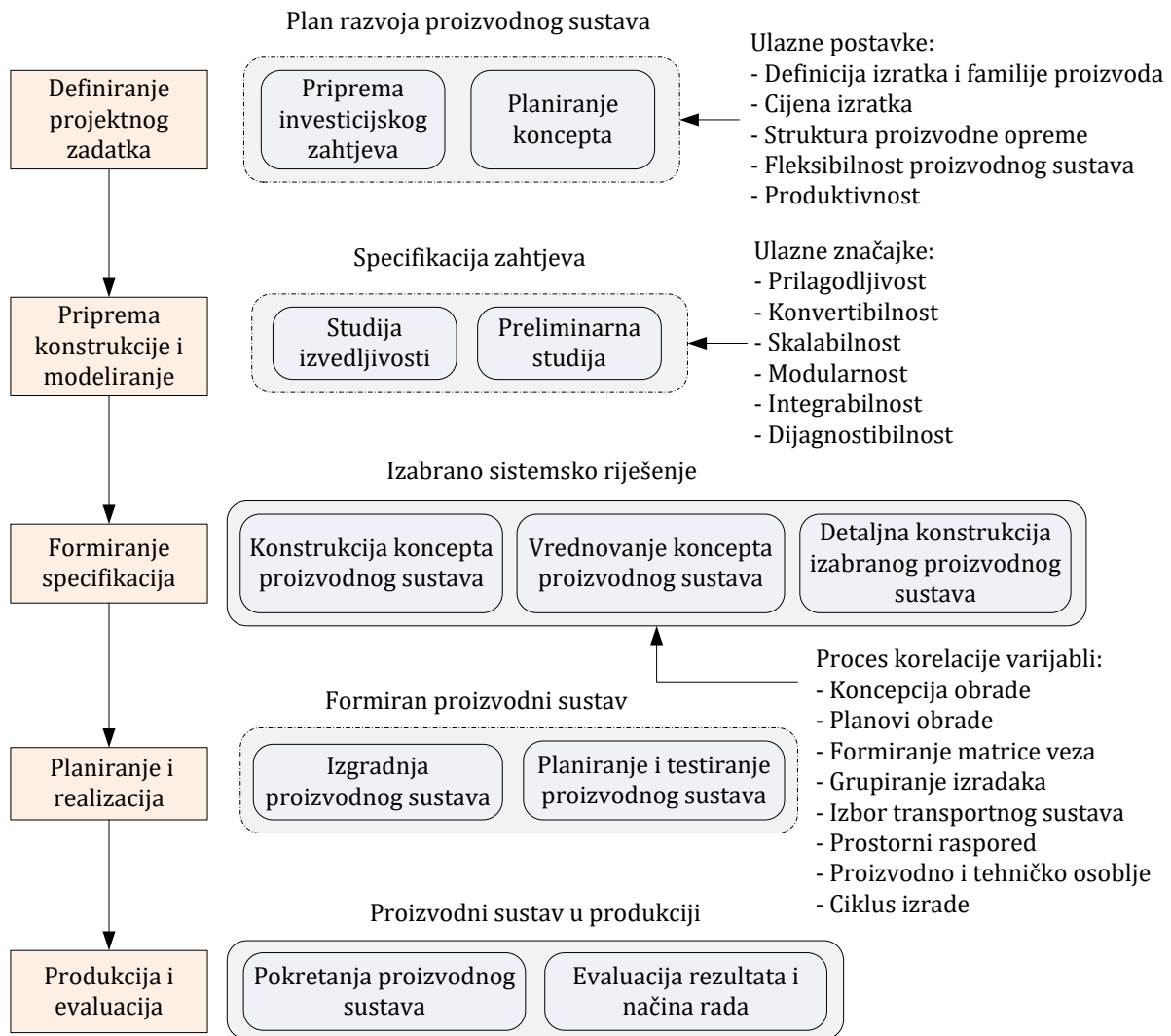
Prema današnjim zahtjevima tržišta, tvrtke moraju projektirati PS koji neće proizvoditi samo proizvode visoke kvalitete uz niske troškove, već moraju zadovoljiti određenu razinu odzivnosti prema potrebama kupaca. Odzivnost predstavlja brzinu kojom tvrtke mogu zadovoljiti promjenjive poslovne ciljeve u skladu s novim proizvodima na način da lansiraju novi proizvod na novom ili postojećem PS-u brzo i cjenovno efikasno. Projektiranje višepredmetnih RPS u skladu je s načelima rekonfiguracije i imaju za cilj poboljšati brzinu rekonfiguracije i time brzinu odaziva. U svom radu Koren i Shpitalni [28] navode tri osnovna načela projektiranja VRPS:

- načelo koje osigurava prilagodljive proizvodne resurse koji mogu reagirati na nepredvidive tržišne promjene i događaje unutar sustava (skaliranje u malim koracima, prilagodljivost novim proizvodima, prilagodba uslijed kvarova opreme),
- načelo konstrukcije sustava oko grupe proizvoda sa prilagođenom fleksibilnošću,
- načelo uključenosti osnovnih značajki RPS-a kako u PS tako i sve njegove komponente (mehaničke, komunikacijske i kontrolne).

U velikim PS proizvodnja uključuje više faza obrade. Proizvod se djelomično obrađuje u jednoj fazi obrade, a zatim prebacuju na slijedeću fazu obrade, sve dok se ne završe sve operacije. Konfiguracija sustava, u tom slučaju, znatno utječe na povećanje (ili smanjenje) produktivnost, brzinu reagiranja, konvertibilnost i skalabilnost, a može utjecati i na izvođenje samih operacija. Višepredmetni, višefazni PS mogu omogućiti nekoliko operativnih konfiguracija, ovisno o tome kako su strojevi raspoređeni u fazama obrade i kako su povezani preko sustava za manipulaciju. Na slici 3.10 prikazan je redoslijed postupka projektiranja za takve PS koji moraju zadovoljiti zahtjeve brze prilagodbe kapaciteta i funkcionalnost novim situacijama.

Proces projektiranja započinje izradom investicijske dokumentacije na temelju zahtjeva i donošenja investicijske odluke. Postavljaju se osnove za upravljanje projektom (definiiraju se početni resursi, terminski plan, sastav radnog tima te način prijena informacija). Proučava se postojeća dokumentacija i nacrti proizvoda sa specifikacijom zahtjeva, analiziraju se sustavna rješenja te formira plan uspostave podrške, evaluacije i učenja. Nakon uspostave procedura i pravila slijedi detaljna analiza proizvoda u korelaciji s karakteristikama RPS.

Sljedeća faza karakterizira tri koraka. Konstrukciju konceptualnog PS koji uključuje identifikaciju unutarnjih i vanjskih elemenata proizvodnog procesa, strategije na razini upravljanja, odabrana fizička i informacijska sučelja (odabir metoda, alata i strategija, analiza modula, operacija, procesa i rasporeda proizvodne opreme, manipulaciju, razinu automatizacije, protok informacija, način upravljanja i kontrole, strojeve i opremu, radno okruženje, operativna znanja i procedure) kroz nekoliko iteracija do pronalazjenja optimalnog PS.



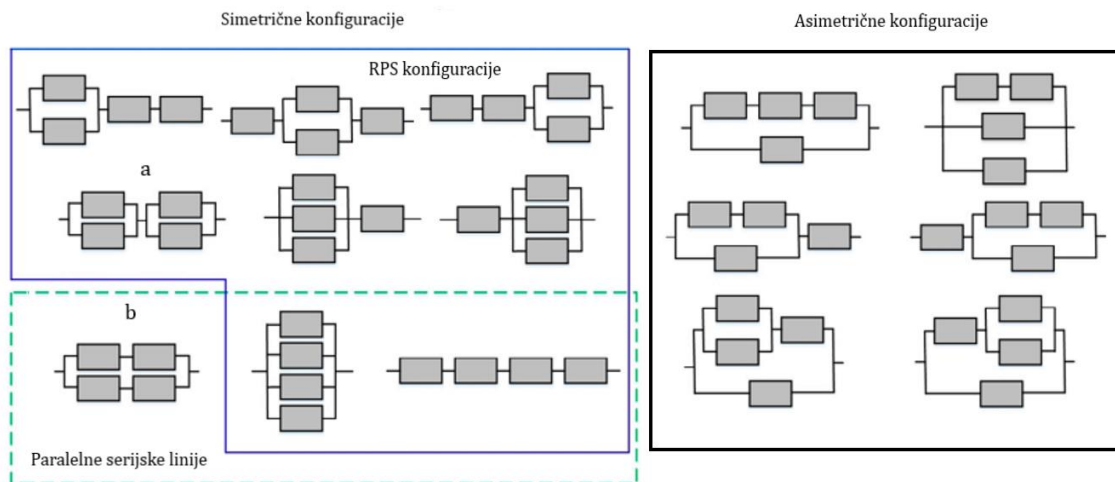
Slika 3.10 Način projektiranja RPS

Slijedi vrednovanje ili evaluacija u skladu s formuliranim zahtjevima i procjena troškova te detaljna konstrukcija izabranog PS uključujući projektiranje radnih mjesta i zadataka. Završne faze uključuju izgradnju PS, nabavu i instalaciju odabrane opreme, pokretanje i testiranje, obuku uključenog osoblja, uspostavu plana proizvodnje, a u određenoj fazi dinamike u potražnji, analizira se planirano i ostvareno te ispunjenost zahtjeva modela višepredmetnog RPS-a.

Razvojem nove industrijske paradigme 4.0 omogućena je komunikacija svih čimbenika u procesu, njihovo međusobno usklađivanje i postizanje optimalnih procesnih parametara. Promjenjiva i dinamična potražnja za proizvodima zahtjeva brzu promjenu izlaznih vrijednosti, prvenstveno proizvodnih kapaciteta, a implementacija svojstava RPS-a uz kocept industrije 4.0, stvaraju živu proizvodnu okolinu koja može brzo prilagođavati proizvodne kapacitete uz održavanje visoke razine kvalitete i optimalnih troškova.

3.5.1 Broj i oblici konfiguracija

Kod složenih PS broj mogućih konfiguracija je velik. U primjeru upotrebe četiri stroja (slika 3.11), moguće je stvoriti ukupno 15 konfiguracija. Kako broj konfiguracija eksponencijalno raste s porastom broja strojeva u sustavu, postavlja se pitanje kako je moguće analizirati i dati meritorne odluke o tome koja je konfiguracija optimalna? Prva klasifikacija konfiguracija koja se može sprovesti je ona koja ih dijeli na simetrične ili asimetrične konfiguracije, ovisno o tome vlada li simetričnost u odnosu na os duž konfiguracije. Konfiguracija se zatim klasificira rasporedom strojeva i sustavima veza (sustavima manipulacije).



Slika 3.11 Konfiguracije sustava s četiri stroja

Na primjer, konfiguracije *a* i *b*, prikazane na slici 3.15, imaju identične aranžmane stroja (u svakoj fazi obrade po dva stroja), ali se razlikuju po vezama između strojeva. Konfiguracija *a* koristi „poprečno“ povezivanje dok konfiguracija *b* koristi linijsko povezivanje. Vrsta sustava za manipulaciju izradcima određuje način spajanja i time tip konfiguracije. Iz slike 3.11 proizlazi da PS od ukupno 15 konfiguracija i četiri stroja omogućuje devet simetričnih i šest asimetričnih konfiguracija. U većini praktičnih slučajeva razmatraju se samo simetrične konfiguracije tj. sve one varijante konfiguracija koje su simetrične s obzirom na raspored strojeva. Prema [28], simetrična konfiguracija mogu se podijeliti u dvije kategorije:

- paralelne serijske linije sastavljene od više identičnih serijskih linija,
- RPS konfiguracije koje se sastoji od uzastopnih faza obrade spojenih u seriju, gdje svaka faza obrade ima više paralelnih CNC ili rekonfigurabilnih strojeva.

Za razliku od simetričnih, asimetrične konfiguracije su vrlo složene i nisu do sada prakticirane u realnim PS. Broj asimetričnih konfiguracija je mnogo veći nego kod simetričnih konfiguracija, npr. u proizvodnom sustavu od 5 strojeva, može postojati ukupno 32 asimetrične konfiguracije.

4 UTJECAJ SKALABILNOST U FORMIRANJU VIŠEPREDMETNOG RPS

Dinamični zahtjevi za potražnjom, varijacije u konstrukciji proizvoda i njihovi kratki životni ciklusi te smanjenje količina po jedinici proizvoda, uvjetuju otežano prognoziranje i definiranje optimalnog plana proizvodnih kapaciteta. Dodatni pritisak na planiranje kapaciteta je smanjenje vremena konstrukcije proizvoda i uvođenje novih tehnologija za njihovu proizvodnju, a time i izbor strojnog parka. Iz navedenih karakteristika nove proizvodne paradigme, proizvodne tvrtke pokušavaju pronaći način smanjenja visokog rizika ulaganja povezanih s kupovinom novih PS. Takva činjenica stvorila je potrebu za sustavnom metodologijom dizajna i konstrukcije PS koji opravdavaju primjenu RPS-a, a time i komponentu skalabilnosti pa se takva nova klasa sustava može nazvati skalabilni PS.

Shodno tome pojam skalabilnosti, predstavljen u poglavlju 2.5.3., može se proširiti kao sposobnost precizne prilagodbe kapaciteta PS putem rekonfiguracije sustava uz minimalne troškove, u najkraćem vremenu kroz veliki raspona mogućih kapaciteta [74]. Upotrebom skalabilnih sustava tvrtke će moći znatno smanjiti svoje rizike ulaganja kupnjom kapaciteta kada je to potrebno te održavati konzistentnu profitabilnost u velikom rasponu količina proizvodnje. Takvim pristupom potrebna financijska sredstva neće ići u smjeru investiranja viška kapaciteta, već će služiti za projektiranje bolje iskoristivost PS ili ulaganjem novca u profitabilnije aktivnosti.

Zbog ograničenih karakteristika NPS-a i FPS-a, važnost problema skalabilnosti pokrenut je zbog potreba industrijskih tvrtki prvenstveno proizvođača automobilskih dijelova. NPS-i su prilagođeni i isplativi za velike serije jednog tipa proizvoda te je njihova konstrukcija i proizvodnja temeljena na velikim proizvodnim kapacitetima. Takav pristup dovodi do stvaranja velikih koraka (inkremenata) u smislu sposobnosti povećanja proizvodnih kapaciteta kupnjom nove opreme.

Nasuprot tome, kod FPS proizvodni kapaciteti se mogu dobiti s manjim inkrementom, dodavanjem paralelno više CNC strojeva. Zbog povećane složenosti CNC strojeva, trošak ulaganja u takvu opremu kod velikih količina je veći nego kod NPS-a [47]. Budući da tipični PS (proizvodne linije) za obradu glavnih dijelova motora imaju visoku cijenu investicije, ovakva razlika u troškovima postaje vrlo značajna. Proizlazi da tvrtke koje koriste NPS-e, troškovno su učinkovite pri velikim i stabilnim, ali nekonkurentne pri srednjim i malim, proizvodnim količinama za dinamično okruženje koje je u nastanku. Suprotno tome, tvrtke koje koriste FPS-e, konkurentnije su pri manjim serijama te mogu nadopunjavati proizvodne kapacitete u manjim inkrementima. Stoga je idealan skalabilni sustav onaj koji se može instalirati s malim inkrementima povećanja/smanjenja kapaciteta.

Važna komponenta kod postavljanja novih PS je brzina odnosno dinamika promjene kapaciteta obzirom na izrazite dinamičke zahtjeve na tržištu. Kod NPS, budući da se dizajnira „po mjeri“, vrijeme za izgradnju kod složenih PS može trajati i do dvije godine uzimajući u obzir izradu i konstrukciju. Za promjenu kapaciteta ili prelazak na novi proizvod iz grupe proizvoda to vrijeme može biti dvostruko kraće upotrebom FPS tj. standardiziranih strojeva i logističkih sustava. Skalabilni sustavi u konceptu RPS konstruirani su iz standardiziranih komponenata (npr. strojeva, modula strojeva, manipulativnih jedinica, sučelja, senzora i sl.), a njihova modularna koncepcija omogućava bržu prilagodbu od faze konstrukcije do izrade i početka proizvodnje.

4.1 Karakteristike skalabilnosti u PS

4.1.1 Razine skalabilnosti

Skalabilnost PS može se postići na različite načine. Općenito, vrijedi osnovna podjela na četiri različite "razine" skalabilnosti:

- razina stroja ili proizvodnog kapaciteta,
- razina proizvodnog procesa,
- razina PS,
- poslovna razina.

Vjeruje se da je ova kategorizacija korisna u razumijevanju različitih opcija koje tvrtka može skalirati, stoga će biti korisna u donošenju odluka o strategijama skaliranja. Tablica 4.1 prikazuje primjere različitih učinaka skalabilnosti na pojedinim strukturnim razinama. Svaka moguća opcija skaliranja imat će jedinstveni trošak i vrijeme rekonfiguracije. Uz to, svaka će opcija imati jedinstveni učinak na kapacitet. Postoji više mogućih opcija za promjenu kapaciteta PS, a pravilan izbor ovisan je o više činitelja.

Tablica 4.1 Učinci skalabilnosti kod primjene CNC obradnih strojeva [74]

Opcija skaliranja	Razina stroja	Razina procesa	Razina sustava	Poslovna razina
Ugradnja dodatnih mogućnosti (u funkcionalnosti i kapacitetima)	✓			
Povećanje raspoloživosti (veća pouzdanost, kraće vrijeme popravaka)	✓			
Optimiranje strojnih pokreta i prilagodbe pokretnih osi	✓			
Prilagodbe sučelja i upravljanja	✓			
Poboljšanje kvalitete (manje otpada i povratnih hodova)		✓		
Promjena konstrukcije proizvoda (smanjenje potrebnih operacija)		✓		
Poboljšati parametre procesa (alati i brzine obrade)		✓		
Mogućnost multipliciranja cijele proizvodne linije			✓	
Mogućnost formiranja drugačijeg koncepta linije i opreme za manipulaciju			✓	
Dodavanje (ili oduzimanje) strojeva u paraleli			✓	
Mogućnost dodavanje novog ili različitog procesa (stroja) u paralelu			✓	
Dodavanje strojeva u seriju i redistribucija operacija			✓	
Mogućnost dodavanje među skladišta			✓	
Mogućnosti preraspodjele poslova ili operacija izvan PS (eng. <i>out-source</i>)				✓
Osiguranje zaliha u svrhu izbjegavanja fluktuacije u potražnji				✓
Postizanje uravnoteženosti proizvodnih kapaciteta korištenjem najma ili lizinga				✓
Prekovremeni rad				✓

4.1.2 Ograničenja skalabilnosti

Premda su RPS i sukladno tome skalabilnost, činitelji nove proizvodne paradigme, zadovoljenje postavljenih karakteristika takvog sustava još nije u praksi zaživjelo. Stručna i znanstvena zajednica se slaže da postoji potreba za skalabilnim sustavima obrade kao što je prikazano u prethodnoj definiciji RPS-a. Međutim, maksimum u dostignutim rezultatima trenutno je skalabilni proizvodni sustav temeljen na osnovi korištenja FPS sustava (na osnovi CNC proizvodne opreme). Očigledno je da industrija upotrebljava fleksibilne sustave za pristup skalabilnost, a u tom konceptu mogu se definirati sljedeća ograničenja:

- visoka cijena proizvodnje zbog koncepta kojeg karakterizira CNC proizvodna oprema,
- ograničenije na jednog proizvođača strojeva kako bi se smanjili problemi s integracijom,
- sustavi za manipulaciju materijalom ne podržavaju skalabilnost,
- sustavi za podršku nisu skalabilni (npr. rashladni sustavi sl.),
- priključci, sučelja i programi nisu standardizirani.

Proizlazi da su, a da bi se djelomično ili u potpunosti eliminirala ova ograničenja, potrebni dodatni istraživački naponi koji se mogu fokusirati na ovih nekoliko područja:

- smanjenje cijene i troška pojedinačne proizvodne opreme,
- uvođenje modularnih koncepata strojeva i dijelove strojeva,
- uvođenje novih, „skalabilnih“ koncepata sve proizvodne opreme unutar PS,
- razviti nove skalabilne i cjenovno povoljnije logističke sustave za manipulaciju,
- standardizirati sustave povezivanja i prepoznavanja po konceptu „plug-and-produce“.

FPS teoretski mogu pružiti mogućnost promjene kapaciteta u malim inkrementima (koracima), međutim, u praksi su takve promjene proširenja (ili sužavanja) još uvijek skupe i vremenski neučinkovite. Proširenja kapaciteta zahtijevaju povećane troškove ulaganja u početku formiranja PS što znači da proizvođač mora platiti dodatnu naknadu za mogućnost promjene kapaciteta u budućnosti te time vezati financijska sredstva za proizvodnju koja se možda neće niti realizirati. Na primjer, modularna arhitektura stroja koja omogućuje dodavanje više modula koštati će više od manje sofisticiranog dizajna stroja koji se ne može ponovno konfigurirati. To je zato što će modularni stroj imati dodana sučelja koja omogućuju dodavanje novih modula, a ne postoji jamstvo da će biti potrebno više modula.

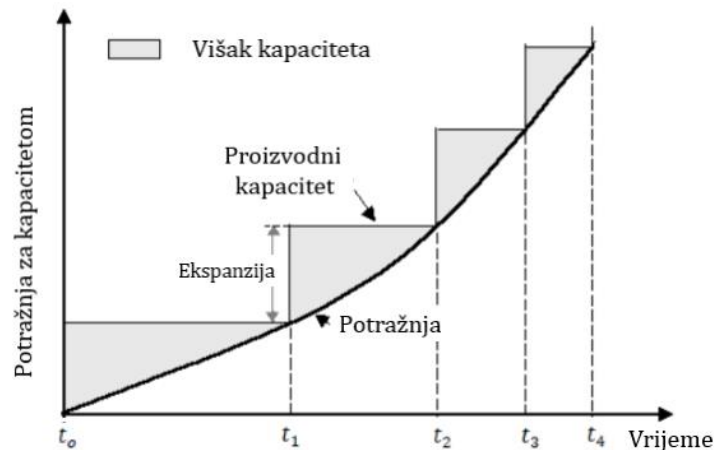
Drugi primjer, iz perspektive primjene sustava, je potreba osiguranja dodatnog prostora kako bi se omogućilo eventualno buduće širenje. Ovaj dodani prostor može prisiliti proizvođača za većom zgradom ili povećati troškove ulaganja u zgradu. Općenito, postoji inicijalna investicija kojom treba zaštititi budući rast.

Kod idejnih rješenja i konstrukcije budućih PS ostaje dilema, je li ekonomski opravdano investirati u nepredvidivu budućnost kako bi se naknadno smanjili troškovi rekonfiguracije? Odgovor na ovo pitanje nije jednostavno ali je, prije svega, potrebno razviti skalabilna načela dizajna tj. uspostaviti osnovne principe dizajna koji reguliraju skalabilnost sustava strojne obrade na razini stroja i sustava.

4.2 Modeli ekspanzije kapaciteta

Koncept skalabilnosti sustava razvijao se proteklih 30-tak godina i slična istraživanja započeta su 1960-tih godina pod nazivom ekspanzija kapaciteta modela. Prema istraživanjima koje je sproveo Freidenfeld [74], stoji da „primarne odluke o proširenju kapaciteta obično uključuju veličine dodanih objekata i vrijeme u kojem bi trebali biti dodani.“ Modeli ekspanzije kapaciteta, koje je razvio, nastoje pronaći optimalni kompromis u ekonomiji razmjera gdje velike investicije u PS obično koštaju manje po proizvedenoj jedinici od malih. No, ako se razina potražnje dugoročno kontinuirano povećava, a pitanje oko akumuliranog neaktiviranog kapaciteta nije uzeto u obzir,

pojavit će se višak kapaciteta, kao što je prikazano na slici 4.1. Stoga postoji kompromis između ekonomije razmjera i troškova viška kapaciteta, što dovodi do optimalnog, kompromisnog rješenja. Osim veličine ekspanzije i vremena ekspanzije, problemu se mogu dodati i druge varijable odluke, kao što su alternativne lokacije objekata i/ili vrsta objekata.



Slika 4.1 Prikaz ekspanzije kapaciteta [72]

4.2.1 Skalabilnost FPS-a

Kako je navedeno u poglavlju 2.2.2. i prema [2], FPS su sustavi koji mogu proizvesti različite tipove proizvoda na istom PS u malim i srednjim serijama, a sastoje se od računalno numerički upravljanih (CNC) strojeva i drugih programabilnih sustava automatizacije. Takva definicija modela sadrži kategoriju fleksibilnosti volumena kao sposobnost profitabilnog upravljanja FPS-om za različite količine proizvodnje i može biti usko povezana s pojmom i konceptom skalabilnosti. Međutim, to se razlikuje od koncepta skalabilnosti kakav je predstavljen u RPS jer nema sposobnosti promjene značajki opreme. Da bi se nadomjestila krutost takvog sustava postoji mogućnost izgradnje sustava multipliciranjem proizvodne opreme prema potrebi, modularno i uz upotrebu standardnih sučelja. U svojem radu Spicer [73] navodi fleksibilnost ekspanzije kao pojam najbliži skalabilnosti kojim definira lakoću kojom se kapacitet i sposobnost FPS mogu po potrebi povećati (ili smanjiti), a "lakoća" se odnosi na izravne troškove, troškove prekida proizvodnje i vrijeme koje je potrebno za postizanje promjene. U istraživanjima [75], navode se neki važni preduvjeti za postizanje fleksibilnosti ekspanzije. Prema njima predlaže se:

- izgradnja manjih proizvodnih jedinica otpornih na učestale promjene u varijacijama proizvoda i dinamici potražnje,
- upotrebu modularnih fleksibilnih proizvodnih stanica i prilagodljive kontrolne i manipulativne opreme,

- upotreba višenamjenskih strojeva koji ne zahtijevaju posebne temelje i sustave za manipulaciju,
- organiziranje dinamičke infrastrukture u cilju olakšavanje rasta i tehnološkog razvoja PS i planiranja promjena,
- primjena automatiziranih i numerički vođenih transportnih sredstava za manipulaciju materijalom u cilju podrške pri širenju PS,
- projektiranje sustava na takav način da je omogućeno proširenje (ili smanjenje) sustava bez potrebe za značajnim novim promjenama,
- primjena kontrolnih sustava koji su modularni kao i transportnih sustava i uređaja koji imaju mogućnost jednostavnog i ekonomičnog proširenja,
- mjerenje omjera fleksibilnosti ekspanzije koji se koristi za usporedbu očekivanog dugoročnog profita sustava s dugoročnom dobiti neproširivog sustava,
- mjerenje ukupno potrebnog rada i troškova po jedinici vremena u svrhu dodavanja (ili oduzimanja) određene količine proizvodnih kapaciteta.

Budući da je fleksibilnost ekspanzije u suštini isti koncept kao i skalabilnost, logično je pretpostaviti da se uvid u skalabilnost može dobiti i iz studije o fleksibilnosti ekspanzije. U razvoju FPS, međutim, nema predloženih sustavnih dizajniranja metodologija za stvaranje sustava s fleksibilnošću ekspanzije te nisu uspostavljeni posebni principi dizajna.

4.2.2 Skalabilnost RPS-a

Jedna od ključnih značajki RPS-a je skalabilnost kapaciteta definirana kao sposobnost prilagodbe proizvodnog kapaciteta sustava tržišnim zahtjevima i to u koracima ili fazama obrade U radu, Koren i sur. [47] istražuju (putem primjera slučaja) kako konfiguracija sustava utječe na skalabilnost sustava. Njihov rad istražuje sustave koji se razlikuju od potpuno paralelnih sustava do onih koji su potpuno serijski. Zaključuju da paralelni sustavi imaju najmanji korak povećanja kapaciteta, ali i da pojedinačna složenost stroja u potpuno paralelnoj liniji može biti štetna u smislu početnih troškova. Također navode kako dodavanje jednog samostalnog stroja paralelno s bilo kojom linijom može dovesti do malog povećanja kapaciteta uz niske troškove ulaganja. Takvi koncepti, međutim, zahtijevaju vrlo složeno upravljanje i algoritme te moraju biti dobro informatički ustrojeni kako bi dinamički pratili dodavanje i oduzimanje proizvodnih kapaciteta (modula, alata, steznih naprava, kontrolnih sustava i sl.), u ovisnosti o složenosti njihovih zadataka. U posljednje vrijeme sve je učestalija primjena heurističkih metoda koje automatski generiraju alternativne konfiguracije PS na način dodavanja strojeva u paralelne veze (ili povezivanje serijskih linija) dok se ne postigne željena razina kapaciteta. Na taj način moguće je i konfiguriranje PS za svako razdoblje potražnje. U dosadašnjim istraživanjima autori se uglavnom

bave formiranjem skalabilnih sustava koji definiraju proizvodnu opremu identičnih karakteristika u svakoj fazi obrade što znači simetrične konfiguracije. Formiranje asimetričnih konfiguracija (različiti tipovi proizvodnu opremu u fazi obrade) smatraju složenim i nepraktičnim ili je njihovo modeliranje otežano zbog analize velikog broja varijabli što uvjetuje:

- različita proizvodna oprema nema ista vremena ciklusa za isti izradak u svakoj fazi obrade što uzrokuje minimalne faze čekanja ili uska grla u protoku,
- složen način manipulacije i logistike unutar PS koji je teško postaviti za različite tipove strojeva, njihove karakteristike uključivanja u sustav te načina održavanja,

Ovaj rad se između ostaloga bavi razradom i modelom koji će omogućiti postavljanje PS strojne obrade na način da u istoj fazi obrade nisu postavljeni isti strojevi (ili isti modularni strojevi) što općenito daje širinu u primjeni i omogućuje korištenje postojeće proizvodne opreme u kontekstu rekonfiguracije. Tim karakteristikama umnogome pomažu novi pristupi i prakse u realnoj proizvodnji prvenstveno primjenom elemenata nove paradigme Industrije 4.0. Formiranjem praktično primjenjivog modela može se pomoću ishodišnih vrijednosti i parametara definirati putanja konfiguracije za svako razdoblje potražnje.

4.3 Industrijska primjena skalabilnih PS

Istraživanja koja se provode na području PS imaju, u današnjim uvjetima, brzu primjenu i u realnom okruženju. O primjeni skalabilnosti mnogo se može naučiti kod primjene obradnih sustava u industriji, uglavnom zato što se većina znanja o PS nalazi u industriji. Stručni radovi iz industrijskog okruženja korisni su za prepoznavanje stanja napretka u konstrukciji sustava obrade, prvenstveno konstrukcije strojeva i procesa. Zbog efekta tržišta i pritiska konkurencije, industrija uvodi najnovije koncepte i definira trendove. Kroz industriju se identificiraju i ključni problemi u projektiranju procesa pa je to dodatni motiv znanstvenoj i stručnoj zajednici da sinergijskim učinkom polučite optimalne efekte i generiraju nova načela. Povezujući činjenice iz poglavlja 3 i literaturi koja proizlazi iz industrijske prakse, u proizvodnji danas postoje četiri značajne arhitekture sustava obrade koji se koriste za obradne PS: NPS, fleksibilne transfer linije, FPS-i slučajnog redoslijeda i namjenski FPS.

U prvu grupu, kako je navedeno u prethodna dva poglavlja, spadaju linijski sustavi nefleksibilnih strojeva - NPS koji su namijenjeni proizvodnji određenog proizvoda u velikim količinama. Oni su izrazito neskalabilni jer koriste namjensku proizvodnu opremu uzduž progresivne serijske linije i svako odstupanje po pitanju skalabilnosti kapaciteta zahtjeva visoka investicijska sredstva.

Za razliku od NPS-a, fleksibilne transfer linije kombiniraju visoku stopu proizvodnje s fiksnom automatizacijom, raznovrsnošću i fleksibilnošću CNC tehnologije. U usporedbi sa standardnom

CNC proizvodnom opremom, pojedini moduli transfer linija više su specijalizirani za procesuiranje manje operacija po izratku ili mogu koristiti posebne rezne alate za obradu više operacija s većom učinkovitošću. Razina skalabilnosti je niska zbog krutih logističkih sustava i visoke cijene prilagodljivosti. Moguće je dodavanje identičnih strojeva u liniju uz visoki udio prilagodbe automatizacije te povećanog udjela radnog osoblja.

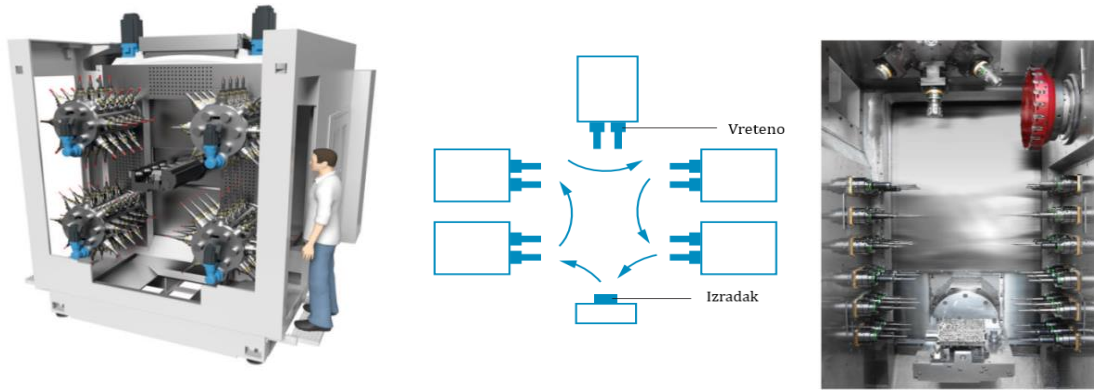
FPS-i slučajnog redoslijeda jesu visoko automatizirani funkcionalne ćelije koje obrađuju široku grupu proizvoda sa sposobnošću obrade izradaka u slučajnom redoslijedu. Takav sustavi su automatizirani, imaju fleksibilno rukovanje materijalom i potpunu kontrolu računalom, koristeći centralno (eng. *host*) računalo te mogu biti projektirani za proizvodnju bez osoblja u drugoj i/ili trećoj smjeni. Ovakav koncept često se može naći u alatnicama koje imaju dugačke cikluse obrade pa se priprema proizvodnje vrši u prvoj smjeni. Mogućnost skalabilnosti ovakvog koncepta je znatna jer se upravljanje vrši kroz centralni informatički sustav koji upravlja strojevima, manipulativnim jedinicama, jedinicama za opskrbu reznim alatima i sl.

Namjenski FPS predstavljaju oblik ćelije koji obrađuje relativno usku grupu proizvoda, gdje su varijacije u geometrije izradaka male. Takvi PS koncipirani su za manji opseg strojeva, a skalabilnost je moguća kao na razini FPS-a slučajnog redoslijeda. Takvi sustavi obično koriste nefleksibilne strojeve s fiksnom automatizacijom i koriste alate s više vretena u cilju postizanja veće produktivnosti. Da bi se postigla skalabilnost PS, proizvodne tvrtke koriste niz strategija na razini stroja, procesa i sustava.

a) *Na razini stroja* pokušavaju se pronaći načini za povećanje omjera brzine obrade fleksibilne CNC proizvodne opreme u odnosu na njihove investicijske troškove. Ako se taj omjer poveća, ukupni trošak sustava se smanjuje pri visokim proizvodnim količinama što čini sustav konkurentnijim od NPS. Proizvodne tvrtke u svojim konstrukcijskim rješenjima PS koriste nekoliko različitih pristupa kako bi povećali omjer produktivnosti i troškova fleksibilnih strojeva. Prvi i osnovni je odabir CNC strojeva nižih troškova (početne investicije, održavanja, i sl.). Ostali pristupi uključuju pronalaženje načina povećanja produktivnosti strojeva kao što su upotreba:

- jednovretenih strojeva velikih brzina vretena (motor-vretena koja u realnim uvjetima dostižu brzine vrtnje n_s oko 40.000 o/min),
- viševretenih izmjenjivih glava (uglavnom za bušenje i urezivanje navoja),
- strojeva s više vretena koji istodobno omogućuju obradu više izradaka.

U daljnjem tekstu prikazani su primjeri konstrukcijskih rješenja koja objedinjuju sve navedene karakteristike. Na slici 4.2 prikaz je koncepcije viševretenog fleksibilnog stroja u kojem stezna naprava sa izratkom putuje od alata do alata čime se postižu kratka neproduktivna vremena.



Slika 4.2 Prikaz koncepta proizvođača strojeva Elha [<https://www.elha.de>]

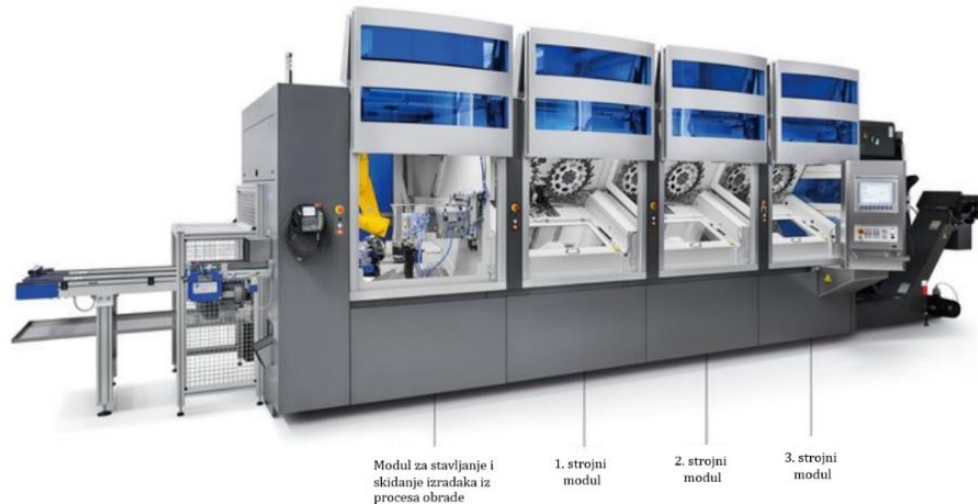
Primjetan je i element skalabilnosti na način da se vretena mogu dodavati i oduzimati u ovisnosti od potreba potražnje ili zahtjeva za promjenom u konstrukciji izratka. Neke osnovne karakteristike takvog koncepta:

- svi potrebni alati raspoređeni su u radnom prostoru na određenom mjestu,
- svaki alat ima optimizirani sustav stezanja i pogona u odgovarajućim glavama ili revolverima s više vretena,
- stezna naprava i izradak pomiču se s alata na alat što rezultira najkraćim vremenom od početka do početka reza (eng. *chip to chip time*),
- nema promjene alata u procesu i time netočnosti zbog promjene alata,
- mogućnost primjene jednog (ili više) izradaka ili jednog (ili više) vretena što je ovisno o primjeni, zahtjevima potražnje, složenosti i sl.,

Primjena takvih strojeva je u velikoserijskoj proizvodnji (proizvodnim količinama > 100.000 izradaka/godišnje). Takav tip stroja može biti i prijelazna faza u konceptu skalabilnosti.

Drugi koncept, koji postavlja namjenske FPS, prikazan na slici 4.3, skup je povezanih CNC obradnih centara u logični sustav upravljani iz jednog upravljačkog sustava. To je modularni tip strojeva te sadrži nekoliko elemenata rekonfigurabilnosti kao npr. modularnost, skalabilnost, dijagnostibilnost i kompatibilnost. Karakteristike takvog koncepta jesu:

- kratki transportni putevi,
- stezna naprava putuje od modula do modula zajedno s izratkom,
- u steznoj napravi se nalazi jedan izradak tako da je t_{pz} vrlo kratak od 10 – 20 min,
- zbog uvedena dva skladišta alata vrijeme od početka do početka reza ispod 1 sec,
- namijenjeni proizvodnji grupi sličnih proizvoda,
- ugrađena interaktivna kontrola za pojedine značajke izratka,
- mogućnost nadogradnje ili oduzimanja modula (2 – 4 modula).



Slika 4.3 Prikaz koncepta proizvođača strojeva Mikron [<https://www.mikron.com/>]

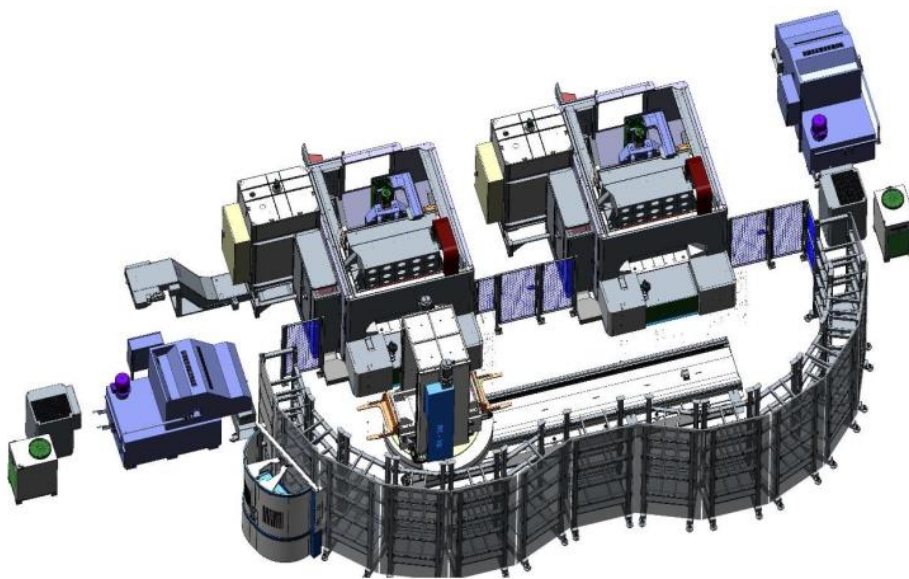
U usporedbi s klasičnom CNC komponentama PS, npr. obrada izratka koja zahtjeva obradu u dva stezanja na CNC tokarilici i viševretenom CNC obradnom centru te ručnom manipulacijom s izratkom i ručnim među transportom, sustav sa slike 4.3 vrši automatski rad u potpunom proizvodnom ciklusu, automatsko stavljanje i skidanje te automatsko mjerenje u ciklusu. Uz istu efikasnost namjenskom FPS potrebno je 45% manje prostora, 50% manje strojne opreme, 75% kraće t_{pz} te je potrebno 75% manje proizvodnog osoblja u odnosu na klasične CNC strojeve.

b) *Na razini procesa*, proizvodne tvrtke pronalaze razne načine kako smanjiti vrijeme obrade i kako skratiti vrijeme izgubljeno u promjenama alata. Smanjenje vremena obrade postiže se ili primjenom specijalnih alata ili postizanjem visokih režima obrade. Jedna od načina primjene specijalnih alata s aspekta skalabilnosti je primjena viševretenih glava koje su dominantne u NPS, ali velika je primjena i u FPS odnosno RPS. Slika 4.4 prikazuje sliku modernog izmjenjivača glave uz primjenu jedinice za manipulaciju. Na taj način se omogućuje mijenjanja cijelih viševretenih glava, umjesto samo jednog alata. U današnjim uvjetima i primjenom brzih prihvata izmjena može trajati ispod 10 sekundi čime se povećava i produktivnost stroja. Međutim, cijena takvog sustava je visoka pa treba naglasiti da povećanje produktivnosti povećava i dodatne troškove stroja. Kako bi smanjili neproduktivna vremena proizvodne tvrtke razvijaju i kombinirane alate čime se smanjuje broj alata u upotrebi te vrijeme izmjene alata. Kombinirani alati omogućuju višestruke procese obrade u jednom zahvatu (npr. bušenje i razvrtavanje). Slično tome, kod upotrebe razvrtača, nema potrebe za prethodnom grubom obradom. Stoga, s manje reznog alata, vrijeme ukupne zamjene alata se smanjuje. Dodatni naponi se ulažu i u primjeni rashladnih sredstava (hlađenje kroz alat ili korištenje uljne magle) kako bi se rashladna tekućina usmjerila na tijelo i oštricu alata što pomaže evakuaciji špene pri velikim posmacima.



Slika 4.4 Sustav brzo izmjenjivih viševretnih obradnih jedinica proizvođača Grob
[<https://www.grobgroup.com>]

c) *Na razini PS-a*, proizvođači se uglavnom oslanjaju na fleksibilne tipske sustave koji utječu na skalabilnost. Povećanja kapaciteta postižu se dodavanjem pojedinačnih CNC strojeva, modula ili cijelih numerički upravljivih ćelija. Drugi važan faktor su logistička i manipulativna sredstva koja povezuju sve strojeve u PS. Automatizacija takvih sustava poprima veliki značaj i čini RPS-e ostvarivim. Osnovni element manipulacije je paleta s izratkom koja može biti formirana na više načina. Ukoliko izradci nisu velikih dimenzija i masa, za rukovanje paletama često se koriste i višeosni manipulatori. Spremište paleta omogućuje kontinuirani rad obradnog CNC stroja, fleksibilne obradne ćelije te FPS ili RPS-a, bez poslužitelja kao što je prikazano na slici 4.7. Time je omogućen rad u trećoj smjeni te neradnim danima, pa se znatno povećava iskorištenje kapaciteta sustava. U primjeni su već sada manipulatori otvorene arhitekture koji se mogu prilagoditi izmjeni paleta između više obradnih strojeva i skladišta. Pogodni su za brzu automatizaciju sustava i ne zauzimaju puno radnog prostora.



Slika 4.5 Primjer automatiziranog paletnog FPS [https://www.teh-cut.hr]

Automatizacijom paletnih sustava postiže se veća fleksibilnost, produktivnost te brži povratak uloženi sredstava. Automatizacija omogućava integriranje svih elemenata paletnog sustava u informatički povezanu cjelinu. Osim fizičkih elemenata paletnih sustava, za automatizaciju je potreban i sustav za prijenos informacija o izratku između upravljačkih jedinica obradnih strojeva, te odgovarajuća programska podrška. Primjenom novih tehnologija i povezanosti cijelog PS omogućena je komunikacija i upravljanje svih elemenata u procesu na autonoman način. Sama proizvodna ćelija, (slika 4.5), može se nadograditi pratećim manipulativnim jedinicama ili autonomnim vozilima, (slika 4.6), koji unutar sebe sadrže manipulator s paletama i po pozivu vrše radnje potrebne da se proces odvija bez prisustva proizvodnog osoblja.



Slika 4.6 Primjer automatiziranog robota za manipulaciju paletnih sustava
[<https://clearpathrobotics.com>]

Iako postoji relativno malo literature koja obrađuje teme skalabilnih sustava, industrijska praksa ukazuje na potrebu dodatnih napora u primjeni takvih sustava koji bi obuhvatili razvoj:

- modularne strukture na razini stroja,
- inkrementalnog koncepta koji bi isključio potrebe za novom konstrukcijom opreme,
- modela koji bi analizirali korelaciju troškova ulaganja kroz povećanje/smanjenje kapaciteta u odnosu na korak skalabilnosti i vremena za instaliranje novih sustava,
- proizvodne opreme niže cjenovne vrijednosti, uz mogućnosti korištenja više vretena,
- u konstrukciji sustava kroz analizu konfiguracijskog puta koji se mijenja kako bi zadovoljio različite zahtjeve potražnje,
- u načelima konstrukcije za poboljšanje skalabilnosti obradnih sustava na razini PS, stroja
- asimetričnih struktura PS,
- modela za primjenu RPS-a na postojećim PS primjenom novih načela i paradigme Industrije 4.0.

4.4 Konstrukcija skalabilnih PS

Kako bi proizvodne tvrtke ostale konkurentne i otporne na promjene, započele su s pronalaženjem PS koji mogu odgovoriti na zahtjeve brzih promjena na tržištu. Neki od preduvjeta koji su omogućili takav iskorak u razvoju novih pristupa formiranju PS jesu:

- uvođenje novih tehnologija i materijala u procese izrade proizvoda,
- kontinuirano smanjenje cijene proizvodne opreme, prvenstveno u robotizaciji,
- razvoj u povezivanju informatičkih komponenti i sučelja u smjeru nove paradigme Industrije 4.0,
- intenzivni razvoj na području automatizacije i logistike unutar PS i postavljanje koncepta „pametne tvornice“.

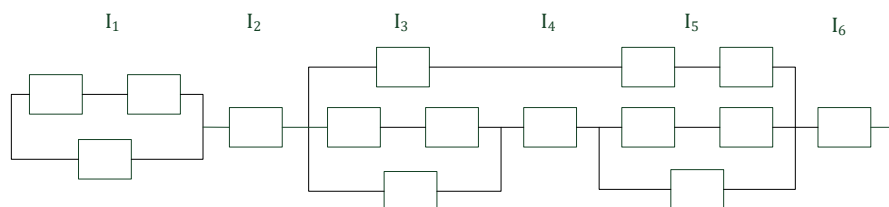
Svi ovi činitelji utječu direktno ili indirektno na komponentu skalabilnosti PS. Nove tehnologije i materijali omogućuju dostizanje većih brzina na vretenima, upotrebu boljih presvlaka na reznim alatima ili bolje sustave hlađenja i podmazivanja. Korištenje strojeva s više od tri osi nude višu razinu fleksibilnosti, s obzirom na nove tržišne uvijete, takvi strojevi nisu značajnije skuplji od troosnih strojeva kada su integrirani u PS koji proizvode velike količine proizvoda. Novi sustavi izmjene alata te alati s više oštrica, omogućuju proizvodnim tvrtkama dodjelu više operacija na jednom proizvodnom kapacitetu te bržu i jednostavniju rekonfiguraciju. Utjecaj modernih elektroničkih komponenti te informatičkih sučelja značajno su ubrzali i olakšali mogućnost zamjene dijelova ili modula unutar proizvodne jedinice ili u konačnici cijelog PS. Znatno je poboljšana komunikacija između strojeva i osoblja te između samih strojeva koji su u mogućnosti međusobno komunicirati na razumljiv način te informirati o svim parametrima u realnom vremenu. Time su stvoreni preduvjeti za veći utjecaj sustava za automatizaciju i manipulaciju koji stvaraju nove koncepte PS približavajući ih modelima RPS.

Iz navedenih konstatacija, velikoserijske proizvodne tvrtke sve se više udaljavaju od modela NPS te grade PS temeljene na raznim konceptima CNC proizvodne opreme kao modula. Ovaj pomak u formiranju PS nudi više mogućnosti izbora pravilne konfiguracije. Konfiguracija sustava u kontekstu definicije rasporeda strojeva i međusobnog povezivanja ima značajan utjecaj na šest ključnih kriterija: trošak ulaganja u strojeve i alate, kvalitetu, propusnost, skalabilnost proizvodnih kapaciteta, broj tipova proizvoda i vrijeme pretvorbe sustava. Koren i sur. [47] navode da izbor konfiguracije sustava nije trivijalan te da broj konfiguracija koji se može kreirati sa i strojeva je veći od $2^{(i-1)}$ te da je oblik formiranja konfiguracije PS eksponencijalni problem. Iz navedenoga proizlazi potreba za stvaranjem sustavnih načela u konstrukciji konfiguracije i postizanju skalabilnosti sa što blažim inkrementom u cilju odabira pravilne konfiguracije i oblikovanju skalabilnih PS-a. Na području RPS-a sustavna metodologija konstrukcije je još u začetku i temelji se na znanstvenim spoznajama primjenom raznih heurističkih modela. Postoji

visoka razina diferencijacije s aspekta simetričnih i asimetričnih PS što je navedeno u poglavlju 4.2.2. U većini znanstvenih radova ne spominje se primjena RPS i skalabilnosti na postojećim proizvodnim kapacitetima u proizvodnim tvrtkama, već uglavnom kod konstruiranja novih proizvodnih procesa. U zadnjih desetak godina znatno se povećao broj znanstvenih radova iz područja skalabilnosti PS. Međutim, sustavne metodologije konstrukcije koja određuje optimalnu konfiguraciju, nema te stoga postoji mnogo prostora za istraživačke aktivnosti na ovom području.

4.4.1 Utjecaj konfiguracije na skalabilnost

Kao što je navedeno u Poglavlju 3, konfiguracije sustava određene su rasporedom strojeva i njihovim međusobnim vezama. U osnovi postoje tri konfiguracije: serijska proizvodna linija gdje su strojevi povezani jedan za drugim, zatim serijske proizvodne linije gdje se veza među strojevima ostvaruje međutransportom u obliku skretnica (eng. *crossover*) gdje se omogućuje izradcima prijenos iz jednog stroja, ne samo na sljedeći stroj u nizu, već i na jedan od paralelnih strojeva. Takvom konfiguracijom omogućena je obrada na bilo kojem paralelnom stroju uz određenu prilagodbu čime se u znatnoj mjeri umanjuje stvaranje uskih grla ili zastoja proizvodnje. Na koncu hibridna kombinacija dviju prethodnih varijanti koja omogućuje više kombinacija s aspekta postizanja vremena ciklusa izrade i dodjele operacija po pojedinom proizvodnom kapacitetu. Ovakvom konfiguracijom omogućeno je postavljanje više različitih tipova strojeva za svaku fazu obrade i definiraju se kao jednoprocenke [74]. U takvim konfiguracijama svaki dio prolazi kroz isti plan procesa i izvršava se na istom broju strojeva kao i svi ostali dijelovi, bez obzira na put odabran kroz sustav. U takvim slučajevima, svi strojevi složeni paralelno izvode točno isti skup operacija. Osim jednoprocenkih konfiguracija postoje i konfiguracije s varijabilnim procesima, prema slici 4.7, gdje se izratku mogu osigurati različiti planovi operacija koji se izvode na različitom broju strojeva, prema putanji koja slijedi kroz sustav. Koristeći ovaj tip konfiguracije otvorene su mnoge mogućnosti formiranja PS.



Slika 4.7 Konfiguracija varijabilnog procesa

Ovakvom strukturom prostornog rasporeda stvara se potreba za vrlo složenim i skupim logističkim i međuoperacijskim transportom, koji uvjetuje i veliku složenost svih okolnih čimbenika procesa (kontrola, održavanje, izrada dokumentacije i procedura, organizacija i sl.). U

industriji se uvijek teži ujednačenosti u proizvodnim tokovima, pa konfiguracija promjenjivih procesa postaje veliki izazov. Osim ovih složenih procesa, kao što je navedeno u poglavlju 3, postoje i ostale, jednostavne, konfiguracije kao što su čiste serijske konfiguracije gdje postoji samo jedan mogući put kojim prolazi izradak ili čista paralelna konfiguracija gdje su svi strojevi postavljeni paralelno jedan s drugim.

Da bi se postavio PS i izabrana optimalna konfiguracija, potrebno je utvrditi okvire unutar kojih će se proces odvijati tj. definirati duljinu i širinu konfiguracije. Iako je izbor konfiguracija sustava vrlo složen, mogu se utvrditi konačne granice s obzirom na minimalnu i maksimalnu duljinu puta u ovisnosti o broju operacija koje zahtjeva proizvodnja izratka i s time vezani broj strojeve kroz koje izradak prolazi.

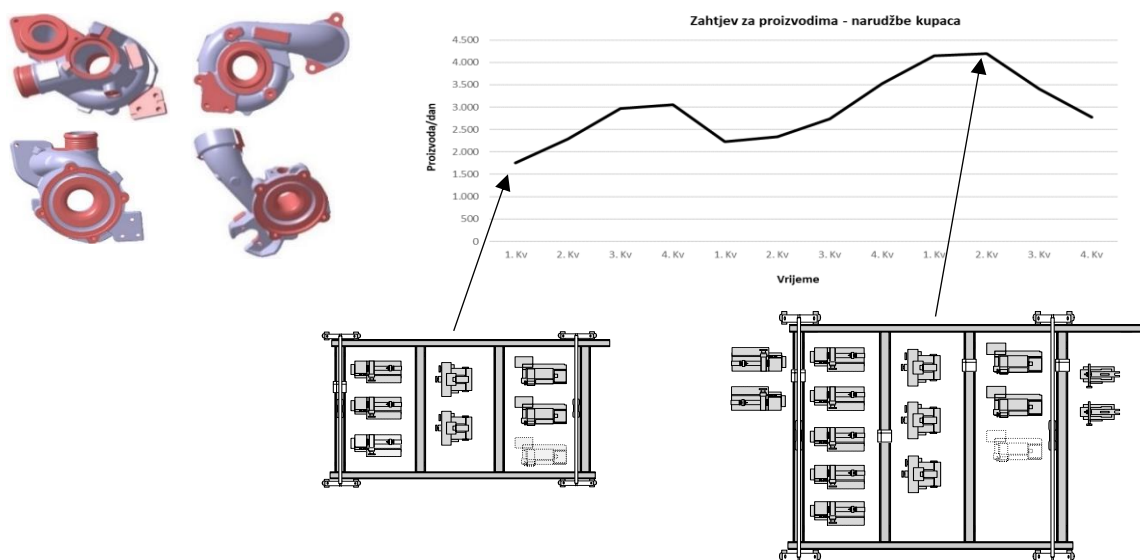
Duljina konfiguracije sustava, prema [74] ovisna je i o postavljenom procesu, prvenstveno o planu redoslijeda obrade te vremenima obrade dok je širina konfiguracije funkcija potrebnog proizvodnog kapaciteta i duljine konfiguracije, a ovisi o broju strojeva postavljenih u paraleli. Kod proizvodnje u velikim serijama procesi su postavljeni, u načelu, na način da se dodjeli samo jedno pozicioniranje za svaku operaciju. Uz koncept stezne naprave i postavljanom procesa, duljina konfiguracije ovisna je i o načinu balansiranja proizvodnih kapaciteta te potrebama za dodatnim operacijama kao što su posebni procesi obrade (pranje, testiranja propusnosti, kontrolni i montažni procesi i sl.). U tablici 4.2 dana su pravila koja određuju gornje i donje granice duljine i širine konfiguracije

Tablica 4.2 Pravila koja određuju gornju i donju granicu duljine i širine konfiguracije [74]

	Minimalna	Maksimalna
Dužina konfiguracije	Postiže se kada je maksimalni broj zahvata dodijeljen svakoj operaciji. Za jednostavne komponente, ako se svi zahvati mogu obaviti u jednoj operaciji, minimalna odgovarajuća duljina konfiguracije je jedan. Međutim, za složene strojne komponente, obično se zahtijeva nekoliko različitih operacija.	Postiže se kada se za svaku operaciju dodjeljuje samo jedan zahvat obrade. Za složeni izradak koji ima 10 zahvata, maksimalna dužina konfiguracije je 10 strojeva. Ovakva struktura stvara vrlo dugačak sustav, obično neuravnotežen, jer nisu poduzete mjere za usklađivanje proizvodne linije.
Širina konfiguracije	Postiže se kada je konfiguracija sustava na maksimalnoj ili blizu maksimalne dužine (tako da niti jedna operacija ne traje duže vremena od najdužeg zahvata). Tada svaka operacija ima kratko vrijeme ciklusa i zahtijeva nekoliko paralelnih strojeva čime se zadovoljava zahtjevima kapaciteta.	Postiže se kada je konfiguracija sustava na svojoj minimalnoj dužini. Svaka operacija ima dugo vrijeme ciklusa, te se zahtjeva mnogo paralelnih strojeva da bi se zadovoljili zahtjevi kapaciteta.

5 PROJEKTIRANJE KONCEPTA SKALABILNOG VIŠEPREDMETNOG RPS

Projektiranje PS, između ostaloga, ima za cilj poboljšanje propusnosti i skalabilnosti proizvodne konfiguracije u odnosu na dinamičko okruženje koje karakterizira brza izmjena proizvoda i variranje veličine serije. Potrebno je generirati optimalni put konfiguracije za određene scenarije potražnje, procesni plan, koncept i odabir proizvodne opreme u skladu s poslovnom strategijom tvrtke. Slika 5.1 prikazuje jedan od mogućih scenarija proizvodnih kapaciteta u predviđenom vremenskom horizontu za četiri zadana izratka.



Slika 5.1 Razvoj PS za predviđeni horizont

Put konfiguracije predstavlja vektor koji sadrži odgovarajuće projektne konfiguracije sustava u svakom od perioda potražnje. Skalabilni sustav dinamički se mijenja tijekom vremena kako bi osigurao točan proizvodni kapacitet upravo kada je to potrebno. Optimalni put konfiguracije je onaj koja ima minimalni početni trošak, uključujući troškove ulaganja, fiksne i varijabilne

troškove te troškove rekonfiguracije. Budući da je metodologija projektiranja skalabilnog proizvodnog sustava bazirana na horizontalnom pristupu kojeg definira vremenski horizont, optimalno rješenje puta konfiguracije se obnavlja u svakom vremenskom razdoblju kada su dostupne nove informacije o predviđenoj potražnji.

5.1 Pristup modeliranju skalabilnog višepredmetnog RPS

5.1.1 Razvoj modela

Razvoj modela temelji se na osnovnim načelima konstrukcije PS koji reguliraju proces skalabilnosti. U ovom radu analiziran je RPS, dizajniran za grupu proizvoda određene mješavine (udjeli pojedinih proizvoda u ukupnoj količini) i obujma proizvodnje, koji odgovara jednoj proizvodnoj konfiguraciji. Kako se zahtjevi kupaca mijenjaju s vremenom, i konfiguracije RPS-a evoluiraju s vremenom. U okruženju gdje proizvodni proces počinje tek nakon primitka narudžbe kupca, za mješavinu proizvoda i/ili promjenu obujma u nadolazećem razdoblju, pragmatično je uzeti u obzir samo trenutni zahtjev za potražnjom i konfiguracijski odabir za sljedeći zahtjev. Razvijeni algoritam ima mogućnost, na osnovu prognoza o količinama, formirati scenarije koji prikazuju odgovarajuće konfiguracije i u narednim periodima potražnje.

Rješavanju takvih algoritama kao optimizacijskog problema, pristupili su Youssef i ElMaraghy [95] generiranjem konfiguracija koje se reguliraju identifikacijom određenih ekonomskih parametara među svim izvedivim konfiguracijama bez obzira na predviđenu glatkoću rekonfiguracija između uzastopnih konfiguracija za više proizvoda sa srednjim do velikim proizvodnim količinama. Tang [96] ističe da je proizvodnja u konfiguraciji višepredmetnih proizvodnih linija ekonomičnija od proizvodnje pojedinog proizvoda odvojeno na zasebnom PS-ima (manji troškovi manipulativne opreme, držača alata, osoblja) uz isti broj strojeva. Prednosti višepredmetnih PS jesu njezina prilagodljivost, bolje mogućnosti skaliranja te raspoloživost. Moderna RPS arhitektura sastavljena je od više faza obrade što predstavlja više paralelne CNC proizvodne opreme u svakoj fazi obrade, koji izvode točno isti slijed zadataka. Svaka faza obrade ima transportere ili manipulatore koji vrše manipulaciju izradcima (uz mogućnost manipulacije steznom opremom i alatima) te ih dovode do točno predviđenog stroja uvjetovano redoslijedom obrade. Primjenom manipulativnih sustava izradak koji se obrađuje na stroju u jednoj fazi obrade može se prenijeti na bilo koji stroj u sljedećoj fazi sustavom križanja, kako je prikazano na slici 3.9. Jedno od kritičnih pitanja u učinkovitom funkcioniranju svakog PS je uravnoteženje njegovog rada. Balansiranje sustava znači da svaka CNC proizvodna oprema duž proizvodne linije ima gotovo isto vrijeme ciklusa tako da je vrijeme mirovanja kada neki strojevi izvršavaju svoje zadatke brže od drugih strojeva u sustavu minimalno. Balansiranje sustava omogućuje

sinkronizaciju operacija i bitno je za postizanje visoke propusnosti. Balansiranje sustava se obično postiže pomicanjem operacija između strojeva u sustavu, ali to se također može postići skaliranjem kapaciteta pojedinih dijelova opreme. Praktični pristup povećanju kapaciteta RPS-a je dodavanje CNC proizvodne opreme postojećim PS. Međutim, postizanje isplative skalabilnosti ovisi o izvornom dizajnu sustava. Konfiguracije sustava i fleksibilnost sustava dvije su različite karakteristike gdje konfiguracija sustava ovisi o rasporedu strojeva u sustavu i načinu na koji su spojeni dok fleksibilnost sustava ovisi o tipu strojeva i metodi spajanja. Prema [74] dana su dva osnovna načela dizajna skalabilnih sustava s obzirom na isti broj i vrstu strojeva:

- kratke paralelne konfiguracije sustava s preklapanjem imat će veći protok od duljih konfiguracija sustava. Stoga je potrebno manje strojeva za zadani kapacitet,
- kratke paralelne konfiguracije sustava mogu bolje skalirati kapacitet u manjim koracima (dupliciranjem strojeva paralelno) nego dulje konfiguracije sustava.

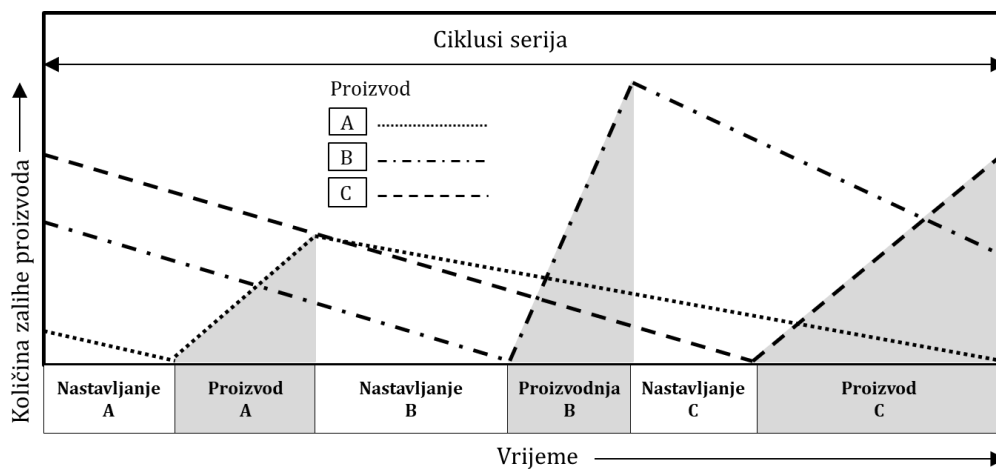
Ova dva principa pokazuju da su kratke paralelne konfiguracije sustava poželjne za pronalaženje optimalne skalabilnosti. Budući da se prema prvom načelu navodi da je protok veći u kratkim paralelnim sustavima s istim brojem strojeva, to znači da će kratki paralelni sustavi koštati manje od duljih sustava za isti kapacitet. Prema drugom načelu, paralelno umnožavanje strojeva omogućuju skalabilnost bez potrebe za novom konstrukcijom stroja ili promjenama procesnih planova. Proizlazi da se konstrukcija sustava treba temeljiti na kratkim paralelnim konfiguracijama sustava s preklapanjem [96].

Metodologija projektiranja skalabilnog višepredmetnog RPS u ovom radu uključuje više tipova CNC obradnih strojeva s jednim ili više vretena, malih skladišta reznih alata s unaprijed pripremljenim upravljačkim sustavom, koji se mogu dodati ili oduzeti kod promjene zahtjeva za kapacitetom. Stoga se skalabilnost postiže dodavanjem ili oduzimanjem cijelih strojeva paralelno ili u liniju. Logistika i manipulacija izradcima i opremom (stezne naprave, rezni alati i držači) vrši se bez formiranja međuskalidišta na proizvodnim linijama, a povezani su putem upravljačkih sustava koji manipuliraju cijelim sustavom.

Prikazani osnovni elementi modela VRPS i dana osnovna načela u rješavanju optimalne skalabilnosti mogu dati osnovu za rješenje problema skalabilne konstrukcije PS, budući da se potražnja mijenja tijekom vremena. Jedan od načina je korištenje metode cjelobrojnog linearnog programiranja [73] za izračun optimalnog broja strojeva u svakoj fazi obrade te optimalne konfiguraciju svakog stroja, kako bi trošak ulaganja bio minimalan u svakom periodu potražnje. Konačni rezultat je dinamička konfiguracija sustava u više perioda potražnje, koja predstavlja vektor za svaki vremenski period. I drugi elementi proizvodnje se također mogu uključiti u model kao što su fiksni i varijabilni operativni troškovi ili zastoji strojeva uslijed kvara. Kada postoji više vremenskih intervala ili razdoblja, potražnja predstavlja jednodimenzionalni vektor koji sadrži

potražnju svake godine. Ostala dva vektora, broj strojeva s definiranom konfiguracijom i broj faza obrade tvore trodimenzionalni vektor koji sadrži rješenje optimalne konfiguracije svakog perioda potražnje.

Na osnovi poznatih vrijednosti može se definirati minimalni broj strojeva određene konfiguracije koji se zahtijevaju u predviđenoj fazi obrade u određenom periodu potražnje. Kada se na istoj liniji proizvodi više proizvoda važno je poznavati kakvi će biti ciklusi rotacije, učestalost i dinamika serija pojedinih proizvoda, slika 5.2 [73]. Kako je uvijek potrebno vrijeme za prilagodbu sustava novom proizvodu, cilj je održati serije čim većima kako bi udio vremena prilagodbe bio što kraći, a unutar grupe proizvoda potražiti konstrukcijski vrlo bliske proizvode i formirati klastere proizvoda.



Slika 5.2 Ciklusi rotacije proizvodnje serija izradaka

Suprotno takvom razmišljanju, a zbog dinamične potražnje različitih proizvoda unutar grupe proizvoda, potrebno je češće mijenjati serije što uključuje češće pripreme stroja (eng. *set-up time*) čime se povećavaju troškovi proizvodnje. Stoga se mora uspostaviti ravnoteža između troškova pripreme stroja i troškova čekanja na raspoložive proizvodne kapacitete.

Sljedeći faktor koji utječe na formiranje optimalne skalabilne konfiguracije je način na koji odluka o doziranju serije utječe na kapacitet proizvodne opreme jer svaki proizvod može imati različitu razinu proizvodnje (potražnje) na određenoj proizvodnoj opremi. Proizvodni kapacitet PS iz tog razloga mora biti dovoljno visok da omogući proizvodnju svih proizvoda. Ako je vrijeme pripreme stroja opreme učestalo, što predstavlja neproduktivni dio ciklusa, nužno je instalirati više opreme kako bi se nadoknadio neproduktivni dio vremena pripreme stroja. Krajnji rezultat je informacija u kojoj odluka o veličini serije i vrijeme pripreme proizvodne opreme sustava utječu na količinu i konfiguraciju strojeva u PS.

5.1.2 Izračun troška rekonfiguracije skalabilnog sustava

Trošak rekonfiguracije važan je za dobivanje točnije procjene troškova životnog ciklusa konfiguracijskog puta skalabilnog PS te za donošenje odluka hoće li se unaprijed kupiti višak kapaciteta, kako bi se izbjegli skupi gubici u proizvodnji kada se sustav isključi radi procesa rekonfiguracije. Izračunava se kao funkcija aktivnosti potrebne za kupnju, prodaju i premještanje pojedinih strojeva unutar skalabilnog PS. Na slici 5.3 prikazan je primjer rekonfiguracije PS sa istim strojevima u svakoj fazi obrade. Iz slike je vidljivo da se kod prijelaznog perioda potražnje iz u u $u + 1$ dešavaju određene promjene te je zbog potrebnih kapaciteta, potrebno instalirati dodatne dvije CNC bušilice u fazi obrade 1, jednu CNC tokarilicu u fazi obrade 3, a zbog promjene u konstrukciji izratka koji dobiva karakteristike novog izratka, potrebno je deinstalirati jednu CNC glodalicu za fazi obrade 2. Obzirom na ovu jednostavnu strukturu skalabilnog sustava potrebno je zbrojiti i oduzeti ukupan broj strojeva u pojedinim periodima potražnje. Izraz (5.1) i (5.2) opisuju kako odrediti rad rekonfiguracije u prijelazu iz jedne konfiguracije PS u drugi bez obzira o tipu stroja u pojedinoj fazi obrade [73].

$$S_{uSKi} = \max \left[0, \left(\sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S (M_{sfu+1}) \right) - \left(\sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S (M_{sfu}) \right) \right] \quad (5.1)$$

$$S_{uSPi} = \max \left[0, \left(\sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S (M_{sfu}) \right) - \left(\sum_{f=1}^F \sum_{s=1}^S (M_{sfu+1}) \right) \right] \quad (5.2)$$

pri čemu je:

M_{sfPP} broj strojeva s -te konfiguracije potrebnih u f -toj fazi obrade u PP u

S_{uSKi} broj dodanih strojeva u sustavu za promjenu iz periodu potražnje u u $u + 1$

S_{uSPi} broj oduzetih strojeva u sustavu za promjenu iz periodu potražnje u u $u + 1$

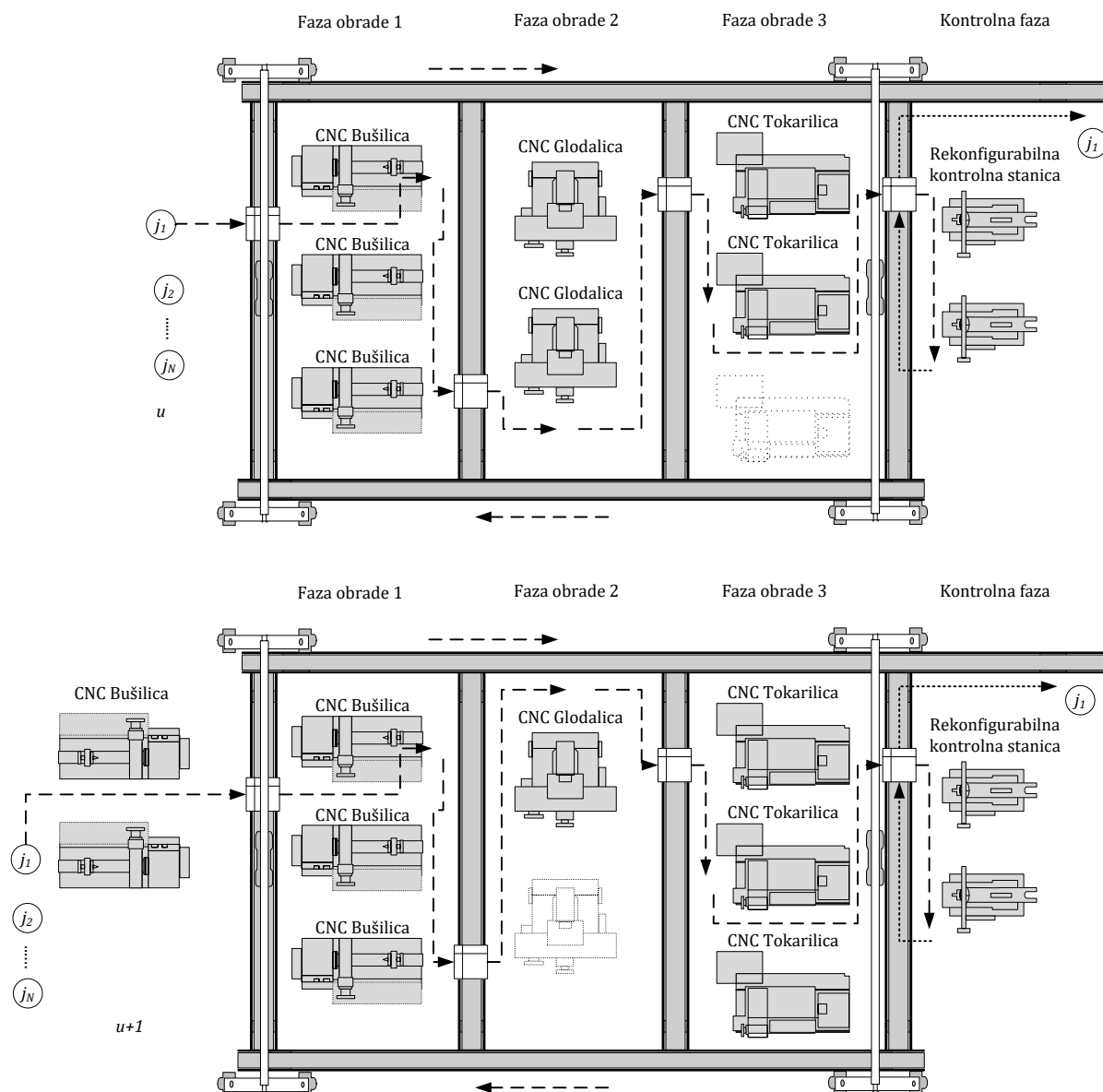
Da bi se izračunao ukupni broj strojeva promjenjenih u sustavu S_p , potrebno je uzeti u obzir kretanje strojeva unutar i između faza obrada. To se može izračunati pomoću izraza (5.3):

$$S_p = \max(0, S_{uSKi} - S_{uSPi}) \quad (5.3)$$

pri čemu je:

S_p ukupni broj strojeva promjenjenih u sustavu

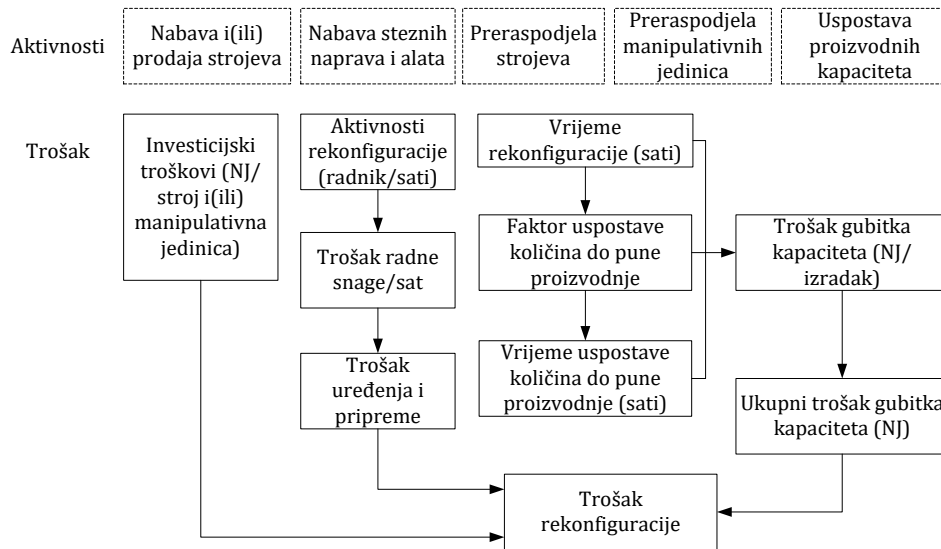
Nadalje, troškove koje treba uzeti u obzir jesu početni troškovi, fizički troškovi izvršenja rekonfiguracije i troškovi izgubljenog kapaciteta uslijed potrebnog vremena za izvršenje rekonfiguracije.



Slika 5.3 Rekonfiguracija skalabilnog RPS

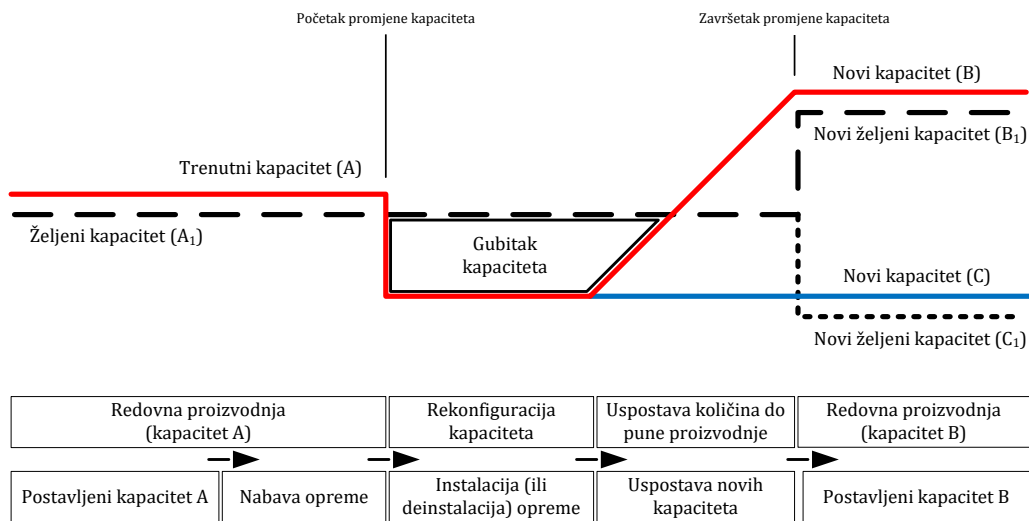
Na slici 5.4 prikazani je proces izračuna rekonfiguracije koji proizlazi iz konstatacije da PS može funkcionirati u tri različite faze: normalna proizvodnja, faza rekonfiguracije i faza pripreme opreme u sustavu. Pretpostavlja se da većinu vremena sustav radi konstantnim kapacitetom u optimalnom načinu proizvodnje. Međutim, povećanjem (ili padom) potražnje, dolazi do potrebe povećanja (ili smanjenja) kapaciteta PS. Tada dolazi do rekonfiguracije s namjerom dodavanja ili oduzimanja opreme kako bi se postigao novi proizvodni kapacitet.

Neposredno prije rekonfiguracije, javlja se vremensko kašnjenje sve do onog momenta dok se ne uspostavi rad novokonfigurirane opreme (dodavanje ili oduzimanje strojeva). Tijekom rekonfiguracije, sustav održava kapacitet ili gubi dio kapaciteta zbog potrebe za isključivanjem strojeva ili manipulativne opreme.



Slika 5.4 Izračun troška rekonfiguracije

Nakon rekonfiguracije, sustav prolazi kroz vrijeme pripreme proizvodnje i uspostave novih kapaciteta, a tijekom toga vremena potrebno je otkloniti sva odstupanja u funkcioniranju sustava i postepeno povećavati kapacitet do željene vrijednosti, kao što je prikazano na slici 5.5.



Slika 5.5 Proces skaliranja kapaciteta [99, 102]

5.2 Formulacija algoritma za višestruki vremenski period

Pristup objašnjen u prethodnom poglavlju temelji se na principu linearnog programiranja, a koriste se samo ciljne linearne funkcije i linearna ograničenja. Ako je promatrani problem linearan (što znači da su funkcija cilja i ograničenja sve linearne funkcije varijable odluke), pristup rješavanja linearnim programiranjem je idealan način rješavanja takvog problema. Međutim, za izračun troškova rekonfiguracije željene skalabilne arhitekture koristi se nelinearna funkcija

varijabli odluke. Stoga je za poboljšanje rješenja na temelju troškova rekonfiguracije potrebno primijeniti drugačije numeričke tehnike za rješavanje problema skalabilnog dizajna. Dodatni ograničavajući faktori linearnog programiranja jesu veličina prostora pretraživanja i cjelobrojno ograničenje varijabli odluke.

Osnovna karakteristika RPS-a je njegova sposobnost promjene konfiguracije radi osiguranja potrebne funkcionalnosti i kapaciteta kada je to potrebno, kombiniranjem visoke propusnosti NPS i fleksibilnosti FPS. Stoga je potreban postupak odabira RPS konfiguracije koje ne samo da može udovoljiti zahtjevima potražnje svakog odgovarajućeg razdoblja, već osigurava i ekonomičan pristup u pogledu svojih početnih troškova ulaganja. Ovo je problem optimizacije koji mora uključivati različite aspekte konfiguracije u kojoj su bili obuhvaćeni svi parametri koji utječu na izvedivost i optimalni početni trošak konfiguracije.

U novije vrijeme se takvi problemi optimizacije konfiguracija RPS rješavaju heurističkim metodama među kojima je i metoda GA pa je u ovom radu, za vrlo kompliciranu ciljnu funkcija i odabir konfiguracija na razini sustava, predložena navedena metoda. Korištenjem modela, formiranim GA, osim troškova rekonfiguracije mogu se analizirati i propusnost PS, oportunitetni trošak između troškova vremena pripreme procesa i proizvodnje do pune količine, troškovi zastoja i investicijski troškovi, kao i konačna veličina međuskладиšta ako se postavi takav PS. Osnovni razlog korištenja GA je:

- mogućnost podrške za model veće složenosti gdje cjelokupno rješenje postaje poželjnije od rješenja temeljenog na linearnom programiranju,
- jednostavnost uporabe i brža izrada modela (ili programa),
- široka primjenjivost,
- dobro performanse za širok raspon različitih problema,
- brzina izračuna.

Većina dosadašnjih radova na ovom istraživačkom polju temelje se na konfiguracijskim problemima iz jedne perspektive konfiguracije, odnosno s fizičkim rasporedom strojeva [47, 77, 102-104] ili se bave konfiguracijom kao konceptom u različitim studijama slučaja [52, 105-109]. Oba trenda nisu uzimala u obzir automatsko stvaranje izvedivih alternativnih konfiguracija za različite scenarije potražnje i smatrali su uski skup izvedivih konfiguracija u postupku odabira. Upotreba algoritama, poput GA [110, 112], za generiranje izvedivih alternativa i odabir najboljeg rješenja, ključan je za izračun i formiranje optimalne konfiguracije. Uveden je pristup konstrukcije proizvodnih višepredmetnih linija [90, 94, 100, 113] upotrebom formulacije GA (i ostalih heurističkih metoda) za snimanje konfiguracije i dodjele zadataka koristeći minimalni omjer troškova i propusnosti kao kriterij za funkciju dobrote. Npr., Tang i sur. [111] koristili su ovaj pristup kako bi dokazali da je za isti broj strojeva višepredmetni PS bolji od tradicionalnog

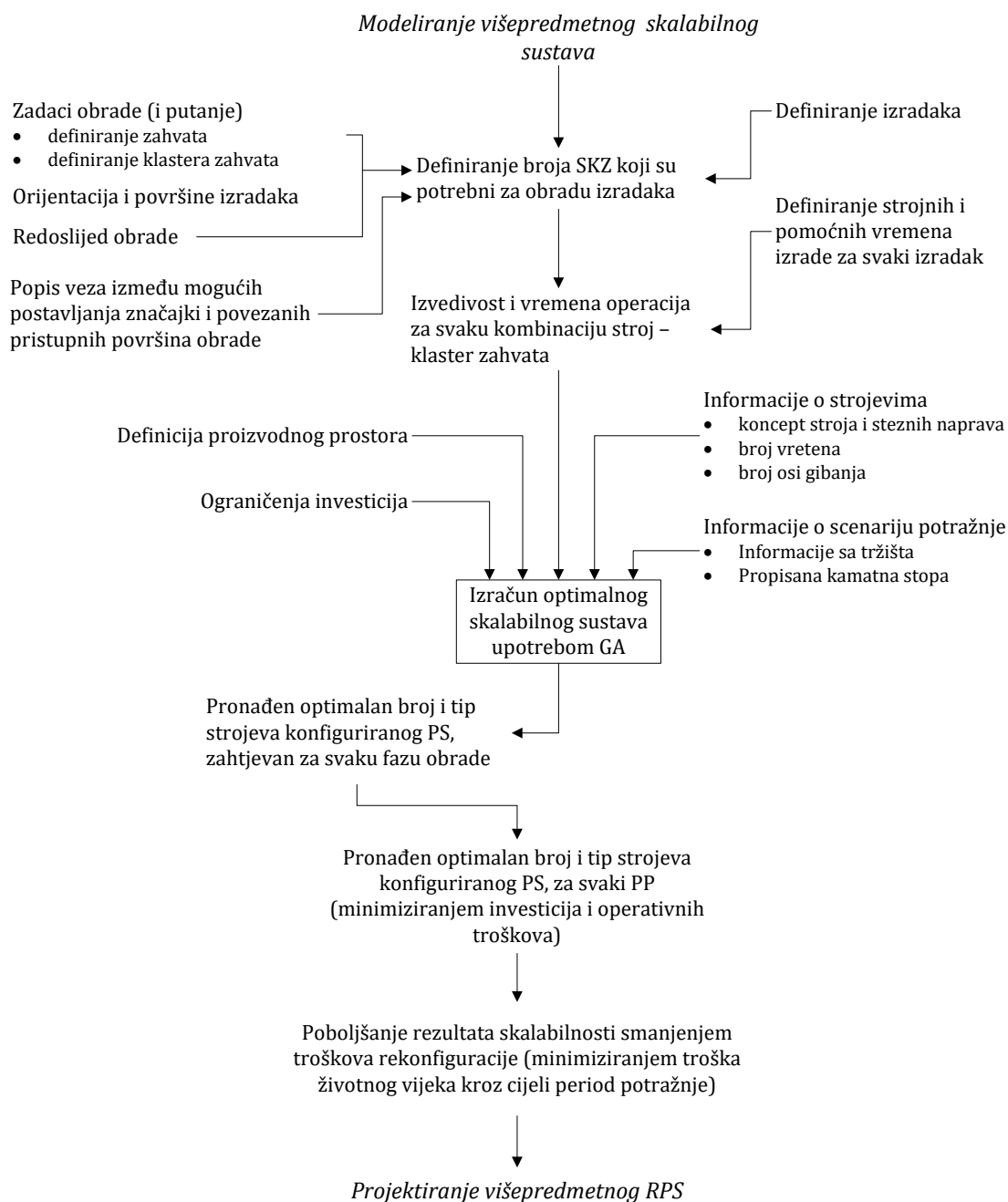
jednoprjedmetnog PS u smislu troška sustava. Prema [111] pretpostavlja se da konstruktor unaprijed definira broj proizvodnih faza obrade i da svaki izradak mora proći sve faze obrade u PS što pojednostavljuje problem, ali utječe na kvalitetu rezultata zanemarujući ostale mogućnosti za konfiguraciju sustava. Istraživački radovi koji su obrađivali više aspekata konfiguracije ili se bavili scenarijima potražnje za jednoprjedmetne PS, opisani su u [77, 112]. Također, dani su postupci modeliranja i optimizacije višepredmetnih RPS konfiguracija koji uključuju raspored strojeva (tj. broj faza obrade i broj paralelnih strojeva po fazi obrade), odabir opreme (tj. tip stroja i odgovarajuće konfiguracije stroja za svaku fazu obrade) i dodjeljivanje operacija [101, 113]. GA koriste se i za stvaranje i procjenu konfiguracija PS na temelju postupka mapiranja koji jamči izvedivost generiranih alternativa.

Na slici 5.6 prikazan je dijagram toka informacija za modeliranje višepredmetnog skalabilnog PS kojim su opisani glavni elementi za formiranje modela. Prikazani su ulazni parametri, postupci i izlazne vrijednosti te povezanost s raspodjelom klastera zahvata u ovisnosti s balansiranjem proizvodnih kapaciteta i procjenom vremena ciklusa. Modeliranjem skalabilnog sustava generiraju se informacije o novonastalom PS i stvara se baza koja će sadržavati sve podatke važne za funkcioniranje PS što predstavlja integralan i cjelovit postupak.

Na temelju takvih podataka pristupa se projektiranju rekonfigurabilnog PS te se donose odluke o preraspodjeli proizvodnih kapaciteta u realnoj proizvodnji. U fazi projektiranja mogu se analizirati troškovi resursa (osoblja), vremenski period proizvodnje, varijabilni troškovi i životni vijek reznih i steznih alata po operaciji i izratku za svaku konfiguraciju, troškovi manipulativnih i transportnih sustava te kontrolnih sustava ako su uključeni direktno u proizvodni ciklus (te analize nisu predmet ovog rada). Nadalje, definicijom izratka, odabranih strojeva i redoslijedom obrade analiziraju se ulazni troškovi rekonfiguracije, vrijeme instalacije te zaključno izračun fiksnih i varijabilnih troškova po izratku za svaku operaciju i za svaku konfiguraciju.

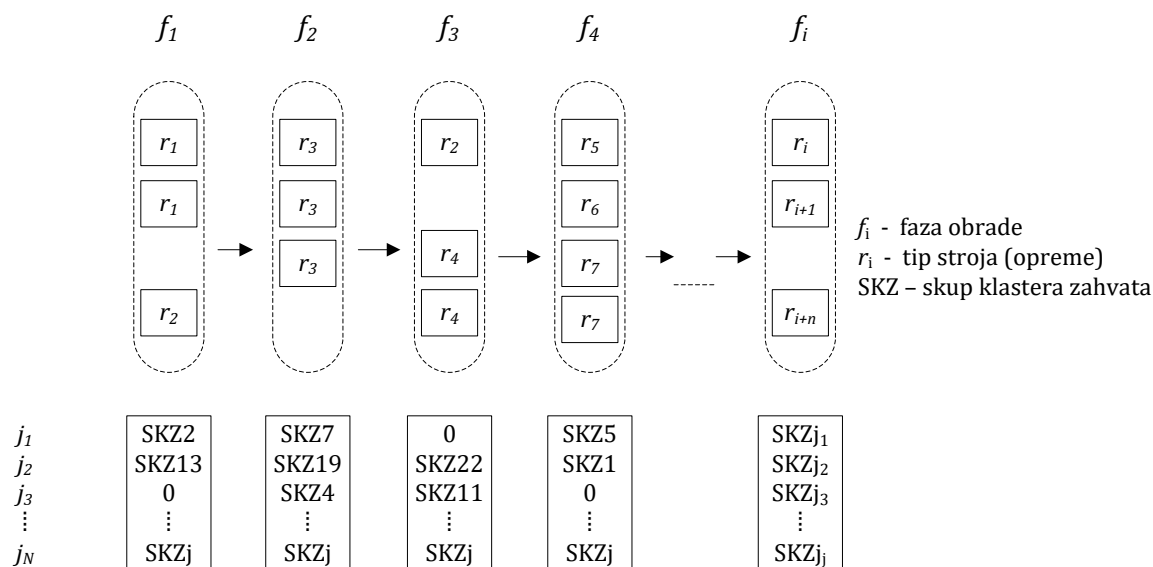
5.2.1 Struktura višepredmetne konfiguracije RPS

Pri odlučivanju o osnovnoj strukturi višepredmetnog RPS-a, u ovom radu, razmatraju se srednje do velike količine proizvodnog programa, uz zahtijevanu visoku skalabilnost kapaciteta, s mogućnošću pružanja točno takvog kapaciteta i funkcionalnosti za svaki PP, koja udovoljava postavljenim zahtjevima za grupu proizvoda. Prema tome, život vijek RPS-a sastoji se od više od jednog u , od kojih svaki ima određeno trajanje i odgovarajući scenarij potražnje koji odražava mješavinu proizvoda i zahtjeve kapaciteta sustava tijekom tog trajanja. Kako se zahtjevi za potražnjom mijenjaju s vremenom, u skladu s time i konfiguracije RPS evoluiraju s vremenom.



Slika 5.6 Dijagram toka informacija za modeliranje višepredmetnog skalabilnog sustava

Linijski PS, može zadovoljiti visoke potrebe za količinom proizvodnje, a faze obrade mogu imati postavljeno više paralelnih strojeva što će umanjiti učinak (i time trošak) kvara ili zastoja bilo kojeg od strojeva. Takav oblik olakšava skalabilnost i sinkronizira različite faze obrade kako bi se dobilo maksimalno iskorištenje raspoložive proizvodne opreme. Nadalje, ovakav PS omogućuje i korištenje različitih tipova strojeva koji će izvoditi identične radne zadatke u različitim fazama obrade. Na slici 5.7 prikazan je primjer odabrane višepredmetne konfiguracije u određenom konfiguracijskom razdoblju koja može proizvesti više različitih tipova izradaka unutar grupe proizvoda.



Slika 5.7 Primjer odabrane višepredmetne konfiguracije

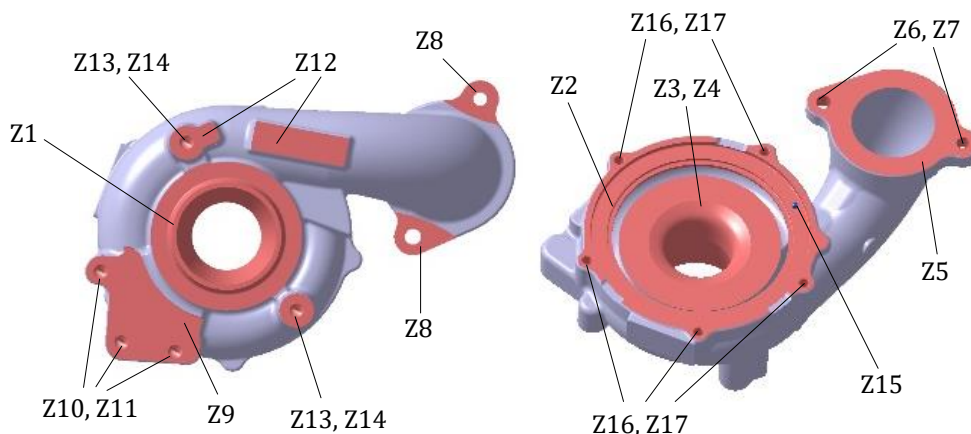
Konfiguracija sadrži niz faza obrade koje imaju svoju lokaciju (relativnu u odnosu na raspoloživi prostor) od kojih svaka sadrži skup paralelnih istih ili različitih strojeva. Svaka faza obrade predstavljena je informacijama o tipu stroja s njegovom pripadajućom konfiguracijom, brojem strojeva te dodijeljenom skupu klastera zahvata (SKZ). Svaki SKZ predstavlja strojne operacije koje se izvode na određenim strojevima. Nule znače da se faza obrade ne koristi za taj određeni tip izratka.

5.2.2 Struktura obrade i elementi proizvodnog procesa

Prema [67] u proizvodnji svakog izratka potrebno je određeno tehnološko vrijeme s ciljem promjene dimenzije, oblika, položaja ili svojstva, koje se vrši na jednom proizvodnom kapacitetu u kontinuitetu, u jednom stezanju. To je u osnovi definicija operacije koja započinje uzimanjem izratka radi stezanja i završava odlaganjem izratka zbog transporta ili manipulacije. U okviru strukture operacije, pojedina aktivnost unutar operacije naziva se zahvat i obuhvaća obradu jednim reznim alatom uz iste režime rada. Da bi se omogućila pravovaljana raspodjela obrade na odabrane proizvodne kapacitete, u skladu s ciljevima skalabilnosti i redosljedom operacija, potrebno je analizirati svaki zahvat u procesu te ih grupirati na način da se postiže najkraće vrijeme obrade. Zahvati predstavljaju osnovnu tehnološku mjeru kojom se opisuje jedinična obrada s definiranim vremenom izrade. Može postojati nekoliko alternativnih zahvata za obradu geometrijskih značajki. Na primjer, bušenje i izrada navoja mogu biti jedan mogući skup strojnih zahvata (Z_a) za izradu provrta (radi jednostavnosti u prikazima tehnološkog koncepta obrade, Z_a je prikazan kao Z. No centriranje, bušenje i izrada navoja mogu biti još jedna alternativa. Ako je dopušten ovaj alternativni izbor, tada će konstrukcija konfiguracije procesa biti složenija.

Složeniju razinu predstavlja klaster zahvata (KZ), skup zahvata koje su uvijek obrađuju zajedno, određenim redoslijedom (uslijed različitih vrsta ograničenja kao što su logička ograničenja ili atributi vremenskih ograničenja). Ako se ti skupovi međusobno ne preklapaju i uključuju sve potrebne zahvate, tada su skupovi definirani kao klasteri zahvata. Narednu, višu razinu formiranja zahvata čine SKZ koji su definirani jednim ili više KZ i mogu se izvoditi zajedno na određenom tipu stroja, određene strojne konfiguracije. SKZ se mogu preklapati s drugim SKZ. Samo jednom isti SKZ može biti dodijeljen stroju u konstrukciji konfiguracije. Na slici 5.8 dano je pojašnjenje veza između Z, KZ i SKZ.

Jednom kada su definirani zahvati za određeni izradak, mogu se pronaći odnosi prioriteta tih zahvata na temelju logičkog slijeda te postavljenih standarada i prakse u postupcima obrade. Ti će odnosi odlučivati o redoslijedu obrade (eng. *precedence relationship*) među KZ te će biti jedinstveni za svaki izradak.



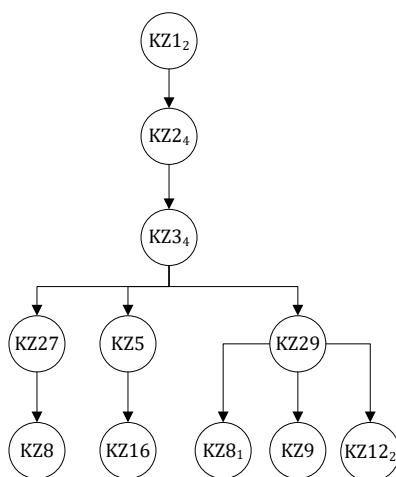
Skup klastera zahvata	Klaster zahvata	Zahvati
SKZ1	KZ1	Z1
SKZ2	KZ2	Z2
SKZ3	KZ3	Z3, Z4
SKZ4	KZ4	Z5, Z6, Z7
SKZ5	KZ5	Z12
SKZ6	KZ6	Z8
SKZ7	KZ7	Z9, Z10, Z11
SKZ8	KZ8	Z13, Z14
SKZ9	KZ9	Z15
SKZ10	KZ10	Z16, Z17
SKZ11	KZ2, KZ3	Z2, Z3, Z4
SKZ12	KZ9, KZ10	Z15, Z16, Z17
SKZ13	KZ4, KZ9, KZ10	Z5, Z6, Z7, Z15, Z16, Z17
SKZ14	KZ5, KZ6, KZ7, KZ8	Z12, Z8, Z9, Z10, Z11, Z13, Z14
SKZ15	KZ4, KZ5, KZ6, KZ7, KZ8, KZ9, KZ10	Z5, Z6, Z7, Z8, Z9, Z10, Z11, Z12, Z13, Z14, Z15, Z16, Z17
SKZ16	KZ1, KZ2, KZ3, KZ4, KZ5, KZ6, KZ7, KZ8, KZ9	svi zahvati

Slika 5.8 Veza između Z (Z_a), KZ i SKZ

Da bi povezali zahvate i sproveli obradu izratka, potrebno je poznavati strojni park kao osnovni gradbeni element RPS. U ovom radu izabrani su klasični fleksibilni CNC obradni strojevi povezani manipulativnom sredstvima čiji je koncept ovisan o tehnološkim zahtjevima za obradu pojedinog izratka. Zbog karakteristika fleksibilnosti takve opreme, obično postoji nekoliko alternativa za svaki SKZ gdje pojedini strojevi mogu izvršiti određene SKZ, ali ne i neke druge što se mora uzeti u obzir prilikom dodjele nekoliko SKZ-a istom stroju.

Prema gore navedenom pojašnjenju karakteristika SKZ, njihov broj je obično veći od broja KZ. Kako je cilj uspostaviti izvedivi skalabilni višepredmetni RPS, ključni su odabir i dodjela SKZ. Odabir tih vrijednosti temelji se na odnosima između SKZ i KZ što je prikazano slikom 5.8. Za izradu određenog proizvoda svi KZ moraju se izvoditi u određenom redosljedu i kao takvi odgovaraju izvedivom KZ nizu (IKZ). IKZ izratka je niz KZ-a uključujući sve KZ koji prate ograničenja redosljeda među KZ-ima. Odnos redosljeda među KZ definiran je grafikonom redosljeda (sinoptika procesa obrade) (eng. *precedence graph*), prikazanom na slici 5.9 što predstavlja usmjereni aciklički dijagram [113].

U grafikonu, naslici 5.9 svaki krug predstavlja čvor tj. KZ, a strelica redosljed obrade. Čvor i prethodi čvoru j ako postoji luk koji počinje s i završava na j . U ovom se radu kao dodijeljeni zadatak u izračunu umjesto KZ koristi SKZ (gdje SKZ može sadržavati i samo jedan KZ). Da bi se obradio izradak, odabrani SKZ-i se izvode duž PS-a i time čine izvediv SKZ (ISKZ) niz.



Slika 5.9 Primjer grafikona odnosa redosljeda KZ ili sinoptika procesa obrade

ISKZ za izradak predstavlja slijed SKZ-a uključujući sve KZ bez preklapanja promatrajući ograničenja prioriteta među SKZ u tom slijedu. Za svaki izradak, povezani ISKZ-i mogu biti izvedeni iz IKZ-a toga izratka [114]. Za svaki izradak iz grupe proizvoda, odabirani SKZ-a i njegova dodjela trebaju pronaći ISKZ i podijeliti ISKZ u nekoliko udjela, dok su SKZ-i u svakom udjelu dodijeljeni jednom stroju. Dodjeljivanja svakog udjela svakog ISKZ -a za svaki izradak na jedan

stroj duž PS predstavlja izvedivu SKZ dodjelu (ISKZD). Proizlazi iz definicije da, što je više ISKZ-a za svaki izradak, to je više brojeva ISKZD-a.

SKZ-ovi su klasificirani u dvije kategorije, jednostavni, koji se odnosi na operacijski sustav koji sadrži samo jedan KZ, u tablici prikazanoj na slici 5.8, od SKZ1 do SKZ10 i složeni SKZ, od SKZ11 do SKZ16, koji se odnosi na operacijski sustav koji sadrži dva ili više KZ-a. Zapravo svaki KZ uvijek odgovara jednom SKZ koji sadrži taj KZ. Kod ovako složenog PS koji sadrži veliki broj kombinacija redosljeda obrade za pripadajuće strojeve, problem je pronaći sve topološke vrste u grafikonu redosljeda te kao takav predstavlja NP-teški problem (eng. *NP-hard problem*)⁵ [101, 115]. Iz slike 5.8 proizlazi da je broj ISKZ, sastavljen od jednostavnih SKZ, jednak broju ISKZ-a, dok, što je veći broj složenih SKZ-a, veći je broj i ISKZ-a. Budući da generacije svih ISKZ za svaki izradak predstavlja temelj za generiranje svih ISKZD, generacija svih ISKZD-a je računalno neupitna. Izvediv linijski skalabilni PS svakako mora biti povezan s ISKZD dok jedan ISKZD obično odgovara vezi više od jedne moguće proizvodne linije. Što je broj ISKZD veći, to je složenost pretraživačkog prostora veća. Složenost pretraživačkog prostora uvjetuje razvoj učinkovitih rješenja za rješavanje problema konfiguracije linijskih skalabilnih PS srednjih i velikih količina [114]. Za formiranje algoritma potrebno je definirati sljedeće parametre vezano uz strukturu obrade i postavljanje tehnološkog procesa:

Z_j	skup zahvata potrebnih za izradu j -tog izratka,
KZ_j	skup klastera zahvata potrebnih za izradu j -tog izratka,
SKZ_j	skup skupova klastera zahvata potrebnih za izradu j -tog izratka
kz_{jl}	l -ti KZ za j -ti izradak,
skz_{jp}	p -ti SKZ za j -ti izradak,
$\rho_{kz_{jl}, skz_{jp}}$	odnos između l -tog KZ i p -tog SKZ j -tog izratka
	$\rho_{kz_{jl}, skz_{jp}} = \begin{cases} 1, & \text{ako je } KZ_j, kz_{jl} \in KZ_j \text{ uključen u } SKZ_j, skz_{jp} \\ 0, & \text{inače} \end{cases}$
$\sigma_{kz_{jp}, skz_{jr}}$	binarni parametar koji je 1 kada SKZ, skz_{jp} uključuje bilo koji KZ koji prethodi SKZ, skz_{jr}

5.2.3 Zahtjevi potražnje

Zahtjevi potražnje količina po tipovima proizvoda te njihova mješavina predstavljaju jedan od glavnih varijabilnih parametara kao i zahtjevi za izmjene u proizvodnji u određenom KR (osim u trajanja procesa rekonfiguracije koji predstavlja period sa fiksnim scenarijem potražnje). U praksi je nemoguće točno znati sve buduće proizvode pri konstruiranju novog PS ili rekonfiguraciji

⁵ U problemima optimizacije često se pojavljuju NP-teški problemi (eng. *non.polynomial har problems*), a to su zadaci koji se ne mogu rješavati u polinomskom vremenu $t = Nk$ gdje je N dimenzija problema, a k je konstanta.

postojećeg. Iako je razumno misliti da je početni skup proizvoda poznat kao početna faza projektiranja sustava, vrlo je vjerojatno da će tijekom životnog ciklusa sustava doći do promjena u tipovima i količinama proizvoda. Proizvodi koji će se proizvoditi u nekoj bliskoj ili daljnjoj budućnosti općenito nisu poznati na početku. Iz toga razloga je korisno formirati PS za grupu proizvoda kako bi uloga promjena bila što manja. Sljedeće strukture podataka prikupljaju informacije o zahtjevima za potražnjom:

t_{PP}	vrijeme trajanje PP,
j	tip izratka,
N_{TI}	broj tipova izradaka koje treba proizvesti,
ε_j	zahtjevi potražnje j -tog tipa izratka.

5.2.4 Odabir strojnog parka i podaci o strojevima

Za operacije strojne obrade moguće je koristiti razne tipove strojeva, prema tehnološkim zahtjevima i slijedu operacija. Za svaki SKZ trebaju biti dostupni optimalni tipovi strojeva koji će osigurati najkraća vremena obrade. U ovom radu koristit će se klasične CNC tokarilice i obradni centri različitih konfiguracija i koncepata steznih naprava, pojašnjen u poglavlju 4.3. Koncepti navedenih strojeva su postojeći i široko primjenjivi u praksi, a podaci u izračunu su dobiveni iz realnih (postojećih) PS. Parametri koji opisuju karakteristike strojne opreme i procesa obrade:

I	ukupni broj raspoložive proizvodne opreme,
Z	ukupni broj raspoloživih tipova proizvodne opreme,
a_i	godišnji iznos amortizacije i -te proizvodne opreme
r	indeks tipa proizvodne opreme
T_r	početni troškovi r -tog tipa proizvodne opreme na početku PP,
k_s	godišnja kamatna stopa,
$SKZ_{j,r}$	skup SKZ koji se mogu izraditi na r -tom tipu proizvodne opreme za j -ti izradak

5.2.5 Izvedivost i vrijeme proizvodnje

Da bi se dobilo odnose izvedivosti i tehnoloških vremena, potrebno je povezati konfiguraciju strojeva i dodijeljene SKZ. To će omogućiti procjenu razine proizvodnje za sve ostvarive kombinacije. Struktura podataka je sljedeća:

$\theta_{skz_{jp},r}$	izvedivost obrade SKZ skz_{jp} na r -tom tipu proizvodne opreme, za j -ti izradak
$\theta_{skz_{jp},r} = \begin{cases} 1, & \text{ako se SKZ } skz_{jp} \text{ može strojno obraditi na } r - \text{tom tipu proizvodne opreme} \\ 0, & \text{inače} \end{cases}$	
$\varphi_{skz_{jp},r}$	vrijeme obrade SKZ skz_{jp} na r -tom tipu proizvodne opreme, za j -ti izradak,

$\varphi_{skz_{jp},r}$	$\begin{cases} t, & \text{ako se SKZ } skz_{jp} \text{ može strojno obraditi na } r - \text{tom tipu proizvodne opreme} \\ \infty, & \text{inače} \end{cases}$
$\omega_{skz_{jp},r}$	razina proizvodnje SKZ skz_{jp} na r -tom tipu proizvodne opreme, za j -ti izradak,
$\omega_{skz_{jp},r}$	$\begin{cases} P_j, & \text{ako se SKZ } skz_{jp} \text{ može strojno obraditi na } r - \text{tom tipu proizvodne opreme} \\ 0, & \text{inače} \end{cases}$
$\alpha_{skz_{jp},r}$	minimalni broj r -tog tipa proizvodne opreme za izradu SKZ skz_{jp} j -tog izratka
K_{rj}	zahtijevani proizvodni kapacitet za j -ti izradak.

U svojim radovima Mikac [67] i Son [112] definiraju kapacitet stroja kao vrijeme raspoloživo za proizvodnju ili koliko stroj može dovršiti dodijeljene zadatke SKZ za izradak j po jedinici vremena, što predstavlja vrijednost K_{rj} . Ono se može dobiti iz vremena trajanja operacije t_c . Vrijeme $\alpha_{skz_{jp},r}$ ne uključuje samo tehnološko vrijeme, nego i vrijeme stavljanja i skidanja te vremena manipulacije i zastoja. Radi jednostavnosti izračuna, a i postavljenog procesa, vremena međufazne manipulacije te stavljanja i skidanja bit će „skrivena“ u tehnološkim vremenima dok vremena zastoja neće biti uzeta u obzir. Minimalni broj strojeva $\alpha_{skz_{jp},r}$ potrebnih za zahtijevani proizvodni kapacitet K_{rj} bio bi prema izrazu (5.4):

$$\alpha_{skz_{jp},r} = \varphi_{skz_{jp},r} \cdot K_{rj} \quad (5.4)$$

Bez obzira na metode konstrukcije PS, u odabiru alternativnih strojeva za određene operacije, treba se voditi načelom glavnih gradbenih elemenata RPS te imati razumni broj alternativa. Manipulativni sustavi u RPS postaju dio strojeva te imaju također karakteristike modularnosti i integrabilnosti. Osnova pri projektiranju PS mora biti svedena na manipulaciju s jednim izratkom bez međuoperacijskog skladišta (eng. *buffer*) dok se manipulacija steznim alatom vrši u vrijeme rekonfiguracije.

5.2.6 Ograničenja prostora i investicijskih troškova

5.2.6.1 Ograničenje prostora

Ograničenja prostora u odnosu na dodijeljenu konfiguraciju, uključuju uvjetovanu duljinu i širinu prema zahtjevima konstrukcije višepredmetnog skalabilnog sustava. Duljinom je prikazan broj faza obrade tj. njihove lokacije, što određuje, u konačnici, njihov maksimalni broj. Širina predstavlja najveću količinu paralelno postavljenih strojeva unutar jedne faze obrade. Struktura podataka koje pružaju informacije o ograničenjima prostora jesu [48, 114]:

D_{max} skup svih raspoloživih faza obrade (ograničenje duljine konfiguracije),

PA_{max} skup svih paralelnih strojeva po fazi obrade (ograničenje širine konfiguracije).

5.2.6.2 Ograničenje investicijskih troškova (ulaganja)

Početno ulaganje konfiguracije određeno postavljenim i odobrenim projektom u skladu s proračunskim ograničenjima. To uključuje troškove strojeva, manipulativnih jedinica, steznih naprava i alata. U ovom radu analiziran je postavljeni PS te su vrijednosti strojeva procijenjene. Vrijednosti manipulativnih sustava nisu uzete u obzir, a pretpostavlja se da je udio pojedinog transportnog i manipulativnog elementa ravnomjerno troškovno raspoređen za svaki stroj. Slijedi struktura podataka koja daje informacije o ograničenju ulaganja:

$T_{vi_{max}}$ maksimalno dopušteno početno ulaganje (trošak) konfiguracije.

5.2.7 Opis izlaznih varijabli

Na osnovi danih podataka i željene konfiguracije VRPS, prikazane na slici 5.3, cilj je generirati određeni broj ekonomski opravdanih te optimalnih ili gotovo optimalnih konfiguracija. Takve konfiguracije bit će definirane brojem faza obrade, brojem paralelnih strojeva po fazi obrade, tipu stroja i dodijeljenim SKZ za svaku fazu obrade, kao i odnosima redoslijeda između faza obrade. S ovom definicijom problem generiranja konfiguracije opisan je kao postupak odabira izvedivog i ekonomičnog SKZ i dodjeljivanje odabranih SKZ strojevima bez kršenja ograničenja redoslijeda među SKZ za svaki izradak, uz ograničenja prostora, investicije i kapaciteta. Struktura izlaznih podataka bit će izvedena na sljedeći način:

F Ukupni broj faza obrade,

f_r r -ti tip proizvodne opreme dodijeljen svakoj fazi obrade,

Z_f broj tipova proizvodne opreme dodjeljenih f -toj fazi obrade,

$SKZ_{f,j,r}$ broj SKZ dodijeljen r -tom tipu proizvodne opreme, za izradu j -tog izratka u f -toj fazi obrade

$$SKZ_{f,j,r} = \begin{cases} \text{SKZ dodijeljen stroju,} & \text{ako je faza obrade korištena za } j - \text{ti izradak} \\ 0, & \text{ako je faza obrade nije korištena za } j - \text{ti izradak} \end{cases}$$

η_{Tfr} stupanj iskorištenja r -tog tipa proizvodne opreme dodijeljen f -toj fazi obrade,

T_f početni trošak u f -toj fazi obrade

Navedene varijable utjecati će i na donošenje odluka o odabranoj optimalnoj konfiguraciji pa ih možemo definirati i kao varijable odluke.

5.3 Matematički model

5.3.1 Pretpostavke

Prema danim parametrima može se formirati matematički model koji se temelji na slijedećim pretpostavkama:

- raspoloživost strojeva je 100% tj. nisu uzeti u obzir zastoji kao stohastičke vrijednosti,
- vrijeme zamjene (rekonfiguracije) smatra se dovoljno kratkim te nije uzeto u analizu,
- svaka faza obrade može sadržavati jedan ili više tipova strojeva,
- moguće je dodavanje višestrukih SKZ istog tipa proizvoda ili različitih tipova proizvoda na jednom stroju.

U ovom radu svakoj fazi obrade dana je mogućnost dodjele više tipova strojeva. Prednost takvog pristupa je dodavanje više opcija kod slaganja skalabilnih RPS (rezultira smanjenjem početnih investicija kod postavljanja novog sustava), te mogućnost postavljanja RPS na osnovi postojeće proizvodne opreme. U svom radu Dao i sur. [113] su analizirali i postavili model s mogućnošću dodjele višestrukih SKZ istog tipa proizvoda na jedan stroj čime su smanjili početne troškove strojeva. Dokazali su da je bit dodjeljivanja više SKZ istog proizvoda na jedan stroj u pružanju mogućnosti povećanja iskorištenja strojeva dijeljenjem iskorištenja strojeva preko uzastopnih SKZ-a. Međutim, u svakoj fazi obrade koristili su identične strojeve (ili identične baze strojeva s rekonfigurabilnim osima i vretenima) što ograničava širinu primjene i uglavnom je prilagođeno postavljanju nove proizvodne opreme. Novim modelom, postavljenim u ovom radu, prikazana je dodjela višestrukih SKZ istog tipa proizvoda na različite strojeve u istoj fazi obrade.

5.3.2 Traženje optimalne konfiguracije

U danim kombinacijama SKZ-a, može postojati mnogo izvedivih konfiguracija VRPS ili nijedna izvediva konfiguracija povezana s dodijeljenim ISKZD. U tu svrhu razvijen je algoritam traženja optimalne konfiguracije kako bi se pronašla optimalna konfiguracija povezana s ISKZD. Ako ne postoji moguća konfiguracija VRPS za dani ISKZD, tada predloženi algoritam pronalazi konfiguraciju s minimalnom vrijednošću zbroja početnog troška i vrijednosti penala. Ako postoji ISKZD, znači da su pronađeni i poznati SKZ dodijeljeni pojedinom stroju. Pretpostavljajući da strojevi r -tog tipa mogu izvoditi SKZ skz_1, \dots, SKZ , potreban broj r -tog tipa stroja koji zadovoljavaju zahtjeve kapaciteta je prema izrazu (5.5) [113]:

$$M_{f,r} = \left[\sum_{\epsilon SKZ_j} t_{SKZ,r} \cdot \epsilon_{SKZ,j} \right] \quad (5.5)$$

pri čemu je:

$M_{f,r}$ potreban broj r -tog tipa proizvodne opreme, u f -toj fazi obrade koji zadovoljava zahtijevanu potražnju (pod pretpostavkom da r -ti tip stroja može izvoditi sve skz_j skupa SKZ_j)

ε_{SKZ_j} zahtjev potražnje za skup SKZ_j -tog izratka

$t_{SKZ_j,r}$ vrijeme obrade SKZ_j -a j -tog izratka na r -tom tipu proizvodne opreme

Da bi se pronašla optimalna konfiguraciju VRPS, potrebno je pronaći strojeve i konfiguracije s minimalnim troškom. Rješenje problema nalazimo u gornjem izrazu prilagodivši ga formulacijama linearnih jednadžbi. Cilj primjene jednadžbi je pronalaženje optimalne količine istih ili različitih tipova strojeva u istoj fazi obrade. U izraz se uvodi indeks m koji predstavlja jedan od mogućih kombinacija strojeva dodjeljenih fazi obrade koji moraju izvršiti sve SKZ . Za osigurati proizvodnju zahtijevanih količina SKZ_j , potrebno je strojeva tipa r prema izrazu (5.6) i (5.7):

$$M_{f,r(j,SKZ)} = t_{f,r(j,SKZ)} \cdot \varepsilon_{SKZ,j} \quad (5.6)$$

$$t_{f,r(j,SKZ)} = \begin{cases} t_{f,r(j,SKZ)}, & \text{ako se } SKZ_j \text{ može izvršiti na } r - \text{tom tipu proizvodne opreme} \\ \infty, & \text{inače} \end{cases}$$

$$\frac{M_{f,r(j,SKZ)}}{t_{f,r(j,SKZ)}} = \varepsilon_{SKZ,j} \quad (5.7)$$

Ako se SKZ_j , dodijeljen f -toj fazi obrade, može izvršiti na više različite proizvodne opreme r -tog tipa, tada se prema izrazu (5.8) mora zadovoljiti količina:

$$\sum_{r \in Z_{f,r}} \frac{M_{f,r(j,SKZ)}}{t_{f,r(j,SKZ)}} = \varepsilon_{SKZ,j} \quad (5.8)$$

pri čemu je:

$M_{f,r(j,SKZ)}$ potreban broj r -tog tipa proizvodne opreme za izvršiti SKZ_j j -tog izratka dodijeljen f -toj fazi obrade

$t_{f,r(j,SKZ)}$ vrijeme obrade za SKZ_j j -tog izratka na r -tom tipu proizvodne opreme dodijeljen f -toj fazi obrade

što predstavlja linearnu jednadžbu gdje su poznati $\varepsilon_{SKZ,j}$ i $t_{f,r(j,SKZ)}$, a nepoznat $M_{f,r(j,SKZ)}$. Iz izraza (5.5) proizlazi matrica sustava linearnih jednadžbi $A_{sust,f,r,m}$ za SKZ_j -tog izratka dodijeljen f -toj fazi obrade prema izrazu (5.9). Navedeni izraz predstavlja skup linearnih jednadžbi formuliran na matrični način. Kako bi se riješile jednadžbe s četiri varijable potrebno je definirati prostore u kojima će se vršiti izračuni prema sljedećim parametrima:

m_f	jedan od mogućih kombinacija strojeva dodjeljenih f -toj fazi obrade koji moraju izvršiti sve SKZ,
$Z_{f,m}$	skup tipova proizvodne opreme u m -toj kombinaciji za f -tu fazu obrade gdje se za svaki $SKZ_{j,skz,f}$ j -tog izratka, u f -toj fazi obrade može izraditi na barem jednom skupu, $\forall skz \in SKZ_{f,j}$, gdje je $Z_{f,m} \subseteq Z$
$skz_j \in SKZ_{f,j}$	skz_j je element skupa svih $SKZ_{f,j}$ j -tog izratka dodjeljeni f -toj fazi obrade
$j \in N_f$	j je element skupa svih izradaka dodijeljeni f -toj fazi obrade
\mathcal{F}	odabrane faze obrade za svaku konfiguraciju.

$$\begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} \downarrow \\ j \in N_f \\ skz_j \in SKZ_{f,j} \end{array} \right) \end{array} \quad (\rightarrow r \in Z_{r,m}) \quad \begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} \downarrow \\ r \in Z_{r,m} \\ skz_j \in SKZ_f \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \downarrow \\ skz_j \in SKZ_f \end{array} \right) \end{array}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & & & \\ t_{f,r_1,skz_1} & & & \\ & \ddots & & \\ 0 & & 1 & \\ & & t_{f,r,skz_j} & \\ & & & \ddots \\ 0 & 0 & & 1 \\ & & & t_{f,r|Z_{r,m}|skz|SKZ_f|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} M_{f,r_1,skz_1} \\ \vdots \\ M_{f,r,skz_j} \\ \vdots \\ M_{f,r|Z_{r,m}|skz|SKZ_f|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{skz_1} \\ \vdots \\ \varepsilon_{skz_j} \\ \vdots \\ \varepsilon_{skz|SKZ_f|} \end{bmatrix}, \forall f \in \mathcal{F} \quad (5.9)$$

Na osnovu gornjeg izraza i nepoznatog $M_{f,r(j,SKZ)}$, potrebno je dobiti potreban broj tipova strojeva po fazi obrade f prema izrazu (5.10):

$$M_{f,m,r} = \left[\sum_{j \in N_f} \sum_{skz_j \in SKZ_{f,j}} M_{f,m,r(j,skz)} \right], \quad \forall m \quad (5.10)$$

pri čemu je:

$M_{f,m,r}$	potreban broj r -tog tipa proizvodne opreme u m -tom broju mogućih kombinacija proizvodne opreme za izvršiti sve dodijeljene i moguće SKZ u f -toj fazi obrade.
-------------	---

Nakon dobivanja potrebnog broja strojeva u svakoj fazi obrade, potrebno je dobiti minimalni trošak f -te faze obrade prema izrazu (5.11 i 5.12):

$$T_{f,min} = \min(T_{f,m}), \quad \forall m \quad (5.11)$$

$$T_{f,m} = \sum_{r \in Z_{f,m}} M_{f,m,r(j,SKZ)} \cdot T_r \cdot NSV \cdot KM \quad (5.12)$$

pri čemu je:

NSV	faktor (konstanta) sadašnje vrijednosti (prilagođeno prema [89, 101, 113])
KM	vrijednost kazne za početni trošak veći od PA_{max} paralelnih strojeva u određenoj fazi obrade

$T_{f,m}$ minimalni trošak za f -tu fazu obrade za sve m -te dodijeljene i moguće kombinacije proizvodne opreme

Da bi dobili trošak investicije kroz određeni vremenski period potražnje, potrebno je koristiti vrijednost dobivenu diskontiranjem za svaku godinu u razlici priljeva i odljeva sredstava, kroz cijelo trajanje rekonfiguracije i uloženog kapitala u tom procesu, prema izrazu (5.13):

$$d_f = \frac{1}{(1 + k_s)^t} \quad (5.13)$$

Faktor NSV preuzet je iz [101, 113] i predstavlja financijski parametar koji se izračunava prema izrazu (5.14)

$$NSV = 1 - d_f \cdot (1 - a_i)^t \quad (5.14)$$

Na kraju izračuna dobiva se trošak cijele konfiguracije prema izrazima (5.15 - 5.17):

$$T_{uk,opt} = \left(\sum_{s \in S} T_{f,m} \right) \cdot KD, \quad \forall m \quad (5.15)$$

$$T_{uk,opt} = \left[\sum_{f \in \mathcal{F}} \min \left(\sum_{r \in \mathcal{Z}_{f,m}} M_{f,m,r(j,SKZ)} \cdot T_r \cdot NSV \cdot KM \right) \right] \cdot KD, \quad \forall m \quad (5.16)$$

$$T_{uk,opt} = \left[\sum_{f \in \mathcal{F}} \min \left(\sum_{r \in \mathcal{Z}_{f,m}} \left[\sum_{j \in N_f} \sum_{skz_j \in SKZ_{f,j}} M_{k,m,z(j,l)} \right] \cdot T_r \cdot NSV \cdot KM \right) \right] \cdot KD, \quad \forall m \quad (5.17)$$

pri čemu je:

KD kazna za postavljanje više od D_{max} lokacija faza obrade,
 $T_{uk,opt}$ optimalni trošak cijele konfiguracije.

Problem optimizacije formulira se kao funkcija minimiziranja investicijskih ulaganja u konfiguracije uz slijedeća ograničenja:

Prema izrazu (5.18), koji osigurava da odabrani SKZ uključuje sve KZ za svaki j -ti izradak, a svaki KZ - SKZ, točno je dodijeljen jednoj fazi obrade.

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{skz_j \in SKZ_j} \rho_{kz_{jp}, skz_{jp}} \cdot e_{f, skz_{jp}} = 1, \quad \forall j = 1, 2, \dots, N, \quad \forall kz_j \in |KZ_j| \quad (5.18)$$

pri čemu je:

$e_{f, skz_{jp}}$ varijabla odluke dodjele SKZ skz_{jp} j -tog izratka f -te faze obrade koja iznosi 1 ako dodjela postoji, inače je 0

Ograničenje prema izrazu (5.19) odnosi na prioritete između odabranih SKZ za svaki izradak koji su zajamčeni.

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} e_{f,skz_{jr}} \cdot \sum_{f \in \mathcal{F}} f(e_{f,skz_{jr}} - e_{f,skz_{jp}}) \geq 0, \quad (5.19)$$

$$\forall j = 1, 2, \dots, N, \quad \forall_{skz_{jp}, skz_{jr}} \in \left\{ (s_{skz_{jp}}, s_{skz_{jr}}) \mid \sigma_{skz_{jp}, skz_{jr}} = 1 \right\}$$

Ograničenje (5.20) osigurava da se svi SKZ, dodijeljeni f -toj fazi obrade mogu izraditi tipom stroja r koji je dodijeljen f -toj fazi obrade

$$\sum_{j \in N_f} \sum_{skz_{jp} \in SKZ_j} e_{f,skz_{jp}} \leq \sum_{j \in N_f} \sum_{z \in Z} \sum_{skz_j \in SKZ_j} c_{f,r} \cdot e_{f,skz_j}, \quad \forall f = 1, \dots, |\mathcal{F}| \quad (5.20)$$

pri čemu je:

$c_{f,r}$ varijabla odluke r -tog tipa stroja dodijeljen f -toj fazi obrade koja iznosi 1 ako dodjela postoji, inače je 0

Nadalje, skup ograničenja (5.21) sprječava da se ima više od PA_{max} paralelnih strojeva u fazi obrade te ograničenje (5.22) koje osigurava da ulaganje u PS nije više od dopuštenog proračuna:

$$\sum_{j \in N_f} \sum_{r \in Z} c_{f,r} \left[\sum_{skz_j \in SKZ_j} e_{f,skz_{jp}} \cdot \alpha_{skz_{jr}} \right] \leq PA_{max}, \quad \forall f = 1, \dots, |\mathcal{F}| \quad (5.21)$$

$$\sum_{f \in \mathcal{F}} \sum_{j \in N_f} \sum_{r \in Z} c_{f,r} \left[\sum_{skz_{jp} \in SKZ_j} e_{f,skz_{jp}} \cdot \alpha_{skz_{jr}} \right] T_r \leq T_{vi_{max}} \quad (5.22)$$

Prema prikazanom modelu, proizvodni kapacitet je zadovoljen odabirom $\alpha_{skz_{jr}}$ strojeva r -tog tipa na stroju za SKZ skz_{jp} te je moguće višestruke SKZ različitih tipova izradaka izraditi na jednom stroju. Za optimalni početni trošak VRPS, $T_{uk,opt}$, glavni algoritam traženja optimalne konfiguracije provjerava r -ti stroj i označava onoga bez dodjele SKZ-a. Nadalje, za svaki dodijeljeni SKZ identificira korisne r -te tipove strojeva koji mogu izvoditi sve zadane skz_{jp} prema danim zahtjevima potražnje. Za svaki dodijeljeni SKZ, izračunava minimalni broj strojeva $M_{f,m,r}$ svakog tipa stroja koji se može koristiti izračunom funkcije cilja. U uvjetima prekoračenja, za svaki dodijeljeni SKZ, ako je broj strojeva $M_{f,m,r}$ veći od PA_{max} , trošak odgovarajućih strojeva je $M_{f,m,r} \cdot T_r \cdot NSV + KM$, dok je inače trošak $M_{f,m,r} \cdot T_r \cdot NSV$. Za dodijeljene SKZ svakoj fazi obrade, pronalazi stroj s minimalnim troškovima. Zatim vrši izračun zbroja minimalnih troškova za svaku fazu obrade kojoj su dodijeljeni SKZ te označava sa $T_{r_{min}}$. Ako je $T_{r_{min}}/NSV$ (ulaganje) veće od $T_{vi_{max}}$, $T_{uk,opt} = T_{r_{min}} + KD$, inače je $T_{uk,opt} = T_{r_{min}}$ [113].

5.3.3 Procedura zadovoljenja ograničenja

Problem s optimizacijom, opisan u prethodnom poglavlju, vrlo je kompliciran problem u pogledu zadovoljenja ograničenja. Ovim radom predlaže se novi postupak koji je razvijen kako bi se riješio problem složenosti i omogućio izvršavanje automatskog generiranja izvedivih alternativnih konfiguracija s više rješenja. Postupak se temelji na pretvaranju izvornog prostora za pretraživanje u novi pretraživački prostor sastavljen od seta varijabli različitih veličina domene. Domene novih varijabli generiraju se pojedinačno na način koji garantira zadovoljenje gotovo svih predstavljenih ograničenja. Novi skup varijabli sastoji se od tri skupine.

U gornjoj formulaciji, ograničenja funkcionalnosti su najsloženija i najteža za upravljanje. Među ograničenjima funkcionalnosti, odabir SKZ-a i ograničenja dodjeljivanja SKZ-a tj., ograničenja (5.18) i (5.19) su najizazovniji. Kako bi zadovoljili ta ograničenja (5.20) i (5.21), za svaki izradak treba identificirati ISKZ među svim mogućim SKZ sljedovima i pronaći odgovarajuću particiju ISKZ. S obzirom na ISKZ s L SKZ-a, postoji mnogo alternativa dodjela ISKZ-a u ne više od $\min(L, PA_{max})$ udjela. Ako je svaki udio svakog ISKZ, za svaki izradak dodijeljen jednom stroju, a odnosi prioriteta svih udjela svakog ISKZ duž proizvodne linije su u skladu s onima u odgovarajućim ISKZ, uvjeti (5.20) i (5.21) su zadovoljeni i dobivamo ISKZD. Neophodan uvjet izvedivog VRPS je da dodijeljeni SKZ svakog izratka duž proizvodne linije tvori jedan ISKZD i da zadovoljava ograničenja (5.18) do (5.22). Odabrani SKZ sadrže sve KZ bez preklapanja, a svaki izradak zadržava odnos prioriteta s time da je proizvodna linija povezana s ISKZD.

5.3.3.1 Stvaranje izvedivih permutacija SKZ niza za sve izratke

U ovoj se fazi radi na generiranju svih izvedivih permutacija SKZ nizova koji pokrivaju sve KZ potrebne za proizvodnju svakog izradaka bez ponavljanja KZ-a, kršenja ograničenja prioriteta ili prekoračenja dopuštenog broja faza obrade što predstavlja maksimalnu dužinu konfiguracije. Te su permutacije povezane s njihovim izvedivim mjestima unutar granica sustava. Stoga ova faza jamči da generirane permutacije zadovoljavaju ograničenja prioriteta i preklapanja, ograničenja dodjele SKZ-a te ograničenja domene SKZ-a i duljine konfiguracije (svaki izradak treba broj faza obrade u prihvatljivim granicama). Ovaj postupak se izvodi za svaki izradak i sastoji se od sljedećih koraka:

- odrediti SKZ koji sadrže samo pojedinačne KZ koji nisu dio nijednog drugog SKZ-a, ako ih ima, jer moraju biti dio bilo koje kombinacije. Nakon toga odrediti preostale SKZ koji sadrže točno sve preostale KZ-a bez preklapanja ili prekoračenja D_{max} ,
- spremite sve generirane izvedive kombinacije SKZ-a i njihov ukupni broj,
- stvoriti sve moguće permutacije nizova za svaku od kombinacija koje ne krše ograničenja prioriteta. Ovaj je proces rekurzivan i prati grafikon redoslijeda,

- spremite sve generirane permutacije koje odgovaraju svakoj kombinaciji i njihov ukupni broj.

5.3.3.2 Stvaranje izvedivih strojnih alternativa za sve kombinacije SKZ-a

Ova faza postupka odnosi se na generiranje svih strojnih alternativa koji mogu udovoljiti zahtjevima stope potražnje za svaku moguću kombinaciju SKZ-a različitih izradaka istovremeno u istoj fazi obrade. Zahtjeva se minimalni broj potrebnih paralelnih strojeva da se zadovolje zahtjevi potražnje koji prati generirane izvedive alternative. Ovaj broj mora biti manji ili jednak PA kako bi alternativa bila izvediva. Stoga ova faza garantira da generirane strojne alternative za svaku kombinaciju SKZ-a zadovoljavaju ograničenja PA_{max} , ograničenja kapaciteta, ograničenja domene tipa stroja i broja paralelnih strojeva u svakoj fazi obrade. Ova faza sastoji se od sljedećih koraka.

- stvoriti sve moguće kombinacije SKZ-a iz svih izradaka koji se mogu istovremeno izvoditi u istoj fazi obrade, uključujući mogućnost nekorištenja faze obrade za jedan ili više izradaka,
- stvoriti sve strojne kombinacije koje mogu proizvesti svaki mogući skup SKZ-a,
- odredite najmanji broj paralelnih strojeva koji su potrebni da se zadovolje zahtjevi potražnje svih izradaka u toj fazi obrade. Ako je broj prihvatljiv (manji ili jednak PA_{max}), pohraniti strojnu alternativu uz minimalni broj strojeva koji odgovaraju kombinaciji SKZ,
- pohraniti ukupni broj strojnih alternativa koja odgovara svakoj kombinaciji SKZ-a.

5.3.3.3 Stvaranje izvedivih faza obrade za sve permutacije SKZ-a

Ova faza postupka uključuje generiranje svih mogućih lokacija faza obrade za različite permutacije SKZ-a za sve izratke koji se smatraju da su unutar dopuštenih granica konfiguracijske duljine D_{max} . Set lokacija faza obrade znači raspodjelu SKZ-a koji pripadaju alternativnoj permutaciji na raspoloživim lokacijama faza obrade sustava. Taj generirani set lokacija faza obrade funkcija je broja SKZ-a u permutaciji i najveći dopušteni broj faza obrade. Stoga ova faza jamči da generirana moguća dodjela SKZ-a na lokacije faze obrade zadovoljava ograničenje D_{max} za sve izratke. U VRPS obično postoje strojevi koji mogu izvesti sve SKZ, čime je ograničenje (5.20) zadovoljeno. Obično je za svaki izradak udio ISKZ na sve SKZ nizove vrlo mali, dok je udio neizvedivih SKZ sekvenci je vrlo velik. Slično tome, udio ISKZD za sve SKZ dodjele je prilično mali. Stoga, ako se mogu identificirati svi ISKZD i pretražiti konfiguracije VRPS povezane sa svim ISKZD, učinkovitost pronalaženja skup ekonomskih rješenja bit će značajno poboljšana.

5.4 Primjena GA

U svojim radovima Youssef i sur. [101] i Dou i sur. [113] analizirali su modeliranje i optimizaciju linijske RPS konfiguracije dok je Kimms [81] analizirao primjer s fiksnim konfiguracijama stroja i fiksnim redoslijedom rada bez analize zahtjeva za kapacitetima. U svim slučajevima, problem odabira konfiguracije, definiran u njegovom izvornom pretraživačkom prostoru bio je NP-težak problem. Problem pripada klasi NP i nazivamo ga problemom nedeterminističke polinomske složenosti, ako se rješenje datog problema može potvrditi algoritmom polinomske složenosti [117]. Također se vjeruje da za NP-teške probleme ne postoje polinomijalni algoritmi. Zato se intenzivno proučavaju brzi, približni načini rješavanja NP-teških problema. Algoritmi koji pronalaze zadovoljavajuće dobra rješenja, koji imaju relativno nisku računalnu složenost nazivaju se heurističke metode ili heuristike. Budući da je GA široko korištena i snažna metaheuristička metoda globalne optimizacije temeljena na populaciji, a široko se primjenjuje na inženjersku optimizaciju [115], ista je primijenjena u ovom radu.

5.4.1 Struktura GA

GA jesu snažne i široko primjenjive tehnike stohastičkog pretraživanja i optimizacije, temeljene na evolucijskim idejama prirodne selekcije i genetike za otkrivanje dobrih rješenja. Metaheuristika utemeljena na GA vrlo je prikladna za primjenu u rješavanju složenih problema koje je teško modelirati i za koje nisu dostupni zadovoljavajući prilagođeni algoritmi. GA inicijalizira populaciju s nizom potencijalnih rješenja problema i nastoji proizvesti bolja rješenja (pojedinci) kombinirajući bolja od postojećih pomoću jednog ili više genetskih operatera. Pojedinci se biraju na svakoj iteraciji s pristranosti prema onima s najboljim objektivnim vrijednostima. Pomoću različitih tehnika mapiranja i odgovarajuće mjere vrijednosti funkcije cilja, GA se može prilagoditi tako da razvija rješenje za mnoge vrste problema, uključujući optimizaciju funkcije ili određivanje ispravnog redoslijeda niza [85, 93].

Da bi se olakšala simulacija prirodnog okruženja potrebno je prilikom implementacije GA ispravno odabrati način kako će se ocjenjivati dobrotu pojedine jedinke. Nakon nasumičnog generiranja početne populacije (eng. *population*), svakom rješenju dodjeljuje se numerička procjena njegove prilagođenosti (eng. *evaluation*) pomoću funkcije dobrote ili ciljne funkcije (eng. *fitness function*), što predstavlja mjera kvalitete toga rješenja u zadanom prostoru rješenja. Tijekom svake iteracije ili generacije, svaki pojedinačni niz u trenutnoj populaciji procjenjuje se primjenom ciljne funkcije. Kod problema, kao što je pronalaženje minimuma ili maksimuma neke funkcije, dobrota se može prikazati kao vrijednost koju ta funkcija ima za zadani kromosom, dok se kod složenijih problema dobrota može izraziti kao npr. vrijeme trajanja projekta ili vrijeme potrebno da se obavi simulacija sustava koji se optimizira i sl. [50, 84].

Novi kromosomi u obliku potomaka (eng. *offspring*) za sljedeću generaciju biraju se iz trenutne populacije roditelja postupkom poznatim kao odabir (eng. *selection*). Za odabir koristi se kriterijska funkcija koja ovisi o problemu i njegovom zapisu. Svrha odabira je istaknuti dobre kromosome u nadi da će njihovo potomstvo biti još bolje. Postupak slučajnog odabira koristi se s većom vjerojatnošću za one nizove s većim vrijednostima prikladnosti. Takva selekcijska shema sustavno eliminira kromosome s nižim vrijednostima prikladnosti iz populacije kod prelaska iz jedne generacije u drugu.

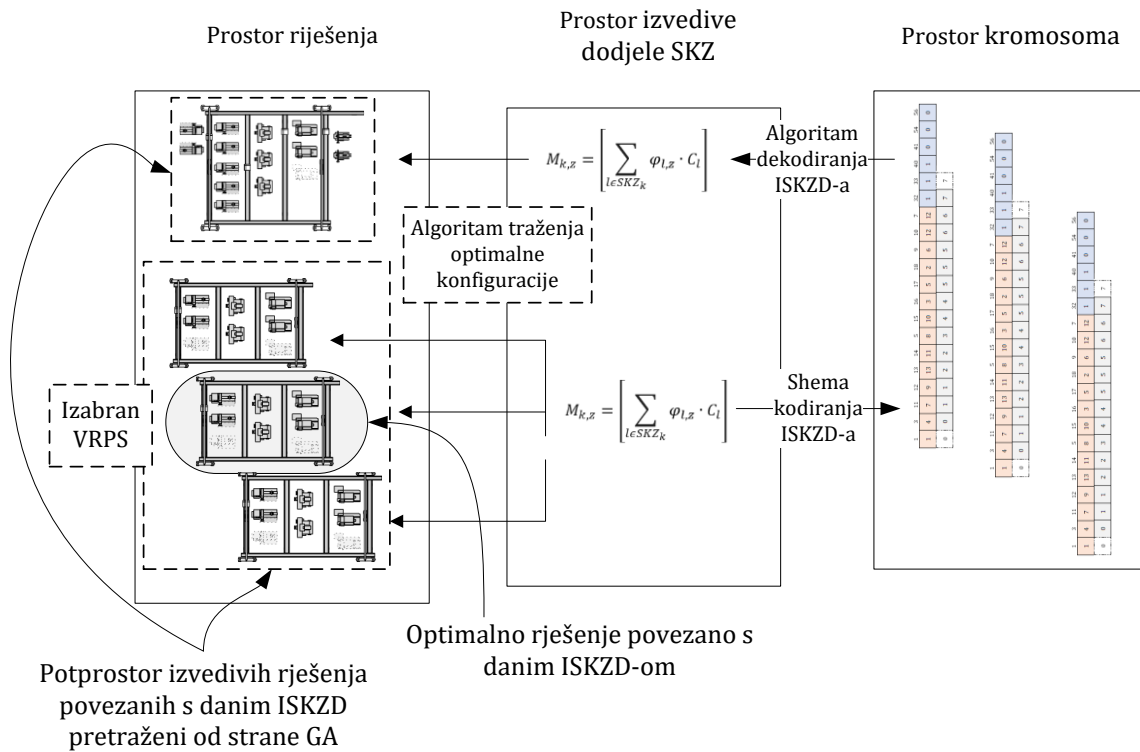
Dva genetska operatora, križanje (eng. *crossover*) i mutacija (eng. *mutation*), primjenjuju se određenom vjerojatnošću kako bi stvorili novu populaciju jedinki. U križanju, GA operira s dva nasumično odabrana kromosoma-roditelja, trenutne populacije. Operacijom križanja razmjenjuju se presjeci roditelja kako bi stvorili dvije nove jedinke. Slučajna točka rezanja (eng. *cut-point*) nasumično se bira unutar roditeljskih nizova. Broj križanja napravljenih u generaciji kontrolira se stopom križanja c_m , koja je definirana kao omjer broja potomaka proizvedenih u svakoj generaciji (križanju) i veličine populacije (eng. *population_size*). Mutacija je pozadinski operator koji uključuje spontane, slučajne promjene u kromosomima. Svodi se na zamjenu jednog ili više gena. Broj mutacija izvršenih u generaciji kontrolira se parametrom vjerojatnosti mutacije p_m , koji je definiran kao omjer novih jedinki proizvedenih u svakoj generaciji prema veličini populacije. Jednom kada se stvori nova generacija, brisanjem jedinki trenutne populacije, kako bi se napravilo mjesta za nove generacije, formira se nova populacija. Postupak je iterativan dok se ne dosegne specifičan kriterij zaustavljanja, kao što je prikazano na slici 5.11.

GA predstavljaju jednostavan pristup složenim problemima pretrage velikog prostora. Korištenjem modela učenja i evolucije iz prirode omogućuju modeliranje željenih osobina sustava, te automatsko pronalaženje rješenja. Ostvareni rezultati, iako pokazuju zadovoljavajuća rješenja, ne osiguravaju uvijek nalaženje optimalnog rješenja.

5.4.2 Pristup optimizaciji na bazi GA

Da bi primijenili GA na problem generiranja konfiguracije za VRPS, ključ je pronaći odgovarajuće tehnike kodiranja i dekodiranja te tehnike rada s ograničenjima. Budući da je lako pronaći odgovarajuću optimalnu konfiguraciju VRPS s obzirom na ISKZD - ostvarljive SKZ zadatke, usredotočiti se je potrebno samo na kodiranje ISKZD u pristupu formiranja GA. Razvijena shema kodiranja i dekodiranja osigurava da se svaki kromosom dekodira u ISKZD. Prikaz niza rješenja sadrži samo podatke ISKZD umjesto svih informacija o konfiguraciji VRPS. Algoritam traženja optimalne konfiguracije (TOK) koristi se za određivanje informacije o optimalnoj konfiguraciji povezanoj s ISKZD koji predstavlja kromosom. Što se tiče rada s ograničenjima, postoje uglavnom dvije klase metoda [86, 115]: modifikacija genetičkim operatorima i kažnjavanje neprihvatljivih

jedinki tj. kažnjavanje jedinki koje ne zadovoljavaju sva ograničenja. Prva održava izvedivost jedinke u populaciji pomoću specijaliziranih operatera ili dekodera namećući ograničenje da je svako izvedivo rješenje "bolje" od bilo kojeg neizvedivog rješenja. Potonja kažnjava niz ili jedinku koji ne zadovoljava sva ograničenja kroz redukciju fitnesa niza. Slikom 5.10 prikazan je shematski prikaz pronalaženja optimalnog rješenja koji se temelji na GA.



Slika 5.10 Pregled GA-osnove pristupa

U predloženom GA pristupu korištene su obje metode. Predloženi su posebni genetski operateri koji će održati izvedivost kromosoma koji predstavlja ISKZD. Ograničenja (5.18-5.20) mogu biti zadovoljena za konfiguraciju VRPS povezanu s ISKZD. Međutim, broj paralelnih strojeva može biti izvan PA_{max} u fazi obrade kojoj je dodijeljeno više SKZ-a od kojih svaka treba strojeve s određenim kapacitetom. Uzimajući u obzir ograničenja (5.21) i (5.22), možda ne može biti izvediva VRPS povezana s danim ISKZD. Kako bi se obradila ograničenja (5.21) i (5.22), koristi se metoda penalizacije. Prema gornjem opisu, GA se upotrebljava za održavanje ISKZD populacije i identificiranje ekonomskih konfiguracija kroz nasumično pretraživanje u prostoru rješenja koje se sastoje od optimalnih konfiguracija povezanih sa svim ISKZD. Iz ograničenja (5.18) proizlazi da je rafiniran prostor rješenja puno manji od cjelokupnog prostora rješenja. Kroz razvijanje metoda kodiranja i dekodiranja te genetskih operatera, prostor pretraživanja ograničen je na prostor rafiniranog rješenja. Pretraživanje u ovom prostoru poboljšava učinkovitost GA i povećava mogućnost pronalaženja najboljeg stanja.

5.4.3 Kodiranje i dekodiranje

Da bi se pronašle najbolje VRPS konfiguracije u slučajnom pretraživanju među optimalnim konfiguracijama povezanim sa svim ISKZD, ključ je razviti prikladnu metodu kodiranja za predstavljanje ISKZD. Kako bi se identificirao jedan ISKZD, za svaki izradak, potrebno je predstaviti ISKZ i dodjelu svakog SKZ u ISKZ-u. Pri dodjeli potrebno je znati da dužina ISKZ za isti izradak nije fiksirana, a udio ISKZ na sve SKZ sekvence je vrlo mala. Da bi se predstavio SKZ zadatak, izravan način je zabilježiti redni broj stroja za svaki SKZ. U tom slučaju kao i kod [113], koristi se topološka tehnika sortiranja putem acikličkih dijagrama, kako bi se pronašli IKZ iz grafikona prioriteta KZ, a potom i izvela ISKZ zamjenom KZ sa SKZ na osnovi međusobnog odnosa između SKZ i KZ. Predložena metoda kodiranja koristi prednosti odnosa između IKZ i ISKZ, kao i karakteristika SKZ. Kromosom za ISKZD, kako je prikazano na slici 5.11, sadrži N_{TI} tip izratka koji predstavlja skup SKZ zadataka za svaki izradak. Svaki kromosom sadrži tri komponente, a radi preglednosti svaka komponenta je odvojena. Komponenta 1 predstavlja nasumičnu permutaciju brojeva od 1 do duljine lijevog dijela kromosoma što predstavlja skup KZ_j (jediničnih SKZ-a) za određeni izradak, a proces dekodiranja formira podatke IKZ. Komponenta 2 kromosoma predstavlja nasumični generirani binarni niz brojeva duljine srednjeg dijela kromosoma što predstavlja skup SKZ_k (složenih SKZ-a), a proces dekodiranja daje informacije o odabiru SKZ-a. Posljednja, komponenta 3, predstavlja nasumični generirani uzlazni niz brojeva od 1 do $(D_{max} - 1)$ duljine desnog dijela kromosoma, a proces dekodiranja daje informacije svakog SKZ-a u IKZ-u određenu komponentom 1 i komponentom 2. Za svaki izradak struktura je identična.

5.4.4 Oblikovanje kromosoma

U prvoj komponenti kromosoma, za izradak N_{TI} , usvojena je prioritetna shema [34, 88, 113] za kodiranje IKZ čime se izbjegava stvaranje nemogućih KZ sekvenci. Iz primjera grafikona prioriteta na slici 5.9, uz pretpostavku da je broj KZ-a L , slika 5.11 ilustrira IKZ gdje je $L = 10$. U komponenti 1 kromosoma, svako mjesto (eng. *locus*) je povezano s jednim KZ, a svaka alela (eng. *allele*) predstavlja broj prioriteta odabira s obzirom na pridruženi KZ. Vrijednost gena je cijeli broj između 1 i g . Na temelju tehnike kodiranja temeljene na osnovi prioriteta, koristi se tehnika topološkog razvrstavanje [35, 87] s nultim stupnjem sortiranja. Čvor s najvišim prioritetom ima stupanj 0 i ne postoji drugi čvor koji mu prethodi. Kada se ukloni taj čvor traži se bilo koji drugi čvor stupnja 0 u grafikonu redosljedja. Postupak se ponavlja sve dok svi čvorovi nisu analizirani u topološki red. Dijagram toka dekodiranja za IKZ dan je u Prilogu A, slika A4.

Na primjer, prema grafikonu odnosa redosljedja, Prilog E, slika E1, IKZ koji odgovara komponenti 1 kromosoma prikazanom na slici 5.11 je KZ1 – KZ2 – KZ3 – KZ6 – KZ5 – KZ4 – KZ9 – KZ10 – KZ7 – KZ8. Navedeno proizlazi iz prije navedenog postupka gdje u prvom koraku, samo KZ1 ima

stupanj 0. Tako je KZ1 odabran kao prvi KZ. U drugom koraku, KZ2 ima stupanj 0 pa je on drugi KZ dok je na isti način treći KZ3. U četvrtom koraku KZ7, KZ6, KZ5 i KZ4 svi imaju stupnjeve 0. Zbog toga što KZ6 ima najveći prioritet (prema slici 5.11 to je 9), odabran je kao četvrti KZ. Nadalje, slijedi KZ5 kao peti KZ s obzirom da on ima sljedeće po veličini prioritet. Sljedeći je KZ4 kao šesti KZ prema veličini prioriteta. Nakon toga slijede KZ7, KZ9 i KZ10 koji dobivaju stupanj 0. Prema veličini prioriteta slijede KZ9 kao sedmi KZ, KZ10 kao osmi KZ i KZ7 kao deveti KZ. Preostaje KZ8 kao zadnji, deseti KZ. Koristeći IKZ algoritam dekodiranja komponente 1 kromosoma, svakom KZ-u iz skupa KZ_j dodjeli se vrijednost jednog gena. Potom se odabire čvor u dijagramu odnosa redoslijeda (sljedljivosti) KZ-a j -tog tipa izratka koji nema prethodnika, a ima najviši prioritet prema dodijeljenoj vrijednosti gena. Potom se izdvaja odabrani čvor grafa (KZ), a uklanjaju usmjereni bridovi (lukovi) prema ostalim čvorovima. Na posljetku se izdvojeni KZ pohranjuje u IKZ j -tog tipa izratka. Svakom permutacijom N brojeva može se dekodirati jedan IKZ.

Dekodiranje komponente 2 kromosoma, koji slijedi nakon dobivanja IKZ-a, vrši se zamjenom KZ-a kompozitnim SKZ-ima ukoliko vrijednost gena srednjeg dijela kromosoma to dozvoljava. Vrijednost gena je ili 0 ili 1. Svaki je lokus povezan s kompozitnim SKZ i svaka alela predstavlja indikator odabira u odnosu na pridruženi SKZ. Ako je gen 1, odgovarajući SKZ zamjenjuje KZ koje sadrži SKZ; inače, nema zamjene. Supstitucija uspijeva samo ako udio IKZ-a uključuje uzastopne KZ koji su točno sadržani u mješovitom KZ-u (nema drugih KZ među tih uzastopnim KZ-ima).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Komponenta 1	1	2	3	5	7	9	4	6	10	8

	30	31	39	43	47	51
Komponenta 2	1	1	1	0	0	0

	1	30	6	5	39	7	8					
Komponenta 3	0	0	0	1	2	2	3	3	4	4	4	5

Slika 5.11 Prezentacija niza (kromosoma) za jedan ISKZD

U primjeru komponente 2 kromosoma prikazan je skup kompozita SKZ-a, a prema slici 5.11 to su SKZ30, SKZ31, SKZ39, SKZ43, SKZ47, SKZ51, koji sadrže određene KZ-e. SKZ30 koji sadrži KZ2 i KZ3 može iste zamijeniti jer je i po sastavu jednostavan i sadrži samo dva KZ-a. Isto vrijedi i za SKZ 31. SKZ 39 sadrži KZ4, KZ9 i KZ10, može zamijeniti iste u IKZ-u. Za SKZ43 koji sadrži KZ5, KZ6, KZ7 i KZ8 supstitucija ne uspijeva jer KZ-i nisu uzastopni u promatranom IKZ-u. Isto vrijedi i za SKZ47 i SKZ51 te njihovi geni imaju vrijednost 0 što je prikazano slikom 5.11. Dijagram toka dekodiranja za ISKZ dan je u Prilogu A, slika A5. Nakon svih zamjena, svaki od preostalih KZ-a

zamjenjuje se odgovarajućim singularnim SKZ-om sve dok nije formiran ISKZ. U danom primjeru, ISKZ koji je prikazan na slici 5.11 je SKZ1 – SKZ30 – SK6 – SKZ5 – SKZ39 – SKZ7 – SKZ8 gdje su preostali KZ1, KZ5 i KZ6 zamijenjeni s SKZ1, SKZ5 i SKZ6. Budući da su odabrani SKZ-i određeni zamjenom povezanih KZ-a, odabrani SKZ moraju sadržavati sve KZ bez preklapanja.

Komponenta 3 kromosoma vrši dodjeljivanje svakog SKZ-a iz ISKZ izratka jednoj fazi obrade tj. bilježi lokaciju faze obrade određene komponentom 1 i 2. Lokus ovog dijela predstavlja svaki SKZ u sustavu ISKZ, a svaka alela predstavlja redni broj faze obrade kojoj je dodijeljen SKZ-u zabilježen pridruženim lokusom. Vrijednost svakog gena definirana je fazom obrade između 0 i $D_{max} - 1$, što osigurava da njihov broj nije veći od D_{max} . Ako se označi s P_b broj SKZ u ISKZ, vrši se izdvajanje p -tog SKZ-a iz ISKZ-a te dodjeljuje izdvojeni SKZ izratka fazi obrade prema vrijednosti izdvojenog gena. Komponenta 3 kromosoma sadrži ukupno toliko gena b koliko i komponenta 1, međutim P_b može biti manji u ovisnosti o vrijednostima komponente 2. Dakle, upotrebljivi su oni geni, koji počinju od prvog gena, čija je vrijednost $\min(D, P_b)$. Kako bi se zadržao odnos prioriteta SKZ u ISKZ, vrijednost svakog promatranog gena nikad nije veća od njegovih sukcesivnih gena na desnoj strani komponente 3 kromosoma. U primjeru iz slike 5.11 postoji sedam korisnih gena gdje su fazi obrade 0 dodijeljeni SKZ1 i SKZ30, fazi obrade 1 SKZ6, fazi obrade 2, SKZ5 i SKZ39 te fazi obrade 3 SKZ7 i SKZ8. SKZ-i dodijeljeni istoj fazi obrade obavljaju se uzastopce u skladu sa odnosom redoslijeda obrade. Dijagram toka prikazan je u prilogu A, slika A6

Prikazanim modelom formiranja kromosoma i putem dekodiranja svake njegove komponente može se saznati koji su SKZ dodijeljeni svakoj fazi obrade, a tamo gdje faze obrade nema dodjelu SKZ-a eliminira se u fazi dekodiranja. Prikladnim transformacijskim operatorima križanja i mutacije, mogu se prikazati svi ISKZD.

5.4.5 Dijagram toka

Kako je GA iterativan procesu, može se prikazati odgovarajućim dijagramom toka. Svaka pojedina iteracija predstavlja generaciju. U ovisnosti o postavljenom problemu, broj generacija ili iteracija može biti od nekoliko stotina do nekoliko tisuća. Nakon izvršenja dovoljnog broja iteracija, dobivaju se najkvalitetnije jedinice tj. optimalno rješenje. Predloženi pristup, opisan je dijagramom toka prikazanim na slici 5.13, a sastoji se od devet osnovnih koraka i 12 pod-koraka, prikazanih u Prilogu A.

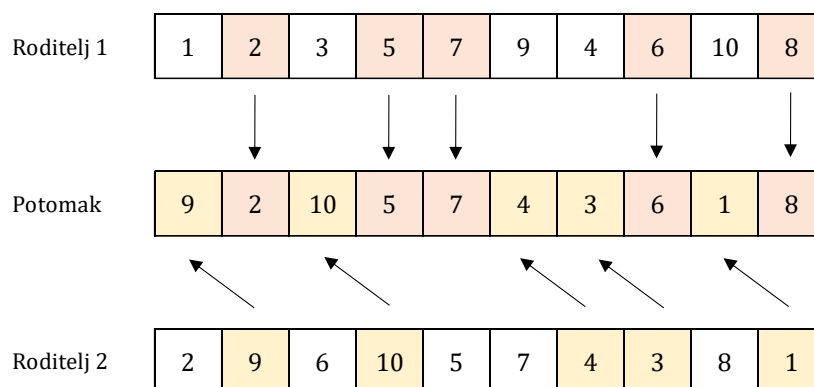
5.4.6 Selekcija i genetski operatori

5.4.6.1 Selekcija

Selekcija je proces kojim se osigurava prenošenje boljeg genetskog materijala iz generacije u generaciju. Odabir (eng - *selection*) osigurava pokretačku snagu u GA i usmjerava pretraživanje GA prema optimalnim područjima u prostoru pretraživanja. Kako je funkcija cilja dobiti minimalni trošak, izbor selekcije $\mu + \lambda$ prema [36] usvojen je za dobivanje visoke kvalitete rješenja. U $\mu + \lambda$ svaki od λ potomaka ima svoj faktor dobrote, kao što imaju i svi roditelji μ . Odabir koji se vrši predstavlja deterministički postupak koji odabire najbolje kromosome od roditelja i potomaka čime se jamči monoton tijek evolucije, a najbolji iz oba skupa prelaze u sljedeću generaciju. Kako bi se zadržala raznolikost populacije, kromosom se odbacuje ako je isti prethodno odabran tijekom postupka odabira.

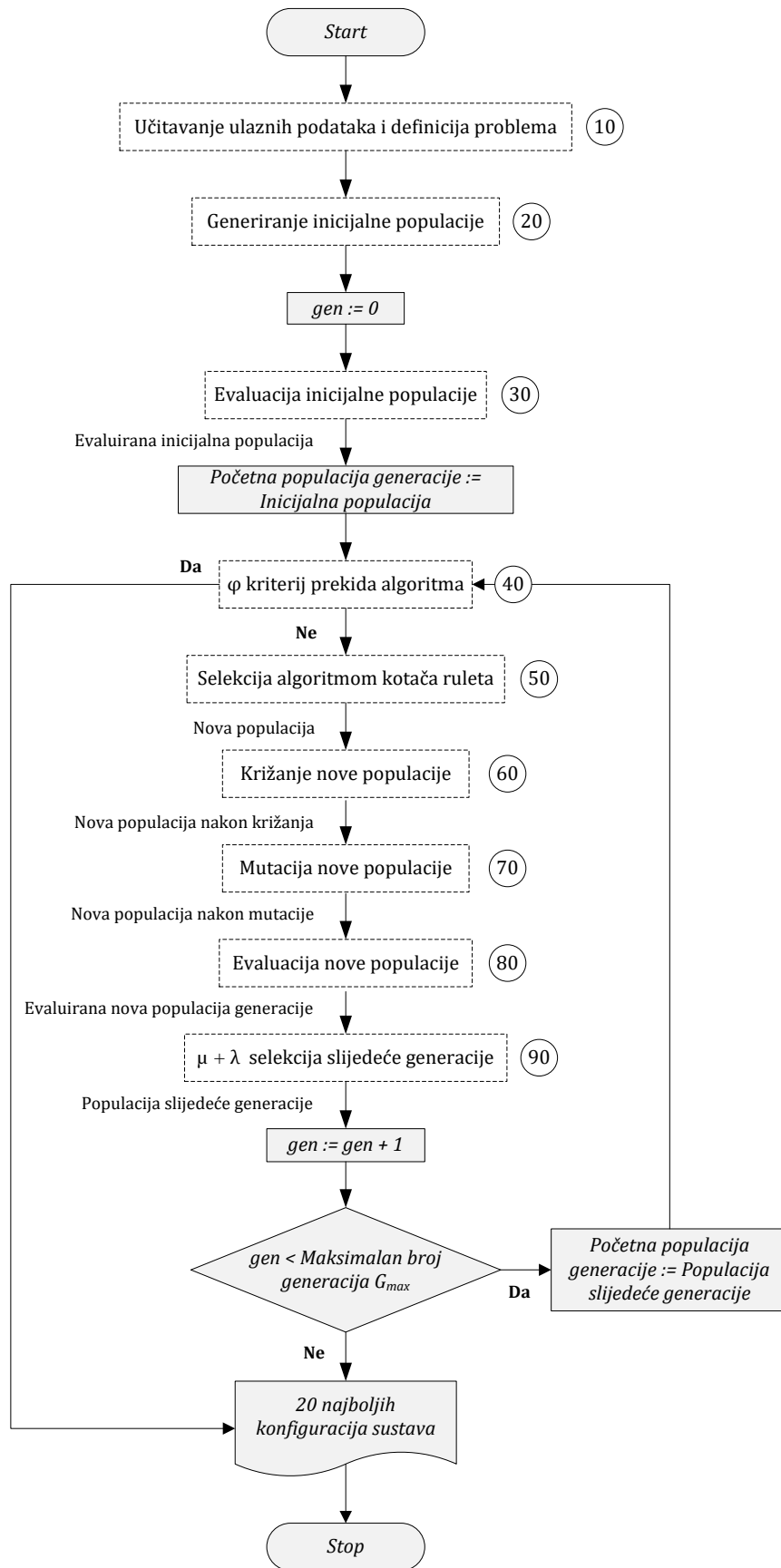
5.4.6.2 Križanje

Križanje (engl. *crossover*), je proces u kojem nastaje nova jedinka (potomak) iz dvije jedinke roditelja gdje potomci nasljeđuju svojstva svojih roditelja te imaju jednak broj gena, pa je vjerojatnost nasljeđivanja obično jednaka i iznosi 0.5. Prema [118] predloženo je nekoliko operatora križanja: križanje djelomičnim mapiranjem, križanje temeljeno na poziciji, križanje temeljeno na redosljedu, križanje u ciklusu. Za komponentu 1 kromosoma koristi se križanje temeljeno na poziciji. U osnovi, to je svojevrsni ujednačeni tip križanja temeljen na položaju za permutacijsko kodiranje koje sadrži i postupak popravljavanja s time da geni nisu izabrani uzastopno što je prikazano slikom 5.12.



Slika 5.12 Križanje komponente 1 kromosoma temeljeno na poziciji

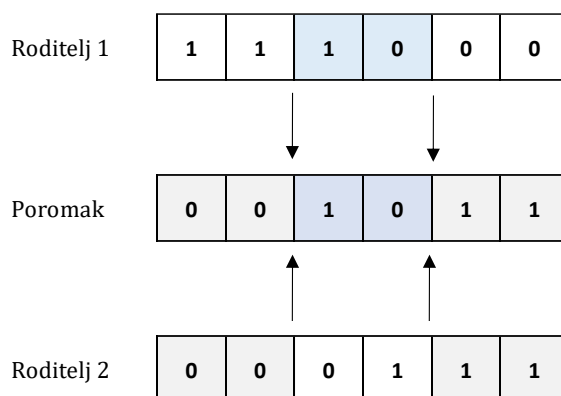
Nakon definiranja vjerojatnosti križanja c_m , izdvaja se komponenta 1 kromosoma obje jedinke (roditelja) te nasumično odabire skup pozicija gena roditelja 1. Ti geni se kopiraju na istu lokaciju (poziciju) komponente 1 kromosoma prvog potomka.



Slika 5.13 Dijagram toka GA

To se isto čini i s roditeljem 2 gdje se njegovi geni kopiraju na nepopunjene lokacije prvog potomka redom s lijeva na desno. Dobivena su dva potomka s komponentama 1 kromosoma i zadržanim permutacijskim kodiranjem.

Križanje temeljeno na poziciji osigurava da je potomstvo i dalje permutacija N brojeva. Odabrano križanje komponente 2 kromosoma je križanje s dvije prekidne točke u kojem roditelji razmjenjuju sve gene između dvije točke. Postupak križanja je sličan prethodnom osim što je točka dijeljena drugačija gdje se nasumično odabiru dvije pozicije gena roditelja (dvije prekidne točke). prikazano na slici 5.14.



Slika 5.14 Križanje komponente 2 kromosoma temeljeno na dvije točke prekida

Geni se na isti način kao u prethodnom slučaju kopiraju u potomka, od lijevog dijela kromosoma do prve prekidne točke roditelja 1, zatim od prekidne točke 1 do prekidne točke 2 roditelja 2 te od druge prekidne točke do kraja komponente 1 kromosoma prvog roditelja. Dobivena su dva potomka s križanom komponentom 2 kromosoma i zadržanim binarnim kodiranjem. U ovisnosti kako je kromosom napisan u svojem prirodnom obliku ovisiti će tip odabranog križanja.

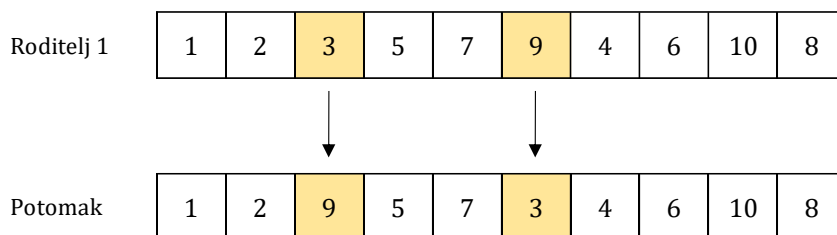
5.4.6.3 Mutacija

Nakon križanja, drugi bitan alat sa kojim se poboljšavaju rezultati je mutacija koja omogućava:

- izbjegavanje zaustavljanja na lokalnom optimumu funkcije cilja koja se optimira,
- raznolikost genetskog materijala,
- pretraživanje novih, potencijalno najboljih rješenja,
- obnavljanje genetskog materijala, onog kojeg nije moguće vratiti samo križanjem jedinki.

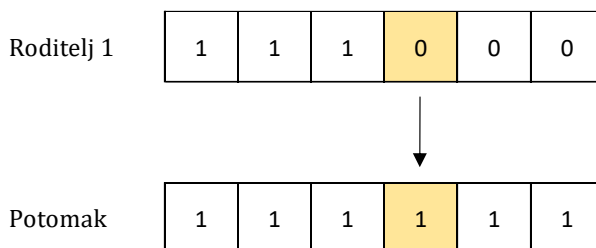
Ulazni parametar za algoritam je vjerojatnost mutacije p_m koja, ukoliko je bliska jedinici, dovodi da se algoritam pretvara u algoritam slučajne pretrage prostora rješenja, a ako se približava vrijednosti 0, populacija se može pozicionirati u najbližem lokalnom optimumu. U analiziranom primjeru, svaka komponenta kromosoma koristi neku od metodu mutacije. Za komponentu 1

koristi se metoda uzajamne razmjene koja se ostvaruje slučajnim odabirom dva gena i razmjene tih dvaju gena što je prikazano slikom 5.15.



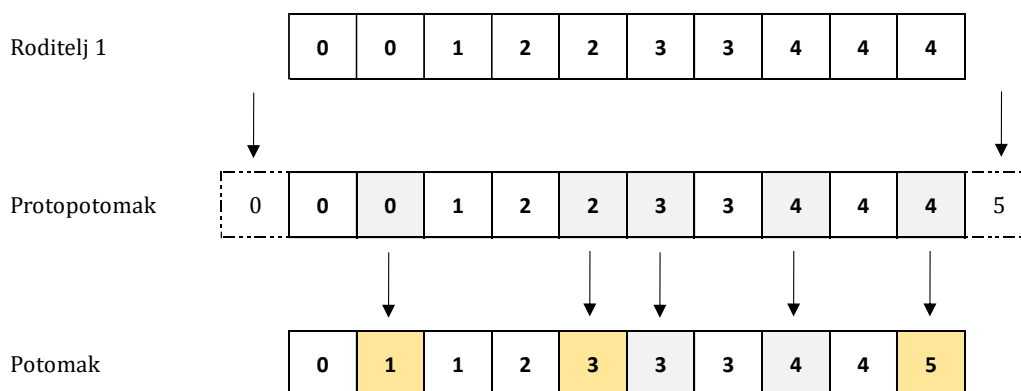
Slika 5.15 Mutacija komponente 1 kromosoma temeljeno na uzajamnoj razmjeni gena

Mutacija komponente 2 kromosoma vrši se metodom inverzije gdje izdvojeni gen, nasumično generiran, promjeni (okrene) vrijednost. To je ujedno i najjednostavniji tip mutacije i usporediv je s promjenom bitova kod binarnog prikaza, slika 5.16.



Slika 5.16 Mutacija komponente 2 kromosoma temeljeno na inverziji gena

Kod posljednje, komponente 3 kromosoma, mutacija se vrši se metodom usporedbe sa susjedima, gdje se kromosom proširuje dodavanjem 0 na početku i $D_{max} - 1$ na kraju komponente, prikazano na slici 5.17.



Slika 5.17 Mutacija komponente 3 kromosoma metodom usporedbe sa susjedima

Nakon nasumičnog odabira polovine gena (zaokruženo na prvi manji cijeli broj) za svaki odabrani gen se nasumično odabire redosljed susjeda za usporedbu. Vršiti se usporedba s lijevom susjednim genom te s desnim susjednim genom. Ako je odabrani gen manji od susjednog desnog gena, dodaje

se vrijednost 1, a ako je odabrani gen veći ili jednak od lijevog gena, oduzmi se vrijednost 1. Krug se ponavlja još jednom nakon čega se potvrđuje status gena komponente 3 kromosoma. Dijagram toka prikazan je u Prilogu A, slika A19. Ovom metodom mutacije osigurava se da:

- promatrani gen nije nikad veći od njegovog susjednog desnog gena, što znači da je zadovoljeno ograničenje redoslijeda SKZ u svakom ISKZ,
- je omogućena promjena lokacija faze obrade,
- se proširenjem kromosoma omogućuje da u prvoj fazi obrade budu zastupljeni ostali tipovi strojeva,

Na taj način su zadovoljeni zahtjevi ograničenja. U Prilogu A dani su svi dijagrami protoka za odabrani GA.

6 PRAKTIČNI PRIKAZ METODE NA SKALABILNOM VIŠEPREDMETNOM RPS

Predstavljena metoda utjecaja skalabilnosti na formiranje optimalnog višepredmetnog RPS provjerit će se na konkretnom primjeru uz korištenje realnih ulaznih podataka i veličina. Svrha praktičnog prikaza je:

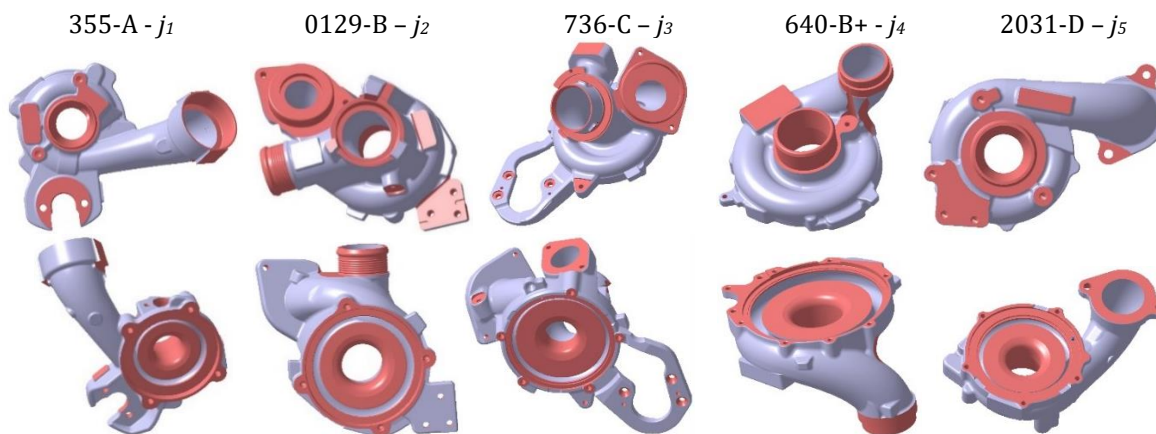
- predstaviti realan skalabilni VRPS temeljen na postojećim konceptima strojeva i opreme,
- ocijeniti utjecaj primjene koncepta skalabilnog sustava u odnosu na postojeće koncepte višepredmetnih PS, korištenjem realnih podataka
- prikazati efikasnost izrađenog računalnog programa za predstavljanje optimalnog konfiguracijskog puta u cilju generiranja minimalnih početnih troškova.

Važno je napomenuti da je praktični prikaz izveden na osnovi i podacima postojeće proizvodnje na području izrade dijelova za automobilsku industriju. Pri tome se koriste aktualni tehnološki procesi, koncepti stezanja i korišteni rezni alati kao i informacije o cijeni koštanja proizvodne opreme ugrađene u proizvodni proces.

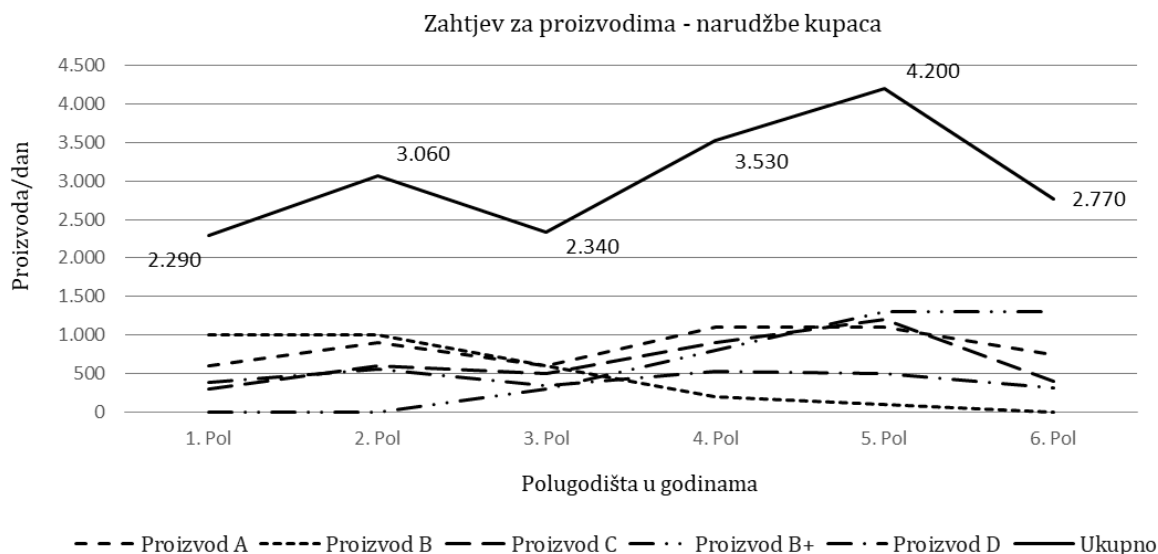
6.1 Predstavljanje proizvodnog programa

Formirat će se RPS namijenjen proizvodnji grupi proizvoda kućišta turbokompresora, prikazanih na slici 6.1 (crvenom bojom predstavljene površine na kojima se vrši strojna obrada). Izrada predmetnih proizvoda sadrži složen tehnološki proces, a sačinjavaju ga: taljenje aluminija, izrada jezgri, lijevanje gravitacijskim i (ili) tlačnim lijevom, odrezivanje (piljenje) uljevne grane, žarenje (spaljivanje pijeska), pjeskarenje spirale, strojno i ručno obrušivanje i priprema za strojnu obradu, strojna obrada, odstranjivanje oštih rubova (strojno i ručno), pranje, testiranje nepropusnosti, montaža te automatska kontrola i označavanje. Kako bi se praktični dio ovog rada držao u razumnim granicama, u analizi će biti zastupljeni samo procesi strojne obrade.

U analizi je uzeto u obzir pet različitih proizvoda, prosječne razine složenosti, za više konačnih kupaca, tehničke i tehnološke sličnosti sa poznatim podacima o trenutnoj potražnji tj. količinama i dinamici proizvodnje. Predviđanja za naredni period dobivena su na osnovi prognoza i najava kupaca u periodu tri godine, podijeljena na šest polugodišta, prikazana na slici 6.2.



Slika 6.1 Grupa proizvoda kućišta turbokompresora



Količina proizvoda [proizvoda/dan]						
Polugodišta	1. Pol	2. Pol	3. Pol	4. Pol	5. Pol	6. Pol
Proizvod A	600	900	600	1.100	1.100	750
Proizvod B	1.000	1.000	600	200	100	0
Proizvod C	300	600	500	900	1.200	400
Proizvod B+	0	0	300	800	1.300	1.300
Proizvod D	390	560	340	530	500	320
Ukupno	2.290	3.060	2.340	3.530	4.200	2.770

Q_j [proizvoda/sat]						
PP	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6
355-A - j_1	38	57	38	69	69	47
129-B - j_2	63	63	38	13	7	0
736-C - j_3	19	38	32	57	75	25
640-B+ - j_4	0	0	19	50	82	82
2031-D - j_5	25	35	22	34	32	20
Ukupno	145	193	149	223	265	174

Slika 6.2 Prikaz dinamike potražnje za dani program s predviđenim radom u dvije smjene

Za odabranu grupu proizvoda i kategoriju kupca (sistemske dobavljač) u automobilske industriji, odabrani horizont predstavlja realnu dinamiku. Stvarni životni vijek ovog tipa proizvoda je od 3 do 5 godina nakon čega slijede rekonstrukcije postojećih proizvoda ili nova konstrukcijska rješenja. Postoje sezonske oscilacije u dobavi koje se temelje na tržišnoj dinamici tijekom godine. Karakteristike proizvoda u odnosu na scenarij dinamike potražnje:

- proizvod A - j_1 karakterizira ustaljena potražnja i dinamika. Evidentan je porast potražnje u narednom periodu,
- proizvod B - j_2 ima trajan pad potražnje i očekuje se zamjena proizvoda zbog poboljšanja u konstrukciji,
- proizvod C - j_3 karakterizira potražnja koja ima kontinuirani rast do punih količina sa naglim padom u zadnjem periodu potražnje,
- proizvod B+ - j_4 ima trajan rast od drugog perioda potražnje, a zamjenjuje proizvod B kao poboljšana varijanta,
- proizvod D - j_5 karakterizira kontinuiranu potražnju srednjih količina.

Svi proizvodi su u dimenzijskim okvirima, širina, dužina, visina 250 mm, sa zahtjevima točnosti do zaključno IT6. Zahtijevana površinska hrapavost postiže se korištenjem PKD reznih alata za sve procese glodanja. U Prilogu C dane su tehnologije i postupci obrade za svaki proizvod i odabranu proizvodnu opremu s vremenima izrade za predviđene strojne zahvate.

6.2 Utjecajni elementi i rubni uvjeti

Da bi se postavio koncept PS, potrebno je identificirati pojedine grupe utjecajnih elemenata koji su osnova za konačno formiranje optimalnog više predmetnog skalabilnog RPS. Postavljenim proizvodnim programom, proizvodnom opremom te predloženim računalnim modelom može se zaključiti:

- proizvodi pripadaju istoj grupi, određene mješavine i obujma koje odgovaraju jednoj konfiguraciji s PS-a,
- kako se zahtjevi kupaca mijenjaju s vremenom, konfiguracije RPS-a evoluiraju s vremenom u skladu s takvim zahtjevima,
- horizont perioda potražnje definiran je kroz tri godine (ukupno šest polugodišta), za što su predviđeni optimalni konfiguracijski odabiri kao rezultati izračuna modela,
- RPS se sastoji od postojećih konvencionalnih CNC obradnih strojeva povezanih transportnim sredstvima (robotizirane transportne linije, manipulatori, manipulativne konzole) s ciljem proizvodnje bez među skladištenja,
- predviđeni rad sustava planira se u dvije smjene dok se u trećoj smjeni vrše prediktivni pregledi i podešavanje opreme,

- RPS je oblikovan u modelu VRPS volumena proizvodnje iznad odgovarajućeg PP. Budući da se mješavina proizvoda i/ili promjena volumena mijenjaju nad nadolazećim PP, prethodna konfiguracija RPS-a se preoblikuje kako bi pružila točnu funkcionalnost i kapacitet potrebni za predstojeći PP na ekonomičan način,
- tok materijala unutar proizvodnog procesa je složen te zbog formiranog posebnog oblika komponente 3 kromosoma, bit će omogućeno u svakoj fazi obrade imati različite tipove strojeva,
- povezivanje strojeva i njihova međusobna komunikacija na načelima Industrije 4.0 omogućuju brzu izmjenu strojeva u proizvodnom procesu tako da su na raspolaganju proizvodni kapaciteti koji su upravo potrebni u datom PP-u,
- dana su prostorna ograničenja u širini i dužini proizvodnog sustava, a funkcijom cilja osigurava se minimalna investicija konfiguracije u svakom PP-u,
- rastavljanje proizvodnih operacija na KZ i SKZ omogućuje bolju prilagodbu odabranom strojnom parku. Da bi se uspostavio VRPS, ključan je odabir i dodjela SKZ koji se temelji na odnosima među SKZ i KZ. Za izradu proizvoda, svi KZ za svaki proizvod moraju se izvoditi u određenom redoslijedu. Pregled dodjeljenih SKZ-a dan je u Prilogu E
- dodjeljivanje svakog dijela svakog ISKZ za svaki proizvod na jedan proizvodni kapacitet duž RPS-a čini izvediv SKZ zadatak (ISKZD),
- generirana konfiguracija RPS-a definirana je fazama obrade, brojem paralelnih strojeva po fazi obrade, tipu stroja i dodijeljenim SKZ za svaku fazu obrade, kao i odnosima redoslijeda između faza obrade, bez kršenja ograničenja redoslijeda među SKZ za svaki proizvod, ograničenog prostora i ograničenih ulaganja, kao i ograničenja kapaciteta,
- kao ograničavajući faktor dodan je termin ili rok dobave pojedinog proizvodnog kapaciteta. S obzirom da se količine u proizvodnji dinamički mijenjaju, utjecaj termina dobave proizvodnog kapaciteta uvjetuje optimalni odabir opreme i time postavljanje ekonomične konfiguracije RPS-a,
- u postojećoj literaturi [28] smatra se da je nepraktično i pretjerano kompleksno imati u istoj fazi obrade proizvodne kapacitete koji nemaju iste proizvodne karakteristike (ili koji ne izvode isti slijed zahvata – operacija). Upotrebom dinamičkih transportnih sustava i njihovim slaganjem te primjenom odgovarajućeg matematičkog modela moguće je stvoriti kompleksne asimetrične proizvodne sustave koji mogu zadovoljiti gore navedeni uvjet.
- Pri oblikovanju VRPS, potrebno je dobro poznavanje tehnološkog procesa, funkcionalnost proizvodnih sredstava, logističke opreme te značajke steznog i reznog alata. Poznavanje organizacijskih i planskih komponenti mogućih modela proizvodnih sustava je također od velike važnosti kao i uvažavanje propisa zaštite na radu i okoline.

6.3 Koncept strojeva i tehnologije

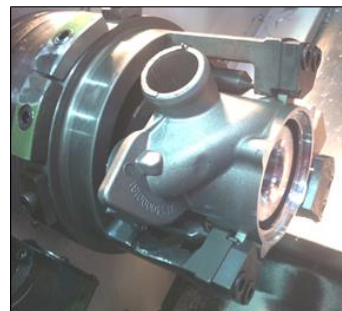
VRPS, koji se analizira u ovom radu, sastoji se od postojeće CNC proizvodne opreme koja je dostupna na tržištu. Premda su rekonfigurabilni strojevi ključni pokretač rekonfigurabilnih sustava u smislu postizanja promjenjive funkcionalnosti i skalabilnosti kapaciteta, trenutni stupanj razvoja industrije strojeva i tehnike nije na tom stupnju da ponudi široko primjeniv rekonfigurabilni alatni stroj. Međutim, postoje načini da se iskoriste prednosti koje donose nove tehnologije i njihova inteligentna upotreba u prilagodljivosti PS, pogotovo one koje su u vezi s novim tehnološkim spoznajama u novoj paradigmi Industrije 4.0. Mogućnosti koje pružaju nove tehnologije i povezivanja na razini M2M, pobliže je objašnjeno u drugom poglavlju.

Postojeća strojna oprema može se softverski prilagoditi i nadograditi novim funkcijama uz logističku potporu na razini upravljanja steznim napravama, reznim alatom i manipulacijom izradaka kroz cijeli PS. Svaki stroj predstavlja modul unutar proizvodnog sustava koji, pripremljen prema načelima RPS, predstavlja gradbeni blok. Definicijom SKZ-a proces obrade je rastavljen i time omogućuje konvertibilnost tj. brzo prebacivanje procesa obrade među strojevima te spremnost sustava za prihvatanje novih proizvoda iz grupe proizvoda. Povezanost sustava s konstrukcijom te primjena AI omogućuje prilagodbu PS u realnom vremenu, a na istoj osnovi kontrola proizvoda i procesa omogućuje prepoznavanje izvora problema i usporedbu s kvalitetom i pouzdanošću. Tako postavljen RPS omogućuje postavljanje optimalne količine opreme na ekonomski učinkovit način zadovoljavajući potrebe za proizvodima koliko i kada treba za određeni PP. Iz ovih premisa može se zaključiti da su postojeći strojni park i PS zadovoljili načela RPS (modularnost, integrabilnost, konvertibilnost, dijagnostibilnost, prilagodljivost, skalabilnost) te omogućili prilagođenu fleksibilnost u kapacitetu i funkcionalnosti s ciljem smanjenja vremena podešavanja sustava i izmjene proizvodnje. Glavni cilj i motivacija RPS temelji se na uvjerenju da je iz navedenog koncepta PS moguće postići ekonomsku korist povećanjem raspoloživosti te smanjenjem viška kapaciteta i funkcionalnosti. Organizacija procesa strojne obrade i pomoćnih procesa bit će tekući fleksibilni višeredni model protoka, uz skriveno t_{pz} (koncept strojne opreme i sustava omogućava podešavanje procesa u skrivenom vremenu). Logistika i transport između pojedinih zahvata vrši se automatski, šinskim transportom, konvejerima ili manipulatorima, kao u primjeni manipulacije steznim napravama i alatima. Udio radne snage je mali, visokoobrazovan, čija je svrha nadgledanje, podešavanje i optimiranje procesa obrade te realizacija plana proizvodnje. Prema načelima RPS, strojni park se dodaje ili oduzima prema rezultatima modela, na brz i učinkovit način. U tablici 6.1. prikazane su osnovne karakteristike korištenog strojnog parka i prateće opreme neophodne za formiranje višepredmetnog skalabilnog RPS, a na slici 6.3 ogleđni primjeri strojeva i načini stezanja izradaka (prema realnim podacima iz prakse preuzetih iz tvornice P.P.C. Labin d.o.o.).

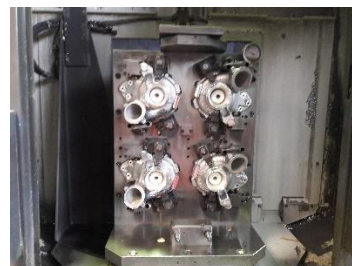
Tablica 6.1 Pregled proizvodne opreme za formiranje VRPS

Stroj	Opis proizvodne opreme	Cijena Tr [N]	Vrijeme dobave td,z [mjesec]
<i>i</i> ₁ (S1)	CNC visokoproduktivna tokarilica	70.000	1
	Komadna tokarilica sa mogućnošću ručnog i automatskog manipuliranja izratkom		
	Pogonjeni rezni alati, revolver sa maksimalno 12 alata		
	Okretaji vretena [min-1] - 5.000, snaga motora vretena 11 kW		
	Površina u prostoru š x d [m] - 2,3 x 1,6	5.000	
	Stezna gnijezda i šape, d = 320 mm	Ukupno	75.000
<i>i</i> ₂ (S2)	CNC visokoproduktivna tokarilica sa manipulatorom (6-osni)	70.000	2
	Kao <i>i</i> ₁	5.000	
	Stezna gnijezda i šape, d = 320 mm	25.000	
	Manipulator sa skaldištem i odlaganjem izratka, 6-osni, s komorom za ispuhivanje	Ukupno	
<i>i</i> ₃ (S3)	Horizontalni CNC OC sa 3 osi gibanja	380.000	3
	Jedno vreteno		
	Izaradak se može postavljati ručno ili manipulatorom		
	Postavljanje i skidanje izratka u strojnom vremenu (dvije palete)		
	Izmjena paleta automatska, rotacija paleta sa indeksacijom 1°(B-os)		
	Maksimalno 60 alata u magazinu alata, automatska izmjena, prihvat alata HSK 63		
	Okretaji vretena [min-1] - 15.000, snaga motora vretena 22 [kW]		
	Izmjena alata (eng. <i>chip-to-chip</i>) [sec] - 2,7; izmjena paleta [sec] - 9,5		
	Površina u prostoru š x d [m] - 2,7 x 4,7	60.000	
Set dviju paleta sa 4 izratka na paleti za svaki izradak	Ukupno	440.000	
<i>i</i> ₄ (S4)	CNC visokoproduktivnu OC sa fiksnim alatima	900.000	7
	Po dva vretena u zahvatu		
	Izaradak se može postavljati ručno ili manipulatorom		
	Koncept stroja sa fiksnim alatima i pokretnom napravom		
	Postavljanje i skidanje izratka u strojnom vremenu, izmjena paleta automatska		
	Maksimalno 12 dvostrukih alata u radnom prostoru; prihvat alata HSK 63		
	Okretaji vretena [min-1] - 18.000, snaga motora vretena 20 [kW]		
	Pristup alatu (eng. <i>chip-to-chip</i>) [sec] - 1,2; izmjena paleta [sec] - 12		
	Površina u prostoru š x d [m] - 3,1 x 5	80.000	
Naprava sa prihvatom za dva izratka	Ukupno	980.000	
<i>i</i> ₅ (S5)	CNC horizontalni modulni OC sa 5 osi gibanja	1.300.000	11
	Po jedno vreteno u zahvatu, 3 vretena u istovremenom radu		
	Izaradak se može postavljati ručno ili manipulatorom		
	Koncept stroja sa 3 radne jedinice i jedinicom za stavljanje i skidanje izradaka		
	Postavljanje i skidanje izratka u strojnom vremenu, izmjena paleta automatska		
	Magazin alata sa 3 x 2 x 12 alata; prihvat alata HSK A-40		
	Okretaji vretena [min-1] - 13.000, snaga motora vretena 3 x 18 [kW]		
	Pristup alatu (eng. <i>chip-to-chip</i>) [sec] - 1; izmjena paleta [sec] - 4,5		
	Površina u prostoru š x d [m] - 12 x 5	60.000	
4 x naprava sa prihvatom za jedan izradak	Ukupno	1.360.000	
<i>i</i> ₆ (S6)	CNC visokoproduktivnu OC sa fiksnim alatima	1.000.000	8
	Kao <i>i</i> ₄	235.000	
	Koncept stroja sa fiksnim alatima i pokretnom napravom te B osi, indeksacija 1°	25.000	
	Manipulator sa skaldištem i odlaganjem izratka, 6-osni, s komorom za ispuhivanje	Ukupno	

Procesi obrade na svim izradcima započinju otvaranjem baze za što su namijenjene visokoproduktivne tokarilice (S1 i S2) čija se izmjena steznih naprava (uglavnom „amerikaner“ glava) vrši manipulatorom u ovisnosti o obradi pojedinog izratka. Kako je obrada u tim fazama slična, svi rezni alati nalaze se u svakoj tokarilici pa zamjena alata nije potrebna osim u slučaju



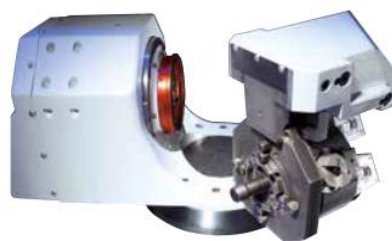
CNC tokarilice s pogonjenim reznim alatima



Horizontalni CNC OC s tri osi gibanja



CNC visokoproduktivni OC s fiksnim alatima



CNC horizontalni modularni OC s pet osi gibanja

Slika 6.3 Koncepti strojne opreme u primjeni steznih elemenata

istrošenosti ili loma. Centriranje izratka vrši se automatski. Razlika između ova dva tipa tokarilica je u manipulativnoj jedinici koja se dodaje drugoj tokarilici. Strojna obrada ostalih značajki vrši se na OC koji posjeduju različite karakteristike, ali mogu u kompletu izvršiti sve procese obrade. Horizontalni CNC OC (S3) su jednostavni (bazičnog koncepta) i sadrže tri osi gibanja s jednostavnim hidrauličnim steznim napravama koje sadrže maksimalno po četiri izratka u jednom stezanju. Svaka stezna naprava prilagođena je određenom izratku. Svrha takvog pristupa je jednostavnost stezanja i prihvatljiva težina za automatsku manipulaciju. Strojevi koriste kompjutorski kontrolirana vretena, linearne pogonske motore te precizne klizne ležaje koji su ugrađeni u čvrstu noseću strukturu. Jedan od konceptata visokoproduktivnih OC temeljen je na pokretnoj steznoj napravi i fiksnim reznim alatima gdje se obrada vrši pomicanjem naprave na rotirajući rezni alat. U ovom slučaju su uzeta dva slična koncepta (S4 i S6), a razlika je u tome što stroj S6 omogućuje obradu kompletnog izratka u jednom stezanju bez otpuštanja, dodavanjem B-osi tj. rotacije izratka oko vlastite osi. Time je omogućen pristup izratku prema svim površinama obrade. Modularni OC s pet osi gibanja (S5) treći je koncept obradnog stroja koji je primijenjen u ovom radu. Sadrži četiri modula u cjelini na kojima se vrši predviđena obrada. Ovaj koncept stroja je najskuplji, ali su mu i vremena izrade najkraća. Sadrži modul za stavljanje i skidanje izratka u proces obrade gdje je moguća i izmjena stezne naprave. Stezna napravu sadrži jedno stezno mjesto, a premješta se od modula do modula u kojima su raspoređene grupe reznih alata u skladu s dodijeljenim SKZ.

Sustav za međufaznu manipulaciju izradcima, steznim i reznim alatima sadrži 6-osne manipulatore, programabilne transportne trake koje se mogu prema potrebi dodavati ili oduzimati u ovisnosti o potrebnom strojnom parku. U sklopu PS nalaze se i skladišta reznog alata i skladišta steznih naprava koja se pozivaju prema predviđenim programskim postavkama upravljačkog računalnog programa.

6.4 Ulazni podaci

Za pronalaženje minimalne početne investicije strojne opreme u svakom PP, za višepredmetni skalabilni RPS, na raspolaganju je pet proizvoda s brojem Z i SKZ-a prema tablici 6.2:

Tablica 6.2 Odnos Z, KZ i SKZ za svaki proizvod

	Z	KZ	SKZ	Jednostavni SKZ	Složeni SKZ
A - j ₁	20	12	17	12	5
B - j ₂	19	10	15	10	5
C - j ₃	25	13	19	13	6
B+ - j ₄	15	11	16	11	5
D - j ₅	17	10	16	10	6

Informacije o obradi svakog SKZ-a dan je u Prologu F, a u Prilogu B dana je veličina kromosoma formiranog na osnovi pet izradaka ukupne veličine 139 gena. Grafikoni odnosa redoslijeda obrade dani su u Prilogu E, za svaki izradak. Za svaki od ukupno šest PP dana je analiza minimalne investicije strojne opreme gdje svaki PP raspoređen u 6 mjeseci. Pregled proizvodne opreme i vremena njihove dobave dan je u tablici 6.1, a količina potražnje dana je slikom 6.2. Stopa amortizacije proizvodne opreme je 10%, a godišnja kamatna stopa iznosi 12%. Konfiguracijska dužina ili ukupni broj faza obrade ograničen je na šest dok je konfiguracijska širina ili maksimalni broj strojeva po jednoj fazi obrade ograničena na maksimalno 10 strojeva. Dozvoljena investicija ne smije prijeći 1 Mil. NJ. Korištenjem navedenih podataka, algoritam pronalazi 20 najboljih konfiguracija, poštujući ograničenja investicije, konfiguracijske širine i dužine instalirane proizvodne i logističke opreme, za predviđene proizvode i periode potražnje u šest PP. Za svaku optimizaciju izvedeni su dijagrami konvergencije testirani s različitim vjerojatnostima križanja c_m i mutacije p_m i inicijalnom populacijom. Prati se najbolja jedinka populacije i prosjek svih jedinki kroz generacije. U radu korišten je programski paket Pyton. Evolucija je izvođena paralelno s četiri logičke jezgre kako bi proces izračuna bio što kraći. Vrijeme izračuna na temelju predloženog modela optimizacije u prosjeku je iznosilo oko 40 minuta po jednom optimizacijskom ciklusu za svaki prag potražnje. Vrijeme potrebno za izračun je razumno s obzirom na veliki prostor rješenja i brojna ograničenja koja je teško zadovoljiti.

6.4 Izračun i dobivena rješenja GA za odabrane vremenske horizonte

Unosom definiranih vrijednosti parametara dobiveni su rezultati optimalnih skalabilnih konfiguracija za šest perioda potražnje. Da bi se identificiralo najbolje konfiguracije VPPL u prostoru pretraživanja odabrani su odgovarajući parametri GA. Veličina populacije definirana je empirijski sa 60 kromosoma na temelju percipirane složenosti problema i dimenzije u prostoru pretraživanja s veličinom kromosoma od 139 gena. Nasumično generiranje članova inicijalne populacije i evaluacija inicijalne populacije izvršeno je zasebno za svaku komponentu kromosoma, prikazano u Prilogu B. Vjerojatnosti križanja c_m i mutacije p_m kombinirani su s više vrijednosti kako bi se dobili optimalni rezultati. Broj iteracija s definiranim vjerojatnostima postavljen je na 2500 ciklusa ili do zadovoljenja uvjeta prekida algoritma tj. $\varepsilon = 0,001$. Prema nekim od dobivenih rezultata bilo bi potrebno povećati broj iteracija, ali zbog veličine problema i potrebnog vremena izračuna ustanovljeno je da ovaj prag daje dovoljno dobru aproksimaciju. Evoluiranje populacije izvršeno je 20 puta s 20 različitih kombinacija vrijednosti c_m , p_m i početnim populacijama za svaki PP. U nastavku je na slici 6.4 dan prikaz ispisa ulaznih podataka za odabrani peti PP, a na slici 6.5. dobiveni rezultati konfiguracije s minimalnim početnim troškom, odabrani kromosom te raspored SKZ- a za svaku fazu obrade.

5-ti period (5. Pol)

Period potražnje: $u_i = 5$

Trajanje plana potražnje: $t_{PP} = 0,5$

Kamatna stopa: $k_s = 0,12$

Amortizacija: $a_i = 0,1$

Dužina konfiguracije: $D_{max} = 6$

Širina konfiguracije: $PA_{max} = 10$

Maksimalna investicija: $T_{vi\ max} = 1.000 \times 10^3$ [NJ]

Potražnja: $Q_j =$

$j_5 - D = 32$ [kom/h]
$j_3 - C = 75$ [kom/h]
$j_1 - A = 69$ [kom/h]
$j_2 - B = 7$ [kom/h]
$j_4 - B+= 82$ [kom/h]

Raspoloživi strojevi: $r = S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$

KZ_j za svaki izradak:

D = [[KZ1, KZ2, KZ3, KZ4, KZ5, KZ6, KZ7, KZ8, KZ9, KZ10]
C = [KZ2 1, KZ3 1, KZ11, KZ12, KZ13, KZ14, KZ5, KZ15, KZ16, KZ17, KZ18, KZ9, KZ10]
A = [KZ1_1, KZ2_2, KZ3_2, KZ19, KZ5, KZ9, KZ4, KZ20, KZ21, KZ22, KZ23, KZ12_1]
B = [KZ2 3, KZ3 3, KZ24, KZ25, KZ12, KZ26, KZ5, KZ8, KZ16, KZ12 1]
B+= [KZ1 2, KZ2 4, KZ3 4, KZ27, KZ28, KZ5, KZ16, KZ29, KZ8 1, KZ9, KZ12 2]]

SKZ_j za svaki izradak:

D = [[SKZ1, SKZ2, SKZ3, SKZ4, SKZ5, SKZ6, SKZ7, SKZ8, SKZ9, SKZ10, SKZ30, SKZ31, SKZ39, SKZ43, SKZ47, SKZ51]
C = [SKZ2 1, SKZ3 1, SKZ11, SKZ12, SKZ13, SKZ14, SKZ5, SKZ15, SKZ16, SKZ17, SKZ18, SKZ9, SKZ10, SKZ32, SKZ33, SKZ40, SKZ41, SKZ54, SKZ56]
A = [SKZ1 1, SKZ2 2, SKZ3 2, SKZ19, SKZ5, SKZ9, SKZ4, SKZ20, SKZ21, SKZ22, SKZ23, SKZ12 1, SKZ34, SKZ46, SKZ35, SKZ48, SKZ55]
B = [SKZ2 3, SKZ3 3, SKZ24, SKZ25, SKZ12, SKZ26, SKZ5, SKZ8, SKZ16, SKZ12_1, SKZ36, SKZ42, SKZ37, SKZ49, SKZ52]
B+= [SKZ1 2, SKZ2 4, SKZ3 4, SKZ27, SKZ28, SKZ5, SKZ16, SKZ29, SKZ8 1, SKZ9, SKZ12 2 SKZ38, SKZ44, SKZ45, SKZ50, SKZ53]]

Početni trošak tipa stroja: $T_r =$

$S_1 = 75.000$ [NJ]
$S_2 = 82.000$ [NJ]
$S_3 = 440.000$ [NJ]
$S_4 = 980.000$ [NJ]
$S_5 = 1.360.000$ [NJ]
$S_6 = 1.260.000$ [NJ]

Vrijeme dobave stroja: $t_{d,z} =$

$S_1 = 0,083$ [god.]
$S_2 = 0,166$ [god.]
$S_3 = 0,250$ [god.]
$S_4 = 0,583$ [god.]
$S_5 = 0,916$ [god.]
$S_6 = 0,666$ [god.]

Početna populacija s nasumično generiranim članovima: Pop size: 60

Prvi član populacije:

poredak([2., 8., 9., 10., 3., 1., 7., 6., 5., 4., 0., 0., 0., 1., 1., 0., 0., 1., 2., 2., 2., 3., 3., 3., 3., 3., 5., 6., 9., 11., 2., 7., 12., 13., 5., 4., 8., 1., 3., 10., 1., 1., 0., 0., 0., 0., 1., 1., 2., 2., 3., 3., 4., 5., 5., 5., 12., 8., 2., 4., 10., 7., 6., 11., 5., 9., 3., 1., 0., 0., 1., 1., 0., 0., 0., 0., 0., 0., 1., 3., 3., 3., 4., 4., 4., 5., 1., 6., 9., 5., 8., 7., 4., 2., 3., 10., 0., 0., 0., 0., 1., 0., 0., 0., 1., 2., 2., 2., 2., 4., 5., 7., 5., 3., 10., 8., 11., 6., 4., 2., 1., 9., 1., 1., 0., 1., 1., 0., 0., 0., 0., 1., 2., 2., 3., 4., 5.]

Lista vjerojatnosti mutacije: poredak ([0.1, 0.3, 0.5, 0.7])

Lista vjerojatnosti križanja: poredak ([0.1 , 0.25, 0.4 , 0.55, 0.7])

Slika 6.4 Ispis ulaznih parametara za peti period potražnje

GA algoritam

Ukupni broj generacija: Max gen: 2500

Vjerojatnost mutacije: p_m : 0.1

Vjerojatnost križanja: c_m : 0.1

Selekcija križanja: kotač ruleta

Križanje komponente 1 kromosoma: Na temelju položaja križanja za permutacijsko kodiranje

Križanje komponente 2 kromosoma: Križanje u dvije točke za binarno kodiranje

Križanje komponente 3 kromosoma: Ne

Mutacija komponente 1 kromosoma: Mutacija zamjenom za permutacijsko kodiranje

Mutacija komponente 2 kromosoma: Nasumična odabir i obrnuta vrijednost

Mutacija komponente 3 kromosoma: Odabir polovice gena i promjena ovisno o uvjetima

Izbor generacije: $\mu + \lambda$ odabir za održavanje visoke kvalitete rješenja,

Konfiguracija: 1

Faza obrade: 1; Tip stroja: ['S1' 'S2' 'S3']; Broj strojeva u fazi obrade: [1. 7. 1.];

Investicija u fazi obrade: 113.1595 NJ

Izradak / SKZ / Neophodan broj strojeva

	SKZ	S1	S2	S3
D	SKZ1	0.192	0.0	0.0
D	SKZ30	0.0	0.752	0.0
D	SKZ6	0.0	0.0	0.0853
C	SKZ2 1	0.0	0.6125	0.0
C	SKZ3 1	0.0	0.9125	0.0
A	SKZ1 1	0.3565	0.0	0.0
A	SKZ34	0.0	2.0125	0.0
B	SKZ36	0.0	0.2252	0.0
B	SKZ16	0.0	0.0	0.0198
B+	SKZ1 2	0.4373	0.0	0.0
B+	SKZ2 4	0.0	0.8337	0.0
B+	SKZ3 4	0.0	1.64	0.0
B+	SKZ27	0.0	0.0	0.5193
B+	SKZ5	0.0	0.0	0.0957
B+	SKZ16	0.0	0.0	0.2323

Faza obrade: 2; Tip stroja: ['S3']; Broj strojeva u fazi obrade: [5.];

Investicija u fazi obrade: 227.8728 NJ

Izradak / SKZ / Neophodan broj strojeva

	SKZ	S3
C	SKZ5	0.0875
C	SKZ11	0.3875
C	SKZ13	0.825
C	SKZ10	0.475
A	SKZ19	0.483
A	SKZ5	0.0805
A	SKZ22	0.368
B	SKZ12_1	0.0233
B+	SKZ45	1.8587
B+	SKZ28	0.3963

Faza obrade: 3; Tip stroja: ['S3']; Broj strojeva u fazi obrade: [1.];

Investicija u fazi obrade: 45.5745 NJ

Izradak / SKZ / Neophodan broj strojeva

	SKZ	S3
D	SKZ5	0.0373
D	SKZ7	0.256
D	SKZ8	0.1173
C	SKZ9	0.075
C	SKZ14	0.3625
A	SKZ9	0.069
B	SKZ37	0.0665

Faza obrade: 4; Tip stroja: ['S3']; Broj strojeva u fazi obrade: [2.];
Investicija u fazi obrade: 91.1491 NJ

Izradak / SKZ / Neophodan broj strojeva

	SKZ	S3
D	SKZ4	0.3253
C	SKZ16	0.2125
A	SKZ4	0.7015
A	SKZ20	0.1265
B	SKZ26	0.1202
B	SKZ24	0.1283
B	SKZ5	0.0082
B	SKZ8	0.0257

Faza obrade: 5; Tip stroja: ['S3']; Broj strojeva u fazi obrade: [2.];
Investicija u fazi obrade: 91.1491 NJ

Izradak / SKZ / Neophodan broj strojeva

	SKZ	S3
D	SKZ31	0.2347
C	SKZ12	0.3125
C	SKZ41	0.75
A	SKZ21	0.1495
A	SKZ12 1	0.23
A	SKZ23	0.207

Faza obrade: 6; Tip stroja: Ne; Broj strojeva u fazi obrade: [0.];
Investicija u fazi obrade: 0.0 NJ

Ukupna investicija: 568.9051 NJ

Kromosom (niz):

	Komponenta 1	Komponenta 2 \
D	[8, 2, 10, 1, 5, 3, 7, 6, 9, 4]	[1, 1, 1, 1, 0, 1]
C	[10, 2, 7, 4, 3, 11, 5, 12, 9, 8, 13, 6, 1]	[1, 1, 0, 0, 1, 1]
A	[6, 5, 9, 4, 7, 12, 11, 10, 8, 2, 1, 3]	[1, 1, 1, 1, 1]
B	[1, 4, 7, 10, 3, 8, 5, 2, 6, 9]	[0, 1, 1, 1, 1]
B+	[11, 10, 9, 4, 6, 5, 8, 3, 1, 2, 7]	[1, 1, 0, 0, 1]

	Komponenta 3
D	[0, 0, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 4, 4]
C	[0, 0, 0, 0, 1, 1, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 5]
A	[0, 0, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 4, 4, 5, 5]
B	[0, 0, 0, 0, 1, 1, 3, 5, 5, 5]
B+	[1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 3, 3, 3]

ISKZ:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D	KZ1	KZ2	KZ3	KZ6	KZ5	KZ7	KZ8	KZ4	KZ9	KZ10	-	-	-
C	KZ2 1	KZ3 1	KZ5	KZ11	KZ13	KZ10	KZ9	KZ14	KZ16	KZ12	KZ17	KZ15	KZ18
A	KZ1 1	KZ2 2	KZ3 2	KZ19	KZ5	KZ22	KZ9	KZ4	KZ20	KZ21	KZ12 1	KZ23	-
B	KZ2 3	KZ3 3	KZ16	KZ12 1	KZ25	KZ12	KZ26	KZ24	KZ5	KZ8	-	-	-
B+	KZ1 2	KZ2 4	KZ3 4	KZ27	KZ5	KZ16	KZ29	KZ12 2	KZ9	KZ8 1	KZ28	-	-

ISKZD:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
D	SKZ1	SKZ30	SKZ6	SKZ5	SKZ7	SKZ8	SKZ4	SKZ31	-	-	-	-	-
Faza obrade	1	1	1	3	3	3	4	5	-	-	-	-	-
C	SKZ2 1	SKZ3 1	SKZ5	SKZ11	SKZ13	SKZ10	SKZ9	SKZ14	SKZ16	SKZ12	SKZ41	-	-
Faza obrade	1	1	2	2	2	2	3	3	4	5	5	-	-
A	SKZ1 1	SKZ34	SKZ19	SKZ5	SKZ22	SKZ9	SKZ4	SKZ20	SKZ21	SKZ12 1	SKZ23	-	-
Faza obrade	1	1	2	2	2	3	4	4	5	5	-	-	-
B	SKZ36	SKZ16	SKZ12 1	SKZ37	SKZ26	SKZ24	SKZ5	SKZ8	-	-	-	-	-
Faza obrade	1	1	2	3	4	4	4	4	-	-	-	-	-
B+	SKZ1 2	SKZ2 4	SKZ3 4	SKZ27	SKZ5	SKZ16	SKZ45	SKZ28	-	-	-	-	-
Faza obrade	1	1	1	1	1	1	2	2	-	-	-	-	-

Slika 6.5 Ispis izlaznih parametara za peti period potražnje

Dobiveni ispisa izlaznih parametara za peti period potražnje pokazuje da optimalni početni trošak skalabilne konfiguracije VPPS iznosi 568.905 NJ. Ova se vrijednost dobiva u većini dobivenih 20 najboljih konfiguracija u 20 pokretanja algoritma. GA parametri navedeni na slici 6.4 korišteni su u svim ciklusima. Odabrani GA omogućuje zadržavanje ne samo najboljeg rješenja pronađenog tijekom pretraživanja, već i 20 najboljih karakterističnih konfiguracija, gdje su dobivene iste vrijednosti ciljne funkcije što predstavlja početni trošak. U tablici 6.3 prikazano je svih 20 konfiguracija za peti period potražnje s odabranim strojevima.

Tablica 6.3 20 najboljih konfiguracija za peti period potražnje

Faza obrade	1			2			3	4	5	6	Iskorištenje sustava	Kapitalni trošak [NJ]
Tip stroja	S1	S2	S3	S1	S2	S3	S3	S3	S3	S3		
Konfiguracija 1	1	7	2	0	0	3	3	2	1	0	0,92	568.905
Konfiguracija 2	1	7	1	0	0	4	4	2	0	0	0,94	568.905
Konfiguracija 3	1	7	1	0	0	4	5	1	0	0	0,89	568.905
Konfiguracija 4	1	3	1	0	4	5	2	1	2	0	0,96	568.905
Konfiguracija 5	1	7	2	0	0	5	1	3	0	0	0,96	568.905
Konfiguracija 6	1	3	1	0	4	6	1	1	2	0	0,93	568.905
Konfiguracija 7	1	3	2	0	4	6	1	1	1	0	0,92	568.905
Konfiguracija 8	1	5	3	0	2	1	5	1	1	0	0,91	568.905
Konfiguracija 9	1	7	1	0	0	4	3	2	1	0	0,89	568.905
Konfiguracija 10	1	3	1	0	4	4	3	1	2	0	0,94	568.905
Konfiguracija 11	1	7	2	0	0	3	4	1	0	1	0,95	568.905
Konfiguracija 12	1	7	2	0	0	3	5	1	0	0	0,96	568.905
Konfiguracija 13	1	7	2	0	0	2	4	2	1	0	0,92	568.905
Konfiguracija 14	1	7	2	0	0	1	6	2	0	0	0,89	568.905
Konfiguracija 15	1	7	1	0	0	1	7	2	0	0	0,84	568.905
Konfiguracija 16	1	7	2	0	0	4	2	1	2	0	0,93	568.905
Konfiguracija 17	1	7	1	0	0	5	1	2	2	0	0,91	568.905
Konfiguracija 18	1	7	1	0	0	2	5	1	2	0	0,90	568.905
Konfiguracija 19	1	7	1	0	0	2	7	1	0	0	0,92	568.905
Konfiguracija 20	1	7	2	0	0	2	5	1	1	0	0,91	568.905

Predstavljeni rezultati pokazuju da više konfiguracija ima iste optimalne početne troškove. Sve konfiguracije za peti period potražnje sastoje se od ukupno 19 strojeva ($S_1 = 1$ (CNC visokoproduktivna tokarilica), $S_2 = 7$ (CNC visokoproduktivna tokarilica sa manipulatorom) i $S_3 = 11$ (Horizontalni CNC OC s tri osi gibanja)), ali imaju različit raspored strojeva u različitim fazama obrade, te dodijeljene SKZ tim strojevima. Raznovrsnost dobivenih optimalnih rješenja ističe prednosti razvijenog modela optimizacije jer je općenit i fleksibilan u pogledu odabira broja faza obrade te kombiniranja različitih strojeva u pojedinoj fazi obrade. Izrađene optimalne konfiguracije uključuju sve odabrane faze potraživanja što osigurava veću slobodu i fleksibilnost u dizajniranju cjelovitog sustava. Razvijeni GA sposoban je proizvesti najbolje rješenje kao i druga gotovo optimalna rješenja, što omogućava veću širinu u korištenju drugih ciljeva i kriterija za formiranje skalabilnog RPS. U nastavku je na slici 6.6 dan prikaz odabranih konfiguracija za sve PP analiziranog VRPS.

Polugodište 1

Konfiguracija 2

Faza obrade 1			Faza obrade 2			Faza obrade 3			Faza obrade 4			Faza obrade 5			Faza obrade 6		
S1	1	D, A	S2	3	C, B	S3	3	D, C, A, B	S3	1	C, B	S3	2	A, B			
S2	2	D, C, A	S3	1	D, C, A												
Investicija	24,85		Investicija	71,21		Investicija	136,72		Investicija	45,58		Investicija	91,15				

Trošak investicije 369,51

Polugodište 2

Konfiguracija 20

Faza obrade 1			Faza obrade 2			Faza obrade 3			Faza obrade 4			Faza obrade 5			Faza obrade 6		
S1	1	D, A	S2	5	D, C, A, B	S3	2	D, C, B	S3	2	D, C, A, B	S3	1	D, A	S3	1	D, C, A
S2	1	C	S3	3	C, A, B												
Investicija	16,31		Investicija	179,45		Investicija	91,15		Investicija	91,15		Investicija	45,58		Investicija	45,58	

Trošak investicije 469,22

Polugodište 3

Konfiguracija 5

Faza obrade 1			Faza obrade 2			Faza obrade 3			Faza obrade 4			Faza obrade 5			Faza obrade 6		
S1	1	D, A, B+	S2	2	C, B	S3	1	C, A, B	S2	1	C, A	S3	1	B			
S2	3	D, A, B+	S3	2	C, A, B												
S3	2	D, A, B+															
Investicija	124,55		Investicija	108,24		Investicija	45,58		Investicija	45,58		Investicija	45,58				

Trošak investicije 369,53

Polugodište 4

Konfiguracija 11

Faza obrade 1			Faza obrade 2			Faza obrade 3			Faza obrade 4			Faza obrade 5			Faza obrade 6		
S1	1	D, A, B+	S3	2	D, A, B, B+	S3	4	D, C, A, B	S3	1	C, A, B						
S2	7	D, C, A, B, B+															
S3	2	D, C, A, B, B+															
Investicija	165,19		Investicija	91,15		Investicija	182,30		Investicija	45,58							

Trošak investicije 484,22

Polugodište 5

Konfiguracija 1

Faza obrade 1			Faza obrade 2			Faza obrade 3			Faza obrade 4			Faza obrade 5			Faza obrade 6		
S1	1	D, A, B+	S3	5	C, A, B, B+	S3	1	D, C, A, B	S3	2	D, C, A, B	S3	2	D, C, A, B			
S2	7	D, C, A, B, B+															
S3	1	D, B, B+															
Investicija	113,16		Investicija	227,87		Investicija	45,58		Investicija	91,15		Investicija	91,15				

Trošak investicije 568,91

Polugodište 6

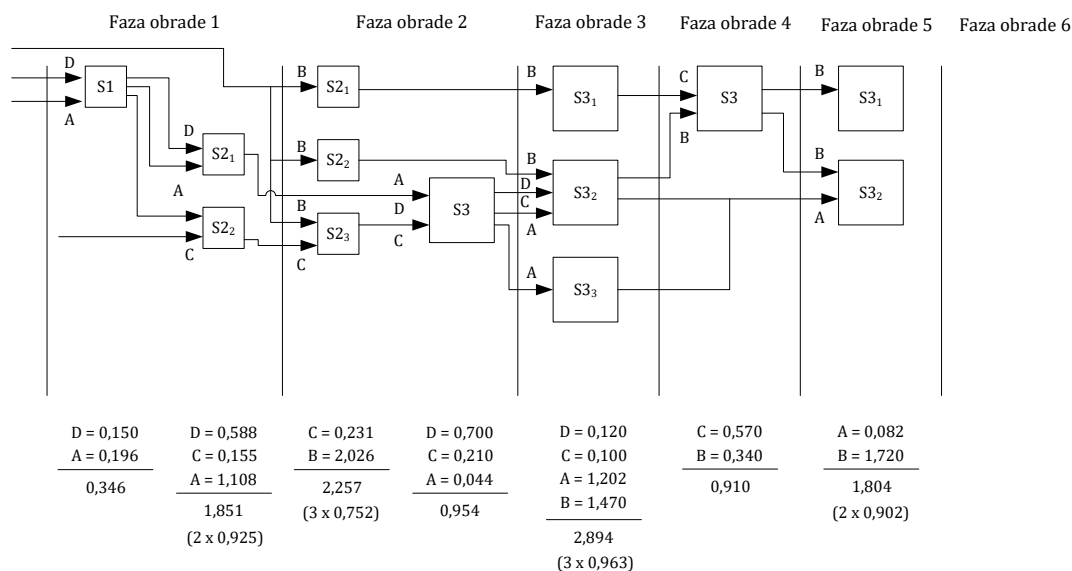
Konfiguracija 2

Faza obrade 1			Faza obrade 2			Faza obrade 3			Faza obrade 4			Faza obrade 5			Faza obrade 6		
S1	1	D, A, B+	S2	2	A	S3	1	A	S3	1	C, A	S3	1	D, C, A			
S2	5	D, C, A, B+															
S3	4	D, C, B+															
Investicija	238,25		Investicija	8,54		Investicija	45,58		Investicija	45,58		Investicija	45,58				

Trošak investicije 383,53

Slika 6.6 Ispis izlaznih parametara za sve periode potražnje

Na slici 6.7 prikazan je hodogram procesa obrade za prvi PP prema dobivenim rezultatima GA s pripadajućim iskorištenjem opreme za svaku fazu obrade. Uključeni su strojevi koji se, prema danim ulaznim parametrima, mogu dobiti unutar jednog polugodišta što znači da dani algoritam nije uključio skuplje strojeve čiji je dobavni rok duži od pola godine. U procesu su izostavljena vremena stavljanja i skidanja izradak u radni prostor stroja čime se unificirala logistika u procesu i time smanjio broj dodatnih varijabli zbog raznolikosti proizvodne opreme. Pretpostavlja se da je ta faza procesa izvršena u skrivenom vremenu. Manipulacija izradaka i potrebnih steznih naprava vrši se konzolnim 6-osnim manipulatorima (eng. *gantry with gripper*) i robotskim rukama (eng. *robotic arm*). Transport izradaka među fazama obrade vrši se pozicioniranim transportnim sustavom. Namjera ovog rada bila je i analiza koliki su početni troškovi konfiguracije dobiveni ovim modelom u usporedbi s realnim PS koji je dizajniran na osnovama ćelijskog FPS.

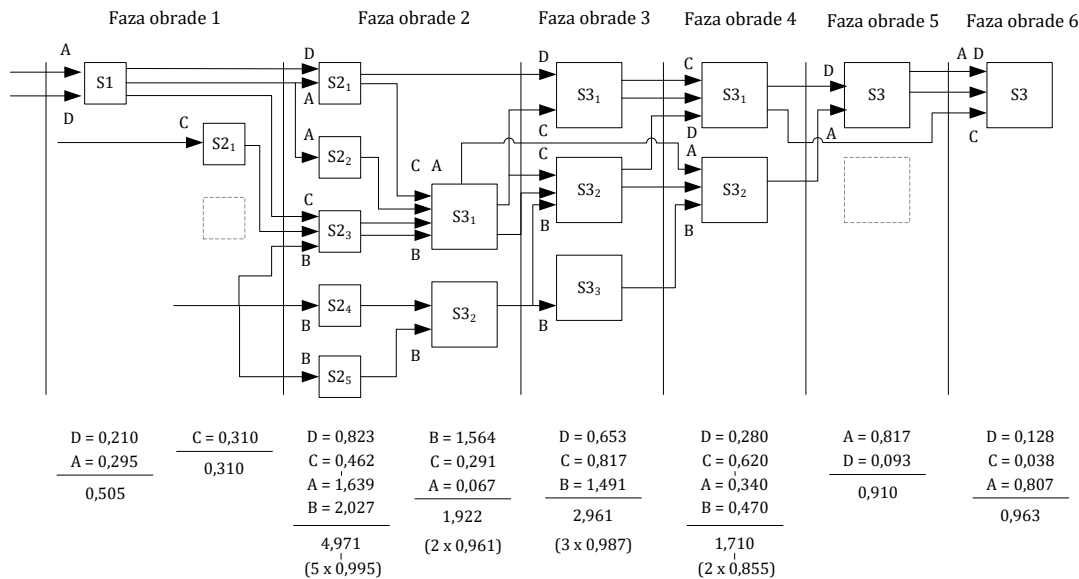


Slika 6.7 Skalabilni RPS za VRPS u prvom PP

Izabrana konfiguracija 2 prvog PP pretpostavlja da je za dani zahtjev potražnje od 2.290 [kom/dan] ili 145 [kom/sat] za četiri tipa proizvoda, potrebno osigurati ukupno pet faza obrade gdje su SKZ-i za svaki izradak raspoređeni na način da se osigura minimalni investicijski trošak uz maksimalno iskorištenje strojne opreme. Strojevi S_1 i S_2 predstavljaju potreban broj tokarilica koje izvršavaju prvu fazu obrade za sve izratke u familiji proizvoda u svojstvu obrade površina baza. Nadalje, obrada preostalih SKZ-a predviđena je korištenjem horizontalnih CNC OC u skladu s optimalnim izborom pojedine količine strojeva u pojedinoj fazi obrade. Algoritam je uspio pronaći konfiguraciju za koju neće biti potrebna šesta faza obrade, uz minimalni investicijski trošak. Redoslijed odabira strojeva i konfiguracije u cijelosti je temeljen na činjenici da program traži, prema ograničenju grafu redoslijeda (eng. *precedence graph*), najkraći put izvršenja obrade SKZ-

a uz pretpostavku da se jedan SKZ izvodi na istom tipu stroja u jednoj fazi obrade. U prvom polugodištu pronađeno je ukupno 20 konfiguracija čiji je investicijski trošak 369.510 NJ i koje mogu biti postavljene kao odabrana konfiguracijska struktura.

Na slici 6.8 prikazana je konfiguracija i hodogram drugog polugodišta gdje se potrebni kapacitet povećao dodavanjem paralelnih strojeva u skladu sa zahtjevima potražnje 3.060 [kom/dan] ili 193 [kom/sat] za četiri tipa proizvoda. Broja faza obrade povećao se je na šest ali još uvijek u granicama u kojima GA ne penalizira ukupnu dužinu konfiguracije.



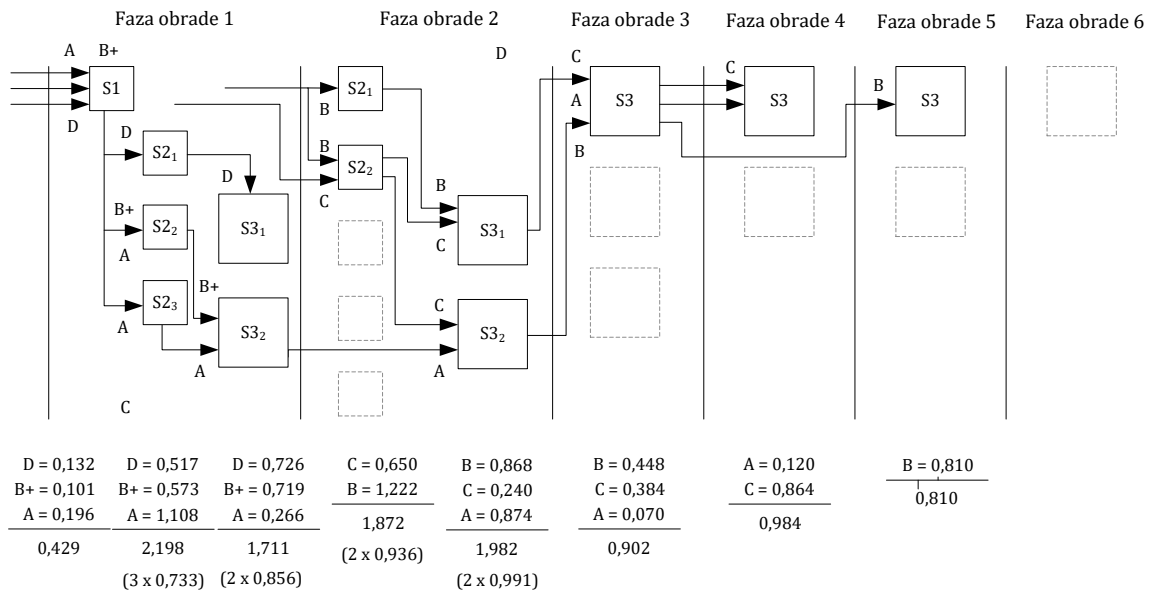
Slika 6.8 Skalabilni RPS za VRPS u drugom PP

Ukupni strojni park se povećava za jednu CNC visokoproduktivnu tokarilicu i dva horizontalna CNC obradna centra, razmještenih po fazama obrade u skladu s rezultatima izračuna GA. Algoritam i dalje pronalazi optimalnu konfiguraciju uz minimalni trošak investicije i najbolju iskoristivost strojeva. Iz faze obrade 1 i 5 se strojevi premještaju u fazu obrade 2 i 6. Vrijednost minimalnog početnog troška je 469.220 NJ u 20 konfiguracija.

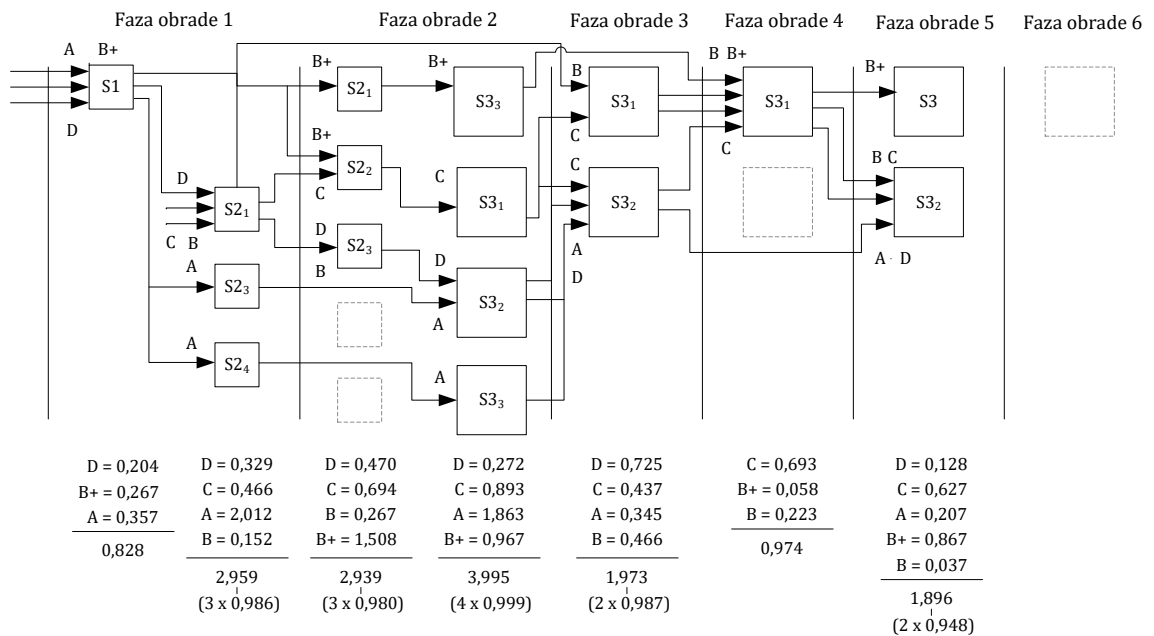
U trećem PP količine se smanjuju na 2.340 [kom/dan] ili 149 [kom/sat] i pojavljuje se peti tip proizvoda (B+) koji postupno zamjenjuje proizvod B zbog novog dizajna. Potreba za strojevima se smanjuje i algoritam predlaže restrukturiranje konfiguracije što je prikazano na slici 6.9. Minimalni investicijski trošak konfiguracije je na razini prve konfiguracije i iznosi 369.530 NJ te sadrži istu količinu strojeva za predviđene SKZ kao u prvom PP. Algoritam pronalazi varijantu da u prvu fazu obrade postavi više različitih tipova strojeva kako bi zadovoljio što kraću konfiguraciju, a i dovoljno široku da se ne penalizira granični uvjet $M_{\max} = 10$.

U četvrtom PP, prikazan na slici 6.10, ukupna količina proizvoda je za 49% veća u odnosu na treći period potražnje s količinom od 3530 [kom/dan] ili 223 [kom/sat] odnosno veća za 13% u odnosu na drugi PP. Algoritam pronalazi optimalno rješenje u 12 konfiguracija s količinama strojeva koje

su iste kao i kod drugog PP uz znatno veće iskorištenje strojeva u trećoj, četvrtoj i petoj fazi obrade. U prilog zadržavanja istog broja strojeva u četvrtom PP je i činjenica da je rast potražnje najveći kod proizvoda C i A čija su vremena obrade kraće te algoritam bolje distribuira SKZ po cijeloj konfiguraciji.



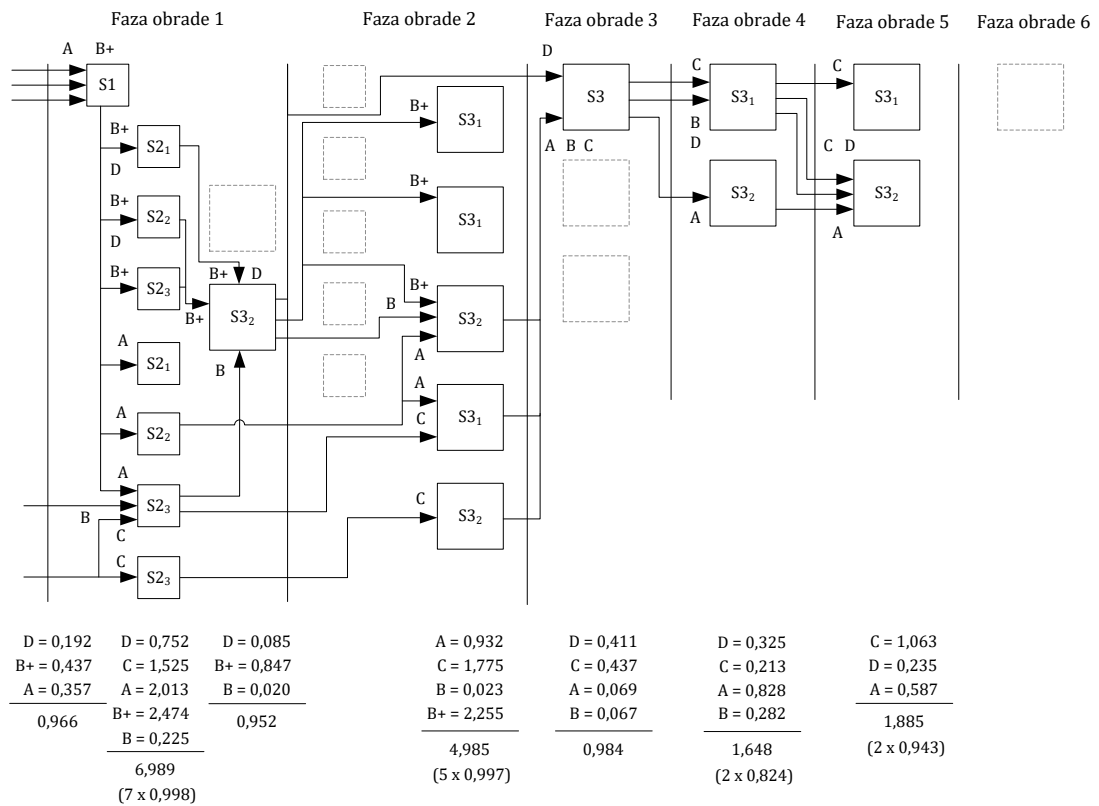
Slika 6.9 Skalabilni RPS za VRPS u trećem PP



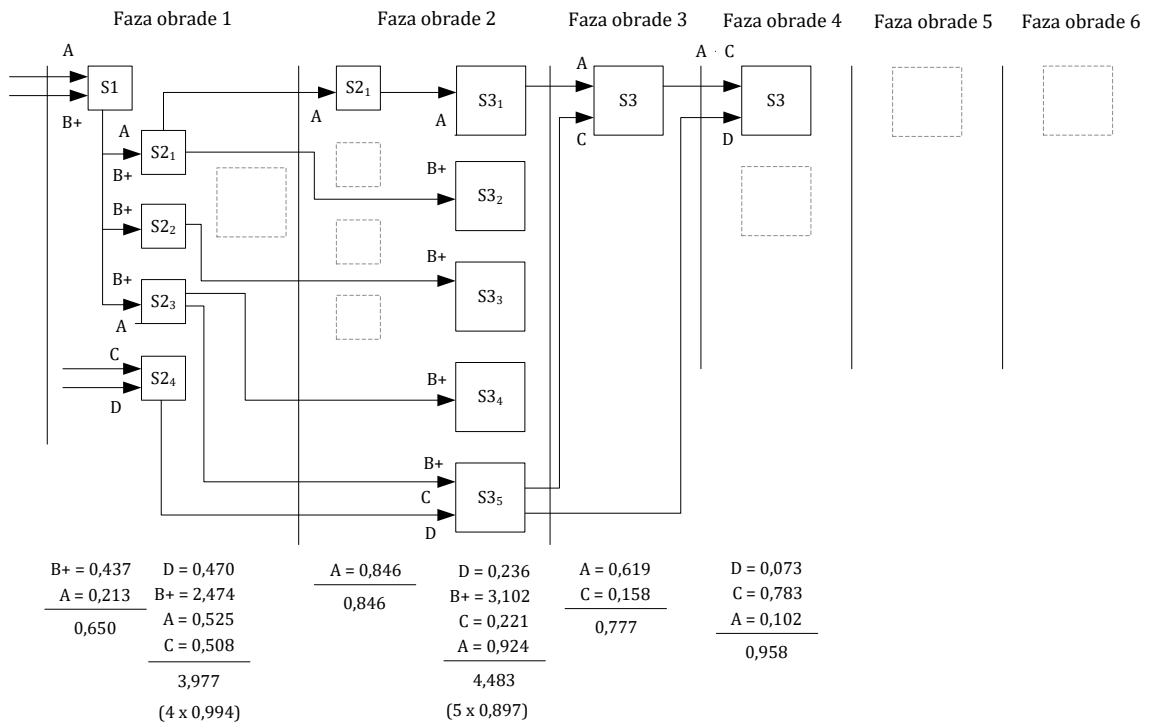
Slika 6.10 Skalabilni RPS za VRPS u četvrtom PP

U petom PP, slika 6.11, očituje se rast kod svih proizvoda i iznosi ukupno 4.200 [kom/dan] ili 265 [kom/sat]. Algoritam i dalje pronalazi optimalnu konfiguraciju uz minimalni početni trošak i najbolju iskoristivost strojeva, dodavanjem jedne CNC visokoproduktivne tokarilice i jednog

horizontalnog CNC OC čime minimalni investicijski trošak sustava iznosi 568.91 NJ. Ponuđena rješenja za navedeni početni trošak nalazi se u 20 konfiguracija.



Slika 6.11 Skalabilni RPS za VRPS u petom PP



Slika 6.12 Skalabilni RPS za VRPS u šestom periodu potražnje

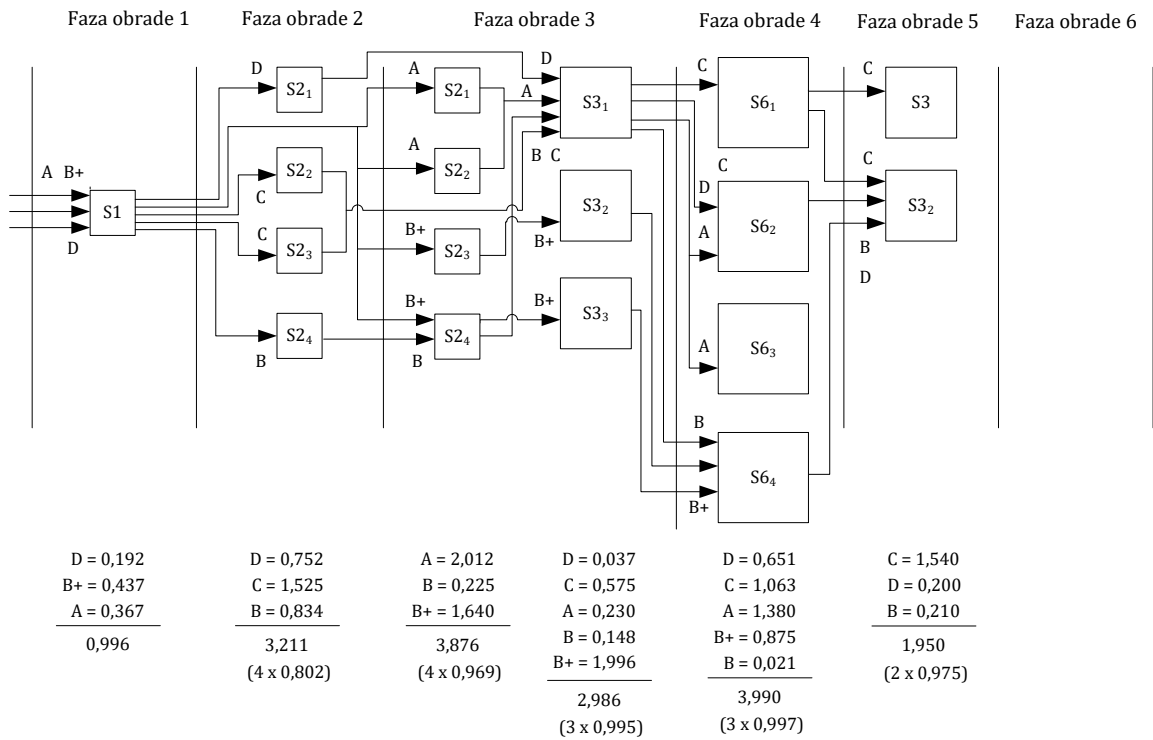
Zadnji, šesti PP, slika 6.12, karakteriziran je padom potražnje za proizvodima te algoritam pronalazi optimalnih 20 konfiguracija s minimalnim investicijskim troškom od 383.53 NJ. Iz proizašlih izračuna i postavljenih konfiguracija proizlazi činjenica da algoritam u nijednom slučaju nije odabrao skuplju proizvodnu opremu, CNC visokoproduktivni OC i CNC horizontalni modularni OC. Sljedeći razlozi upućuju na takav odabir:

- algoritam uvijek bira minimalne početne troškove za optimalni skalabilni sustav. Dodijeljeni SKZ se korištenjem horizontalnih CNC obradnih centara mogu bolje strukturirati za dobivanje optimalnog iskorištenja stroja, dok su kod složenijih i skupljih strojeva prisutni složeniji kompozitni SKZ koje nije moguće uvijek optimalno uskladiti unutar cijelog RPS-a,
- pretpostavlja se da je udio količina svakog proizvoda relativno mali da bi uvjetovao potrebu za korištenjem produktivnijih i skupljih strojeva u svim PP, kao i konfiguracijama,
- ograničenja dana kroz matematički model u smislu graničnih početnih troškova, širine i dužine konfiguracije te mogućnošću postavljanja različitih strojeva u svaku fazu obrade nisu toliko uska da bi se tražila alternativa u skupljim strojevima,
- u analizi je obuhvaćen premali broj faktora koji utječu na formiranje RPS (nije uključena potrošnja reznih alata, potrošnja energije, rashladnog sredstva, udjela automatizacije i sl.).

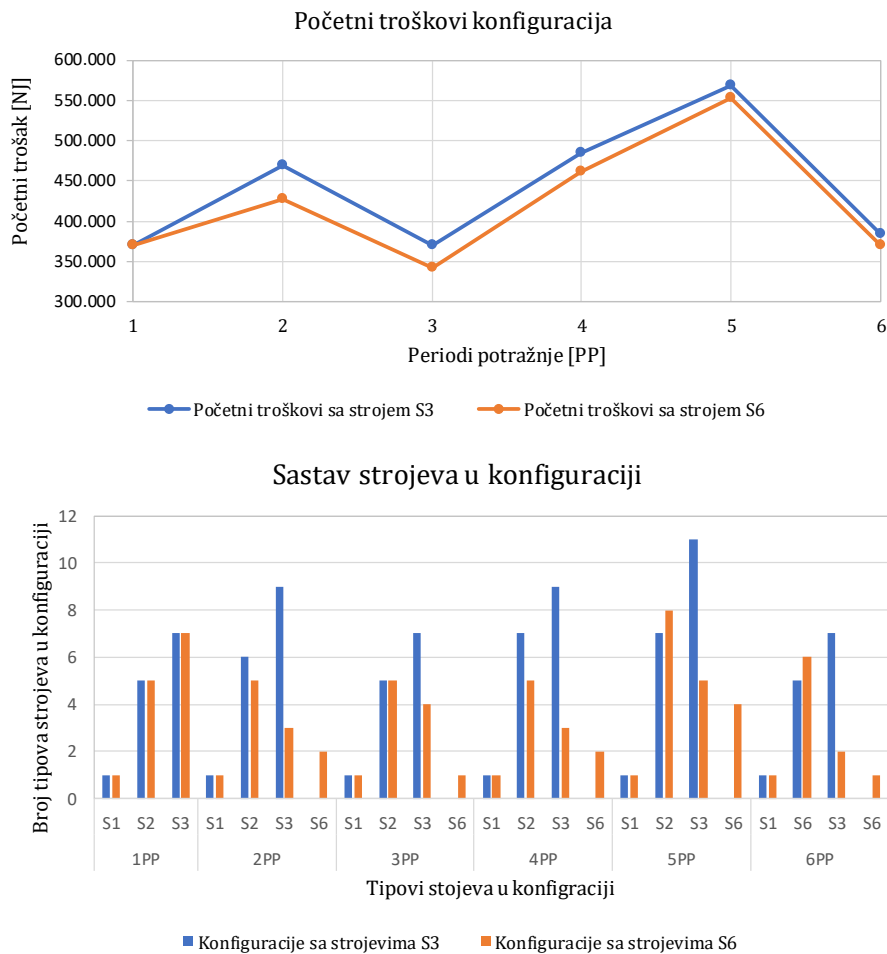
Očito je da je odabirom kojim je predstavljen GA dobiven najbolji skup konfiguracija za svaki PP. Da bi se postavio okvir za upotrebu skuplje proizvodne opreme (visokoproduktivnih OC) i time simulirala optimalna konfiguracija, može se izvršiti simulacija na nekoliko načina:

- simuliranje potrebe sa većim količinama po tipu proizvoda, uz veće dinamičke oscilacije u svakom PP,
- upotreba jeftinijih visokoproduktivnih strojeva,
- preraspodjela jednostavnih i složenih SKZ-a za svaki tip proizvoda.

U radu je odabrana simulacija s upotrebom jeftinijih visokoproduktivnih strojeva gdje je pretpostavljena cijena $S_4 = 686.000$ NJ, $S_5 = 952.000$ NJ i $S_6 = 600.000$ NJ. Premda u pravilu koncepti jeftinije proizvodne opreme ne omogućuju postizanje većih radnih i pomoćnih brzina i time produktivnosti, ovom analizom se želi prikazati utjecaj početnih troškova na odabir optimalne konfiguracije. Dobivenim rezultatima GA za peti PP izabrana je konfiguracija koja je prikazana na slici 6.13. Na slici 6.14 dana je usporedba ovih dvaju koncepata za peti PP i usporedba kroz cijeli konfiguracijski period.



Slika 6.13 Skalabilni RPS za VRPS u petom PP s jeftinijim CNC visokoproduktivnim OC



Slika 6.14 Usporedba početnih troškova konfiguracije i cijelog konfiguracijskog perioda

6.5 Usporedba rezultata dobivenih GA

Problem rješavanja skalabilnosti i optimalnog odabira višepredmetnog RPS su u istraživačkom radu i literaturi relativno slabi. U [79-81, 89, 91] analiziraju se konvencionalne konstrukcije optimalnih višepredmetnih protočnih linija za dobivanje optimalnog broja proizvodne opreme dok se u [76, 95-96, 111, 113, 116] prvi put proučava problem generiranja konfiguracije za RPS. Razvijen je model cjelobrojnog linearnog programiranja za problem optimizacije jednopredmetne protočne linije upotrebom GA za generiranje alternativnih konfiguracija. U radu su postavljeni preduvjeti da se samo jedan SKZ može dodijeliti pojedinom proizvodnom kapacitetu. Nadalje, u [114] dan je pristup temeljen na teoriji grafova s ciljem pronalaženja najboljih konfiguracija jednopredmetnih protočnih linija s mogućnošću manipuliranja dijeljenjem optimalnog iskorištenja strojeva preko uzastopnih SKZ-a, dodjeljivanjem više SKZ-a u jednoj fazi obrade (proizvodnom kapacitetu). Međutim, ova rješenja nisu primjenjiva na VRPS.

Problemom generiranja konfiguracije VRPS za analizirane PP, za srednje do velike proizvodne količine, prvi je započeo Tang [96], koristeći GA pristup s ciljem dobivanja gotovo optimalnih konfiguracija. Predložena je višepredmetna protočna konfiguracija gdje je istaknuto da je proizvodnja više proizvoda pomoću takvog oblika linije ekonomičnija od proizvodnje pojedinog proizvoda odvojeno. Međutim, u radu se pretpostavlja da je broj faza obrada unaprijed definiran što predstavlja ograničavajući faktor. Broj faza obrade treba biti varijabla odlučivanja kao i trošak kapitala u odabranim konfiguracijama.

U svjetlu toga cilja, Youssef i ElMaraghy [82-83, 101] predstavili su pristup GA za optimiziranje troška kapitala VPPS na načelima upravljanja skalabilnosti kapaciteta temeljenim na promjenama u potražnji na tržištu. Konfiguracija RPS-a je fiksna tijekom cijelog PP te rekonfigurirana na kraju PP. Osiguran je proizvodni kapacitet volumena iznad odgovarajućeg PP, sposoban pružiti točnu funkcionalnost i kapacitet koji je potreban za taj PP. Predstavljena metoda sadrži dvije faze: stvaranje alternativne konfiguracije za promatrani scenarij PP i odabir jedne od alternativnih konfiguracija s obzirom na glatkoću rekonfiguracije. Razlog za generiranje više od jedne alternative u prvoj fazi je osigurati dovoljan broj dobrih alternativnih konfiguracija koje se mogu izabrati kako bi se, u sljedećoj fazi, odabrala konfiguracija s najboljom razinom glatkoće rekonfiguracije. Međutim, u radu se pretpostavlja da se samo jedna SKZ istog izratka može dodijeliti istoj radnoj stanici (tj. SKZ za svaki izradak ne smije se dodijeliti istoj radnoj stanici) što smanjuje složenost problema i dovodi do nedostatka visokokvalitetnih rješenja. Osim toga, u ovom radu se generiraju svi ISKZ-i za svaki izradak i svi ISKZD za cijeli proizvodni sustav u pred procesnoj fazi gdje je za složeniji problem tj. za generiranje konfiguracija velikih sustava potrebna velika računalna memorija.

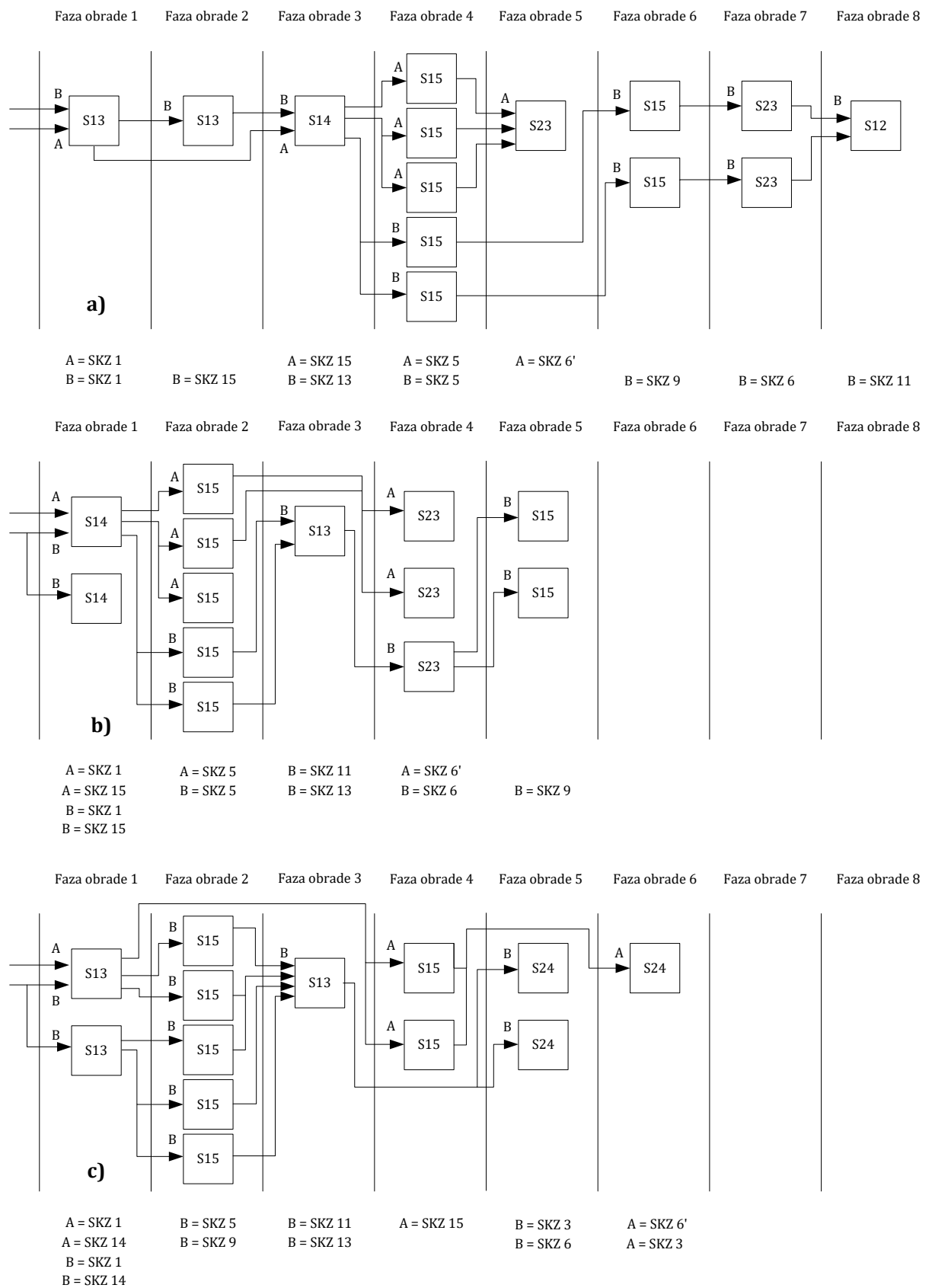
Dou i sur. [113] pristupili su istraživanju na način da osiguraju dodjeljivanje više SKZ-a istog izratka za istu radnu stanicu (fazu obrade) razvijanjem 0-1 nelinearnog programskog modela (eng. *0-1 nonlinear programming model*) gdje GA pronalazi C_R najboljih rješenja u prostoru rješenja na početku svakog PP. Predloženi GA pristup temelji se na nedostacima u istraživanju Youssefa i ElMaraghy te je temeljen na pristup u GA na način da se ne generiraju svi ISKZ svakog izratka i svi ISKZD unaprijed. Predstavljena je i nova metoda kodiranja zajedno sa srodnim genetskim operaterima kako bi se jamčilo GA da pretražuje unutar profiliranog prostora rješenja koji sadrži optimalne konfiguracije povezane sa svim ISKZD. Zbog takvog pristupa, moguće je rješavanje problema velikih količina podataka generiranjem konfiguracije umjesto razvijanja cijelog problema odabira konfiguracije, čime se dobivaju rješenja koja su bolja od rješenja dobivena u [82-83].

Nova metoda analizirana u ovom radu kao i razvijeni GA, dala je određena poboljšanja koja obuhvaćaju broj faza obrade, broj paralelnih strojeva i različitih tipove strojeva po fazi obrade, kao i dodijeljene SKZ za svaki stroj i fazu obrade. Cilj je, u odnosu na dosadašnja istraživanja, smanjiti početne troškove konfiguracija VRPS rješavanjem sustava linearnih jednadžbi i povećavanjem mogućih opcija za dobivanje optimalnog troška unutar pročišćenog prostora rješenja koja obuhvaća optimalne konfiguracije povezane sa svim ISKZ. Korištenjem podataka iz prethodnih istraživanja [113], nova metoda dala je bolja rješenja koja su prikazana na slici 6.15.

Slika 6.15 a) i b) prikazuje usporedbu dobivenih rezultata [82, 113] te pod 6.15 c) rezultate dobivene primjenom nove metode prikazane u ovom radu. Generirane su konfiguracija sa optimalnim brojem faza obrade koje su dale u svim slučajevima minimalne početne troškove. Na slikama su predstavljeni tipovi strojeva u svakoj fazi obrade kao i dodijeljeni SKZ-i svakog izratka u svakoj fazi obrade. Zadovoljena su ograničenja kapaciteta, širine i dužine PS te ograničenja redoslijeda obrade među SKZ. Ulazni podaci jesu:

- proizvod A – zahtjevane količine 120 kom/sat, koji sadrži 11 operacija, u procesu izrade zajedno sa
- proizvod B – zahtjevane količine 180 kom/sat, koji sadrži 20 operacija
- proces sadrži 11 jednostavnih SKZ-a i šest složenih SKZ-a
- period potražnje PP = 1,5 god.
- godišnja kamatna stopa $k_s = 12\%$, amortizacija $a = 10\%$ linearno
- ograničenja dužine konfiguracije $D_{max} = 10$ faza obrade, ograničenja širine konfiguracije $PA_{max} = 5$ paralelnih strojeva u fazi obrade i maksimalni početni trošak $T_r_{max} = 30$ kNJ.

Slika 6.15 a) prikazuje rezultate dobivene kod Youssef i ElMaraghy. Optimalni početni trošak najboljih karakterističnih konfiguracija PS koji zadovoljava potrebe potražnje za dani primjer i iznosi 4.174 NJ.



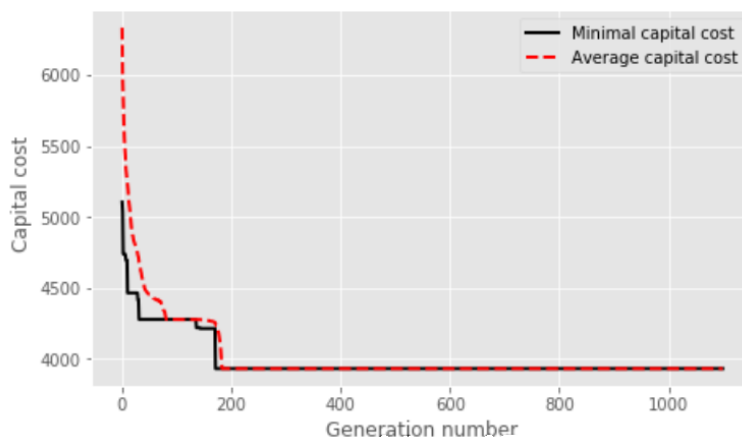
Slika 6.15 Usporedba konfiguracija GA: a) Youssef i sur. [82], b) Dou i sur. [113] i Novi GA

Sve optimalne konfiguracije uključuju 14 strojeva složenih kroz osam faza obrade, kako bi se zadovoljile mogućnosti obrade dodjeljenih SKZ-a. Kod dobivenih optimalnih konfiguracija neke od faza obrade obrađuju samo jedan od dviju vrsta proizvoda što omogućuje da se u rezultatima optimizacije odluči hoće li se faze obrade koristiti za obradu pojedinih ili više izradaka. Krivulja konvergencije pokazuje najbolje rezultate već nakon 38 generacija, slika 6.17. Usporedni podaci za realizirane GA dani su u tablici 6.4.

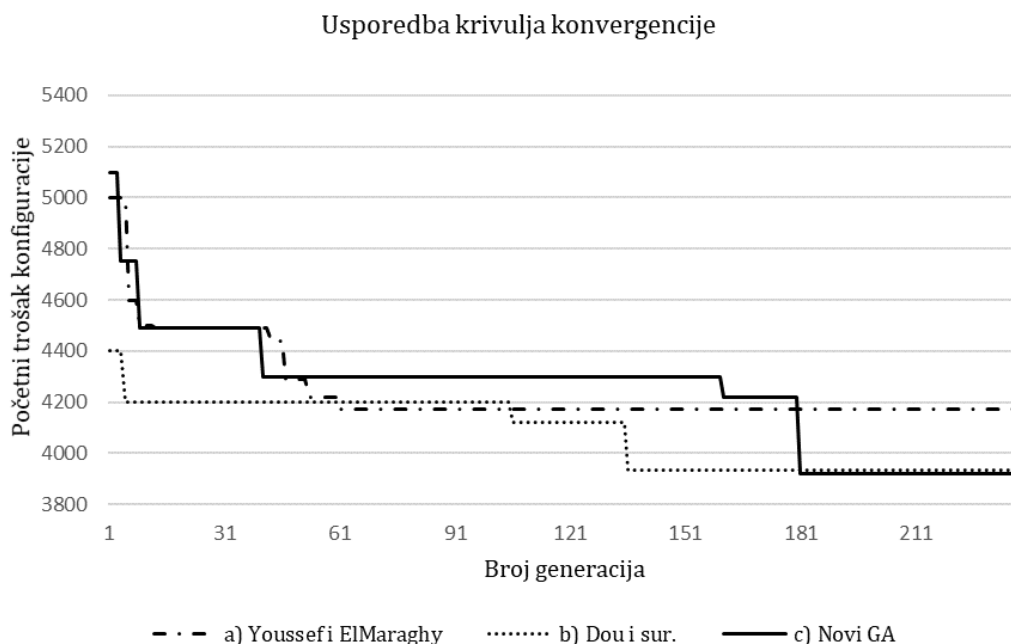
Tablica 6.4 Usporedni dobiveni podaci za tri pristupa rješavanja GA

Karakteristika	Kapitalni trošak [NJ]	Veličina populacije	Broj generacija	c_m	p_m
Youssef i ElMaraghy	4.174	40	150	-	-
Dou i sur.	3.933	40	1.000	0,3	0,5
Novi GA	3.919	50	1.100	0,4	0,1

Uspoređujući konfiguraciju 6.15 a) s konfiguracijom 6.15 b), razlika je vidljiva u dodijeljenim SKZ i odgovarajućem odabiru strojeva. Na slici 6.15 b), skup SKZ-a {SKZ1, SKZ15, SKZ13, SKZ11} dodijeljen je fazama obrade f_1 , f_2 i f_3 dok je isti skup SKZ dodijeljeni u četiri faze obrade f_1 , f_2 , f_3 i f_8 na slici 6.15 a). Vidljivo je da predloženi GA Dou i sur. čiji prostor pretraživanja sadrži bolja rješenja, rezultira kraćim proizvodnim procesom, manjom količinom proizvodne i logističke opreme te boljim iskorištenjem strojeva, s minimalnim početnim troškom od 3.933 NJ što je prikazano slikom 6.15 b. Treći pristup rješavanju primjenjuje GA, predstavljen u ovom radu, rezultira manjim početnim troškovima od onih u oba prethodno predstavljena modela. Minimalni početni trošak iznosi 3.919 NJ. Algoritam pronalazi da je moguće kombinirati jeftinije strojeve za dani PP, a da se ne naruši redoslijed obrade kod dodjeljenih SKZ-a. Konfiguracija je vrlo slična kao kod Dou i sur. [113] uz postojanje dodatne, šeste faze obrade. Na slici 6.16 predstavljena je krivulja konvergencije za konfiguraciju c) gdje je vidljivo da je pronađen minimalni trošak nakon 180-te generacije dok su na slici 6.17 predstavljene krivulje konvergencije za sva tri slučaja.



Slika 6.16 Krivulje konvergencije za minimalni trošak



Slika 6.17 Usporedba krivulja konvergencije za tri predložena GA

Što se tiče pronalaženja ekonomične konfiguracije VRPS, predloženi model i Novi GA pristup superiorniji je od postojećih modela. On je u mogućnosti brzo identificirati dvadeset karakterističnih, gotovo optimalnih rješenja. Predstavljene alternative bile bi od velike koristi projektantu sustava pri odabiru najbolje konfiguracije na početku svakog PP za RPS. U ovoj analizi i usporedbi rezultata potvrđuje se da je optimalni početni trošak 3,919 NJ najbolje rješenje te da predstavljeni algoritam daje najbolju vrijednost. To je ujedno i potvrda da su dobivena rješenja u poglavlju 6.4 najbolji kandidati za konstrukciju optimalnih skalabilnih konfiguracija. Međutim, pristup temeljen na GA ne garantira nalaženje optimuma u srednjim do velikim količinama proizvoda zbog same stohastičke suštine algoritma. Budući da je studirani problem NP-težak, pristup temeljen na GA je primjenjiv za pronalaženje rješenja blizu optimalnom za generiranje složenih konfiguracija (više različitih tipova strojeva u istoj fazi obrade) u realnom PS.

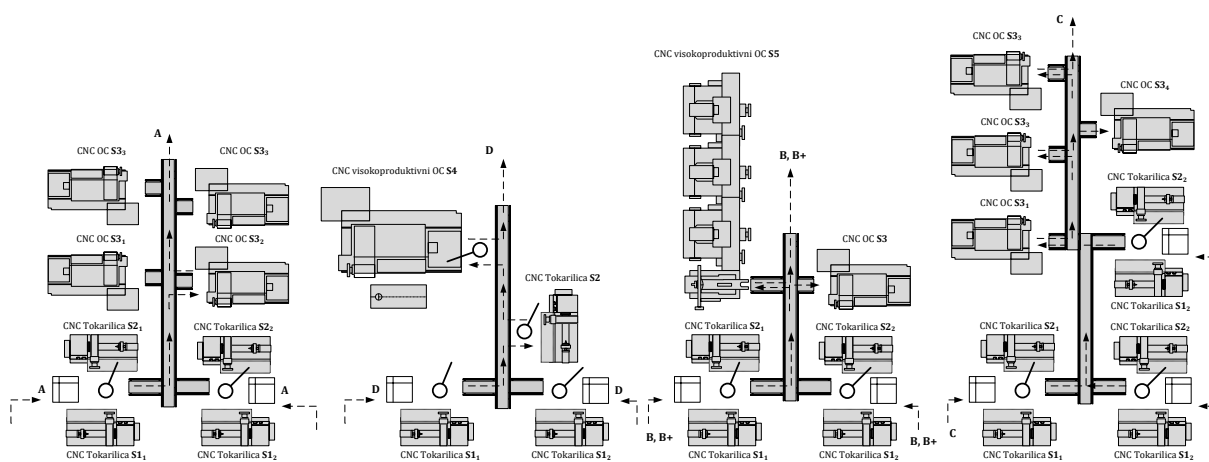
6.6 Usporedba dobivenih rezultata između postojećeg FPS i novog RPS sustava

Problem rješavanja skalabilnosti RPS postao je značajan faktor u optimiranju proizvodnih procesa i smanjenju početnih troškova. Potreba za inkrementalnom, brzom i ekonomičnom promjenom kapaciteta uz dinamičke promjene na tržištu s pojavom masovne prilagodbe, tjera proizvođače strojeva i korisnike na projektiranje i primjenu skalabilnih sustava kako bi troškovi proizvodnje bili minimalni (ili racionalni). FPS, kako je navedeno u Poglavlju 2, razvijani su kako bi odgovorili na potrebu masovnog prilagođavanja i veće reakcije na promjene proizvoda, proizvodne tehnologije i tržište. U svojoj osnovi zbog nepredvidivih varijacija oni su robusniji, ali imaju visoke

početne troškove početnih ulaganja pa je u određenim fazama PP ta fleksibilnost nedovoljno iskorištena. Novi, RPS imaju uporište u svojem dizajnu brze promjene u strukturi, za grupe proizvoda, što je zapravo odgovor na nove dinamičke promjene na tržištu i cilj im je pružiti točnu funkcionalnost i kapacitet, kada i koliko je to potrebno za dani PP.

Analizirajući postojeću proizvodnju u konceptu VFPS za što su dani podaci o proizvodnoj opremi i ciklusima obrade u Prilogu C i Prilogu D, formiran je PS za peti PP prema slici 6.18. Za svaki od proizvoda konstruirana je zasebna proizvodna ćelija koja vrši proizvodnju samo jednog tipa proizvoda uz mogućnost rekonstrukcije za novu varijantu istog proizvoda. Osnovne značajke tako postavljenog proizvodnog sustava su sljedeće:

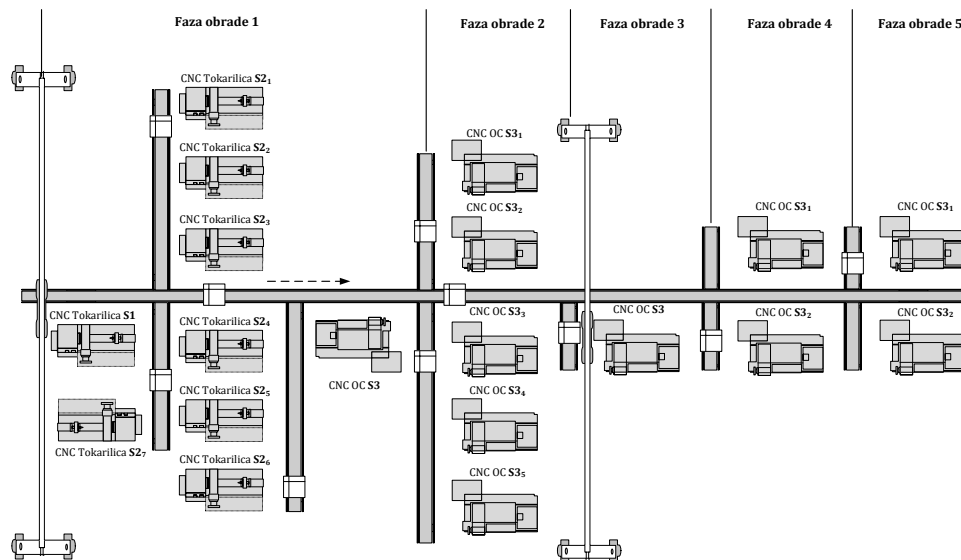
- visoki početni troškovi postavljanja proizvodnog sustava za dani (novi) PP,
- nizak stupanj iskorištenja η , prvenstveno u fazi rasta proizvodnje do pune količine (eng. *rump-up*),
- slab odziv na dinamičke oscilacije na tržištu unutar PP što generira povećane troškove u neiskorištenoj opremi ili dodatne logističke troškove u podkapacitiranoj opremi.



Slika 6.18 Izgled postojećeg VFPS

Motivacija u ovom radu za uvođenje RPS temelji se na uvjerenju da se neke ekonomske koristi moći postići kontroliranim povećanjem upotrebe ili smanjenjem viška kapaciteta i/ili viška funkcionalnosti prisutnih u FPS uključujući ključne karakteristike koji su osnova RPS.

Činjenica je da su ključni pokretač RPS-a rekonfigurabilni CNC strojevi. Međutim, trenutni razvojni potencijali takve opreme su još u prototipnoj fazi te nisu dostupni na tržištu. Preostaje prihvatiti potencijalne prednosti prilagodljivih PS s postojećom opremom s ciljem povećanja profitabilnosti sve dok se ne postigne značajniji iskorak u primjeni novih tehnologija. Takav PS prikazan je na slici 6.19 koji je ekvivalentan PS sa slike 6.18, a zadovoljava osnovna načela RPS-a:

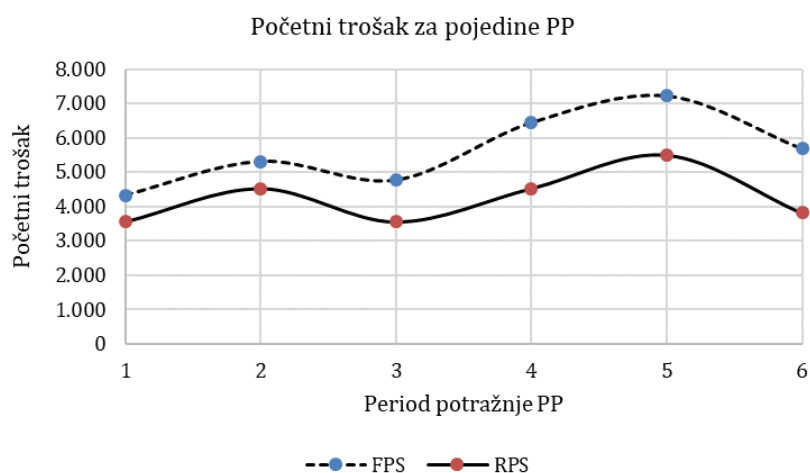


Slika 6.19 Izgled VRPS dobiven Novim GA

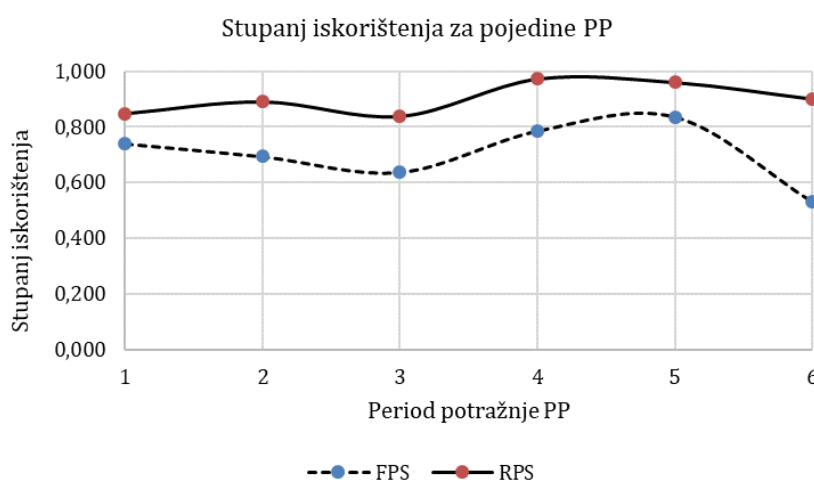
- modularnost; svaki nerekonfigurabilni CNC stroj predstavlja gradbeni modul koji se može jednostavno nadograditi određenom funkcionalnošću te su sve komponente strojnog sustava modularne što zahtjeva visoki stupanj standardizacije, koji danas i postoji,
- Integrabilnost; sposobnost integriranja strojeva, komponenti i podsustava na brz i jednostavan način na principu „prikluči i radi“ (eng. „*plug and produce*“) uz korištenje standardnih energetske priključaka i softvera što je jedan od osnovnih pokretačkih elemenata industrije 4.0
- Konvertibilnost; sposobnost brze i lake adaptacije i prilagodbe PS za izradu drugog proizvoda iz grupe proizvoda primjenom prilagodljivih steznih naprava i reznih alata te njihovom automatiziranom manipulacijom i skladištenjem. Proizvodnja temeljena na obradi jednog izratka u ciklusu dok se zamjena proizvoda vrši u skrivenom vremenu,
- Dijagnostibilnost; brzo prepoznavanje izvora problema u kvaliteti i pouzdanosti uz primjenu primjenom senzora i informatičkog sučelja koje u realnom vremenu upozoravaju i/ili vrše korekcije u PS,
- Prilagodljivost; sposobnost izrade određenog broja različitih izradaka, postignuto novim tehnološkim konceptima modularnog stezanja, primjenom senzora i informatičkog sučelja koje prepoznaje proizvod te na osnovi algoritma i dobivenih rješenja vodi izradak kroz proces,
- Skalabilnost; predstavlja okosnicu ovog rada i omogućava inkrementalno brzo i ekonomično mijenjanje kapaciteta.

Za projektiranje budućih PS, ključno je postalo postizanje optimalne skalabilnosti i promjenjive funkcionalnosti tijekom cijelog životnog ciklusa. Rekonfiguracija se postiže na dvije razine,

dodavanjem modula strojeva i cijelih strojeva s pripadajućim upravljačkim sustavima (još uvijek je u fazi razvoja i relativno skupo) te dizajnom sustava i softverskim rješenjima što predstavlja jeftiniji korak i treba ga uvijek iskoristiti prije nego što se pribjegne drugim složenijim rješenjima. U tom slučaju, trebalo bi uvijek provoditi i koristiti analizu troškova upotrebom različitih matematičkih alata i algoritama kako bi se odabrala najprikladnija konfiguracija za očekivani životni ciklus PS-a. Na slikama 6.20 i 6.21 dane su usporedne vrijednosti početnog troška i stupnja iskorištenja za dani primjer iz ovog rada na osnovi realnih podataka iz postojećeg PS. Očigledno je da se primjenom načela skalabilnosti te upotrebom odgovarajućih algoritma može ostvariti značajna ušteda u početnim investicijama u svim PP uz znatno veće iskorištenje proizvodne opreme. Premda su početni logistički i operativni troškovi nešto viši u početnoj fazi formiranja RPS-a, postoje određeni elementi koji doprinose smanjenju troškova tijekom cijelog životnog vijeka PS.



Slika 6.20 Usporedba konfiguracija za različite početne troškove



Slika 6.21 Usporedba konfiguracija za različite stupnjeve iskorištenja η

Među te elemente spadaju centralni softver za planiranje i kontrolu kao podrška konfiguriranja, unificirana i standardizirana oprema i priključni elementi, elementi prihvata i stezanja izradaka te složen, ali homogen i praktičan sustav osposobljavanja operatera koji u interakciji sa programskim sučeljem i uključenom umjetnom inteligencijom minimiziraju pojavu nekvalitetnih izradaka te eliminiraju zastoje u procesu. Za primijetiti je da u pristupu i primjeni modela FPS-a i RPS-a postoji dovoljno zajedničkih osnova da se podupire ideja o postojanju kontinuiteta između ova dva PS. Za postizanje učinkovite konfiguracije bit će potrebne neke od funkcija podrške kao što su:

- inteligentni softveri i algoritmi koji mogu pomoći u odabiru najbolje opreme (strojeva i logističke opreme) na temelju njihovih mogućnosti, točnosti i fleksibilnosti, zatim najboljih materijala, rashladnih sredstava, reznih alata te steznih naprava i komponenti koji će se koristiti za prihvata pojedinih izradaka,
- napredni softveri za projektiranje izradaka na osnovu želja kupaca koji će automatski generirati programe za CNC strojeve te definirati odgovarajuće režime rada, rezne alate i stezne naprave te slijed procesa, u suradnji sa algoritmima za formiranje konfiguracija,
- da bi se osigurala adekvatna konfigurabilnost i fleksibilnost po načelima RPS-a potrebno je uključiti industrijsku inteligenciju s ciljem stvaranja autonomnih upravljačkih sustava koja se razvija kroz kibernetičko fizikalne sustave (KFS) (eng. *Cyber - Physical Systems* (CPS)), koji prate povratne informacije iz fizičkog procesa i dinamički izračunavaju scenarije za generiranje upravljačkih signala u formiranju proizvodnih kapaciteta i konfiguracija. Integrirajući takve računalne alate u PS postiže se maksimalna funkcionalnost s ciljem povećanja produktivnosti i kvalitete te smanjenje troškova.

PS kao dio KFS-a, skup je podsustava i sučelja koji čine zajedničku strukturu iz koje se može učinkovito upravljati razvojem proizvodnih konfiguracija te smanjiti osjetljivost sustava na promjenu u volumenu i tipu proizvoda. U tako uređenim sustavima, postepeno skaliranje tj. smanjivanje ili povećavanje proizvodnih kapaciteta sustava predstavlja realnu opciju i u korištenju postojeće nekonfigurabilne proizvodne opreme i logističkih sustava. Nakon dodavanja novog stroja važni su čimbenici pravilnog korištenja stroja jer o tome izravno ovisi propusnost sustava uz minimalne angažirane početne investicije. U tom segmentu veliki značaj imaju algoritmi, među kojima je i ovaj predstavljen u ovom radu. Glavni cilj bio je postaviti uravnotežen PS uz optimalnu raspodjelu SKZ-a ili operativnih zadataka na različitim strojevima tako da je omogućeno korištenje više različitih SKZ po svakom stroju te više različitih tipova strojeva u svakoj fazi obrade, a s ciljem smanjenja početnih troškova. U uvjetima budućih trendova u potražnji kupaca i raznolikosti proizvoda, uloga vremena implementacije i planiranja skalabilnosti kapaciteta u dizajnu RPS-a postat će vitalan parametar konkurentnosti.

7 ZAKLJUČAK

U današnje vrijeme proizvodne se tvrtke suočavaju s vrlo konkurentnim globalnim tržištem koje zahtijeva sve veću raznolikosti i dostupnost proizvoda kako bi se udovoljilo različitim zahtjevima kupaca. Prisiljene su preispitivati svoje paradigme proizvodnje kako bi PS mogao biti dizajniran i djelotvorno operativan u okruženju koje se stalno mijenja. Izgradnja VRPS sposobnog proizvesti grupa proizvoda s različitim količinama i s različitom dinamikom u PP, pobuđuje interes mnogih proizvodnih tvrtki. Da bi se stvorili preduvjeti za optimalni PS, potrebno je odgovoriti na suštinska pitanja: kako dizajnirati i odabrati odgovarajuću konfiguraciju sustava za kombinaciju određene grupe proizvoda (određene tehnološke sličnosti) i kako rekonfigurirati postojeće proizvodne kapacitete da bi se novi zahtjevi poput promjene volumena proizvoda i uvođenja novih generacija proizvoda učinili ekonomičnim i financijski isplativim. Znanstveno istraživanje u ovom radu koje u osnovi daje odgovore na ova pitanja, temelji se na spoznajama iz stručne i znanstvene literature, te objavljenim znanstvenim i stručnim radovima tijekom zadnjih 20 godina. Prikazano je da je koncept RPS prikladan PS za obradu grupe proizvoda s umjereno čestim izmjenama proizvoda i srednjim do visokim količinama proizvodnje. Uz osnovna načela dizajna RPS, dana je sveobuhvatna metodologija dizajniranja skalabilnih sustava primjenom GA i skupa linearnih jednadžbi sa osnovnom funkcijom cilja, a to je minimizacija početnih troškova. Ovim modelom je također obuhvaćena mogućnost konfiguriranja više tipova postojećih (ili novih) strojeva u istoj fazi obrade čime se dodatno skraćuje ciklus izrade i smanjuje investicija u proizvodnu opremu. Konačno, ekonomska održivost predložene metodologije dokazana je usporedbom sa prethodnim istraživanjima gdje je novi predloženi pristup temeljen na osnovi GA rezultirao boljim rješenjem te primjerom temeljenim na stvarnom VFPS. Kratka vremena trajanja proizvoda te njihov brz izlazak na tržište, individualnost kroz više varijanti, male i fluktuirajuće količine te niske cijena proizvoda, glavna su ishodišta za projektiranje skalabilnih PS u njihovoj ranoj fazi.

7.1 Osvrt na provedeno istraživanje i rezultate

U ovom radu predstavljen je model za postizanje optimalnih početnih troškova u VRPS korištenjem GA sa ciljem proizvodnje grupe proizvoda. Predloženi model sastoji se od većeg broja parametara i nekoliko tipova ograničenja što rezultira kompliciranim problemom u smislu zadovoljenja ograničenja i generiranja izvedivih rješenja. Za prevladavanje ovog problema razvijen je novi pristup u formiranju konfiguracija koje sadrže više tipova proizvodne opreme u svakoj fazi obrade, korištenjem linearnih jednadžbi, koje se temelje na mapiranju varijabli odluke iz njihove izvorne diskretne domene u kontinuiranu domenu. Preraspodjela upotrebe proizvodne opreme preko uzastopnih SKZ-a za isti izradak, rješava se dodjeljivanjem više SKZ-a u jednoj fazi obrade. Korištenjem operatora križanja te novim pristupom u odabiru operatora mutacije, razvijeni postupak značajno smanjuje broj kontrolnih varijabli i veličinu prostora za pretraživanje. Uspješno razvijen i implementiran GA, optimizira novi skup varijabli kako bi se procijenile i usporedile različite izvedive alternative te proizvele više od jedne alternativne konfiguracije s minimalnim početnim troškovima ulaganja. Takav skup alternativa biti će koristan konstruktorima PS pri odabiru najbolje konfiguracije na početku svakog PP tijekom operativne faze RPS-a.

Sveobuhvatnim pregledom PS i njihovom evolucijom s posebnim naglaskom na RPS, detaljno su obrađene njihove ključne karakteristike, čiji osnovni elementi omogućuju brzu rekonfiguraciju sustava. Za takvu proizvodnu opremu, prvenstveno RS, postoje određene prototipne izvedbe ali ne i široka primjena, tako da je koncept RPS temeljen na principima modularnosti gdje je ona moguća. Predstavljene su višepredmetni PS te dane osnovne karakteristike svakog od njih, od pojedinačnih PS do FPS. Zaključno su prikazani RPS te odnos između fleksibilnosti i rekonfigurabilnosti. U fazi konstrukcije PS, konfiguracija predstavlja najznačajniji korak u definiranju vrijednosti promjenjivosti PS. Da bi se dobila optimalna konfiguracija i minimalni početni trošak, potrebno je imati informaciju, koji je minimalni broj strojeva potreban za izvođenje svih faza obrade u procesu, što je potkrepljeno i primjerom. U nastavku se daje osnovne karakteristike i pojašnjenja skalabilnosti kao osnovnog konstrukta RPS i čimbenika precizne prilagodbe kapaciteta PS. Pravilnim korištenjem rezultata algoritama te razumijevanjem proizvodnih procesa i sustava u svjetlu preraspodjele kapaciteta, tvrtke mogu znatno smanjiti svoja ulaganja u proizvodna sredstva te ih osigurati kada je za to potreba. Time se osigurava konzistentna profitabilnost bez obzira na raspon i volumen proizvoda. Detaljno je obrađena industrijska primjena te su dani neki od mogućih rješenja.

Prikazan je razvoj modela koji uzima u obzir osnovne pretpostavke: RPS temeljen je na nekonfigurabilnim strojevima za obradu skidanjem čestica, identičnih ili različitih u svakoj fazi obrade, paralelno povezanih sa uzastopno dodijeljenim SKZ svakog izratka. Funkcija cilja

osigurava optimalnu konfiguraciju na način da se u polju pretraživanja pronađe onaj omjer iskorištenja i troška, sa dodijeljenim SKZ, koji će uz dana ograničenja osigurati minimalne početne troškove. U radu je odabran pristup korištenja GA koji spada u grupu globalnih algoritama temeljenih na populaciji, povezanih prirodnom selekcijom. Dane su odgovarajuće tehnike kodiranja i dekodiranja te je detaljno prikazano oblikovanje kromosoma kao glavnog nositelja informacije.

Model je popraćen praktičnim prikazom, na osnovi realnih podataka iz postojeće proizvodnje, korištenjem pet tehnološki sličnih proizvoda iz grupe proizvoda sa ukupno šest PP koji predstavljaju dinamičku osnovu za pojašnjenje modela. Proizvodna oprema je grupirana u dva osnovna tipa strojeva: CNC tokarilice te CNC obradne centre različitih koncepcija. Dobiveni rezultati upućuju na nekoliko bitnih činjenica. Algoritam „gura“ i pronalazi optimalna rješenja u prvim fazama obrade tako da je najviše različitih tipova strojeva u prvoj ili drugoj fazi obrade; algoritam, prema ulaznim podacima iz realne proizvodnje, ne pronalazi dovoljno dobru konfiguraciju, koja je troškovno minimalna, u koju bi uključio skuplje i produktivnije strojeve. Simulirajući na nižim cijenama skupih strojeva, algoritam odabire takve strojeve tek kada je cijena i do 50% niža. Proizlazi da je za maloserijsku do srednjeserijsku proizvodnju uputno koristiti strojeve nižeg cjenovnog ranga kako zbog niže cijene opreme tako i šireg raspona raspoređenih SKZ-a. Dobiveni rezultati su uspoređeni sa predstavljanim znanstvenim radovima na području optimizacije višepredmetnih PS te sa formiranim realnim PS u postojećoj proizvodnji. U oba slučaja algoritam, predstavljen u ovom radu, generira bolje rezultate u smislu manjih početnih troškova i bolje iskorištenja sustava.

Ovim znanstvenim radom dan je doprinos području dizajniranja i planiranja skalabilnog višepredmetnog PS koji su i teorijske i praktične prirode. Predstavljani algoritmi i metode mogu se koristiti u industriji za projektiranja i optimiranja sličnih PS. Na temelju postojećih istraživanja RPS i novih saznanja, dan je okvir za primjenu planiranja skalabilnih rekonfigurabilnih proizvodnih kapaciteta koji će pomoći konstruktorima i planerima PS da brzo odgovore na tržišne promjene i formiraju PS koji će biti troškovno optimalan uz zadovoljenje ograničenja kapaciteta.

7.2 Smjerovi budućih istraživanja

Smjernice za buduća istraživanja mogu se podijeliti na nekoliko potencijalnih područja:

Model višepredmetnog skalabilnog sustava sa više tipova strojeva u jednoj fazi obrade, moguće je dizajnirati korištenjem višestrukih ciljeva optimizacije koji istodobno prate nekoliko kriterija kao npr. početni trošak, propusnost, relativni napor izvedbe, protok, produktivnost ili neto dobit, te na taj način opravdati odabrano rješenje optimalnog sustava. Problemi optimizacija u kojima su ciljevi u odnosu jedan sa drugim dovodi do informacije o skupu optimalnih, kompromisnih

rješenja. U tu svrhu dobro bi bilo koristiti algoritam NSGA-II koji se temelji na GA sortiranja bez dominiranja koristeći dvije ili više vrsta fitnes funkcija. Međutim, takav pristup i analitika povećavaju broj varijabli čime se stvaraju poteškoće u postizanju optimalnog rješenja, a potreban je i znatno veći računalni kapacitet.

Pojam „glatke rekonfiguracije“ već je poznat u radu Youssef i ElMaraghy [37] gdje je razvijena metrika koja pruža relativno mjerenje očekivanih troškova, vremena i napora potrebnih za pretvorbu iz jedne konfiguracije u drugu na razini tržišta, sustava i stroja. Takav model je moguće modificirati i primijeniti na višepredmetni PS predstavljen u ovom radu, koji u svojoj osnovi ima različite tipove proizvodne opreme u svakoj fazi obrade. Značajno bi bilo uključiti mogućnost da u fazi pada potražnje i sukladno tome smanjene potrebe za proizvodnim kapacitetima, ovaj algoritam predlaže oduzimanje onih strojeva čije je vrijeme instalacije/deinstalacije kraće i jeftinije. Ovakva metrika predstavlja dobar alat za procjenu prijelaza između trenutne konfiguracije i broja izvedivih mogućih konfiguracija za sljedeće razdoblje što svakako utječe na odluke o odabiru konfiguracija na početku svakog PP.

Za model, predstavljen u ovom radu, bilo bi od značaja uključiti sve direktne parametre proizvodnog procesa kao što su potrošnja reznog alata, rashladnog sredstva, energenata (zraka, električne energije i sl.), raspoloživi proizvodni prostor, zatim početni troškovi razvoja reznog i steznog alata te troškovi osoblja. Također bilo bi korisno uključiti ona vremena koja nisu obuhvaćena modelom (npr. vremena stavljanja i skidanja izradaka tamo gdje se to ne vrši u skrivenom vremenu). U ovu grupu spadaju i troškovi te operativna vremena uređaja za manipulaciju jer trenutni model nema uključene i ove troškove što ne odražava u potpunosti ukupni trošak sustava. Na taj način bi prikaz ukupne investicije i troška bio puno precizniji za odabranu konfiguraciju sustava, a dobili bi se realni podaci procesa PS-a.

Integracija je značajan faktor u dizajnu RPS-a. U ovom radu kriteriji konstrukcije PS jesu proizvodni kapacitet na razini faze obrade i odnos prioriteta između SKZ-a. Međutim, u realnim okvirima postojeće proizvodnje, dizajn PS-a uključuje u sve većem obimu sustave za manipulaciju izradcima, steznim i reznim alatima. Oni postaju značajni čimbenik u formiranju strukture konfiguracije sustava, stoga je njihova integracija u proces modeliranja i konstrukciju sustava od ključne važnosti.

Primjena predložene metodologije može se primijeniti i na druge proizvodne discipline kao što su npr. montaža i zavarivanje. Budući da je skalabilnost faktor koji utječe na ekonomsku komponentu poslovanja, ona bi se trebala lako primijeniti na druge discipline. Ostaje glavno pitanje mogućnosti konstrukcije modularnih RS u drugim proizvodnim segmentima.

POPIS LITERATURE

- [1] Mehrabi, M.G., Ulsoy, A.G., Koren, Y.: „Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, 403-419, 2000.
- [2] Koren, Y.: „The Global Manufacturing Revolution: Product-Process-Business Integration and Reconfigurable Systems“, *John Wiley & Sons, Inc*, Hoboken, New Jersey, 2010.
- [3] Wiendahl, H.-P., ElMaraghy, H., Nyhuis, P., Zah, M.F., Wiendahl, H.-H., Duffie, N., Brieke, M.: „Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56(2):783–809, 2007.
- [4] Manne, A.S.: „Investment for capacity expansion, size, location and time-phasing“, *The MIT Press*, Cambridge, MA, 1967.
- [5] Luss, H.: „Operation Research and Capacity Expansion Problems: A Survey“, *Operational Research*, (30/5), 907-947, 1982.
- [6] ElMaraghy, H.A.: „Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 17, 261-276, 2006.
- [7] Putnik, G., Sluga, A., ElMaraghy, H., Teti, R., Koren, Y., Tolio, T., Hon, B.: „Scalability in manufacturing systems design and operation: State-of-the-art and future developments roadmap“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62, 751–774, 2013.
- [8] ElMaraghy, H.: „Smart changeable manufacturing systems“, *Procedia Manufacturing*, 28, 3-9, 2019.
- [9] Tolio, T., Ceglarek, D., ElMaraghy, H.-A., Fischer, A., Hu, S.-J., Laperrière, L., Newman, S., Váncza, J.: „Species—Co-evolution of Products, Processes and Production Systems“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(2):672–693, 2010.
- [10] Evans, G., Naim, M.: „The dynamics of capacity constrained supply chains“, *Proceedings of international system dynamics conference*, Stirling, pp. 28-35, 1994.
- [11] Helo, P.: „Dynamic modeling of surge effect and capacity limitation in supply chains“, *International Journal of Production Research*, (38/17), 4521-4533, 2000.

- [12] Zhang, X., Wang, J., Luo, Z.: „A Stochastic Model of a Reconfigurable Manufacturing System Part 1: A Framework“, *International Journal of Production Research*, (38/10), 2273-2285, 2000.
- [13] Zhang, X., Wang, J., Luo, Z.: „A Stochastic Model of a Reconfigurable Manufacturing System Part 2: Optimal configuration“, *International Journal of Production Research*, (38/12), 2829-2842, 2000.
- [14] Abdi, M.R., Labib, A.W., Luo, Z.: „Grouping and Selecting Products: The Design Key of Reconfigurable Manufacturing Systems (RMSs)“, *International Journal of Production Research*, (42/3), 521-546, 2004.
- [15] Abdi, M.R., Labib, A.W., Luo, Z.: „Feasibility Study of the Tactical Design Justification for Reconfigurable Manufacturing Systems Using the Fuzzy Analytical Hierarchical Process“, *International Journal of Production Research*, (42/15), 3055-3076, 2004.
- [16] Meng, G., Heragu, S.S., Zijm, H.: „Reconfigurable Layout Problem“, *International Journal of Production Research*, (42/22), 4709-4729, 2004.
- [17] Saxena, L.K., Jain, P.K.: „A model and optimisation approach for RMS design“, *International Journal of Production Research*, Vol. 50, No. 12, 3359-3381, 2012.
- [18] Koren, Y., Wang, W., Gu, X.: „Value creation through design for scalability of reconfigurable manufacturing systems“, *International Journal of Production Research*, (55/5), 1227-1242, 2017.
- [19] Wang, W., Koren, Y.: „Scalability Planning for Reconfigurable Manufacturing Systems“, *Journal of Manufacturing Systems*, 31(2), 83-91, 2012.
- [20] Koren, Y., Gu, X., Guo, W.: „Reconfigurable manufacturing systems: Principle, design, and future trends“, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 13(2), 121-136, 2018.
- [21] Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., Koren, Y., Heytler, P.: „Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 13, No. 2,, 135-146, 2002.
- [22] Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G., Van Brussel, H.: „Reconfigurable manufacturing systems“, *Annals of the CIRP*, Vol. 48/2, 1999.
- [23] Mikac, T.: „Optimizacija koncepta proizvodnog sustava“, Doktorska disertacija, *Tehnički fakultet Rijeka*, 1994.
- [24] Doboviček, S.: „Optimiranje konceptualnog modela kontrolnog podsustava pri projektiranju proizvodnog sustava“, Doktorski rad, *Tehnički fakultet Rijeka*, 2014.
- [25] Matta, M., Tolio, T.: High Flexible and High Productive Manufacturing System Architecture“, *The 15th International Conference on Production Research*, Limerick, Ireland, 1999.
- [26] Koren, Y.: „General RMS characteristics. Comparison with dedicated and flexiblesystems“, Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories, *Springer*, New York, 2006.

- [27] Bi, Z.M., Lang, Y.T., Marcel, V., Orban, P.: „Development of reconfigurable machines“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39, 1227–1251, 2008.
- [28] Koren, Y., Shpitalni, M.: „Design of reconfigurable manufacturing systems“, *Journal of Manufacturing Systems*, 29, 130–141, 2011.
- [29] Singh, A., Gupta, S., Asjad, M., Gupta, P.: „Reconfigurable manufacturing systems: journey and the road ahead“, *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 8(2), 1849–1857, 2017.
- [30] Maier-Speredelozzi, V., Koren, Y., Hu, S.J.: „Convertibility Measures for Manufacturing Systems“, *CIRP Annals - Manufacturing Technologies*, 52(1), 367–370, 2003.
- [31] Koren, Y., Gu, X., Guo, W.: „Choosing the system configuration for high-volume manufacturing“, *International Journal of Production Research*, 2017.
- [32] Erixon, G., Yxkull, A., Arnström, A.: „Modularity – the basis for Product and Factory Re-engineering“, *Annals of the CIRP*, 45/1, 1-4, 1996.
- [33] Bayazit, O., Karpak, B.: „An analytical network process-based framework for successful total quality management (TQM): An assessment of Turkish manufacturing industry readiness“, *International Journal of Production Economics*, 105, 25-40, 2007.
- [34] Dorndorf, U., Pesch, E.: „Evolution based learning in a job shop scheduling environment“, *Computers and Operations Research*. Vol. 22, No. 1, 25-40, 1995.
- [35] Loerch, Y.: „An introduction to graph algorithms“, 2000. (dostupno sa: https://www.cs.auckland.ac.nz/courses/compsci220s1t/archive/compsci220ft/lectures/GGlectures/220ch2_graph.pdf)
- [36] Bäck, T., Fogel, D.B., Michalewicz, Z.: „Evolutionary Computation 1 – Basic Algorithms and Operators“, *Taylor&Francis Group, Inc.*, New York, 2000.
- [37] Youssef, A.M.A., ElMaraghy, H.A.: „Assessment of manufacturing systems reconfiguration smoothness“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 30, 174-193, 2006.
- [38] <https://www.americanmachinist.com/machining-cutting/media-gallery/21898960/mazaks-discovery-phase-for-machining-automation>
- [39] Katz, R.: „Design principles of reconfigurable machines“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 34, 430–439, 2007.
- [40] Ramesh, M., Yip-Hoi, D., Dutta, D.: „Feature Based Shape Similarity Measurement for Retrieval of Mechanical parts“, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1, 245-256, 2001.
- [41] Shamoto, E., Moriwaki, T.: „Rigid XY Table for Ultraprecision Machine Tool Driven by Means Waling Drive“, *Annals of the CIRP*, 46/1, 301–304, 1997.
- [42] Padayachee, J., Bright, G., Masekamela I.: „Modular reconfigurable machine tools: Design, Control and Evaluation“, *South African Journal of Industrial Engineering*, 20(2), 127–143, 2009.

- [43] Koren, Y., Ulsoy, A.G.: „United States Patent, No. 6,349,237“, 2002.
- [44] Li, Z., Pasek, Z., Adams J.: „Machining fixtures: state-of-the-art review Reconfigurable fixtures: concept & examples“, *ERC/RMS Technical Report TR-50 University of Michigan, Ann Arbor*, 2006.
- [45] Pritschow, G., et al: „Modular System Platform for Open Control Systems“, *Production Engineering*, Vol. 4, No. 2, 1997.
- [46] Koberg, D., Zühlke, D.: „Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies“, *IFAC-Papers On Line* 48-3, 1870–1875, 2015.
- [47] Koren, Y., Hu, S.J., Weber, T.W.: „Impact of Manufacturing Systems Configuration on performance“, *CIRP Annals - Manufacturing Technologies*, 47(1), 369–372, 1998.
- [48] Garbie, I. H.: „A methodology for the reconfiguration process in manufacturing systems“, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 25, No. 6, 891-915, 2014.
- [49] Yang, S., Wu, C., Hu, S.J.; „Modeling and analysis of multi-stage transfer lines with unreliable machines and finite buffers“, *Annals of Operations Research*, Springer, Vol. 150(1), 31-46, 2007.
- [50] Perinić, M.: „Optimizacija ciklusa izrade na FPS primjenom genetskih algoritama – Doktorska disertacija“, *Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka*, 2004.
- [51] Kimura, F., Nielsen, J.: „A design for product family under manufacturing resource constraints“, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, No. 54 (1): 139–142, 2005.
- [52] Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H., Muller, E.: „Developing products for changeable learning factories“, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technologies*, 296, 2014.
- [53] Wang, W., Koren, Y.: „Design Principles of Scalable Reconfigurable Manufacturing Systems“, *7th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management, and Control International Federation of Automatic Control* June 19-21, 1411-1416, Saint Petersburg, Russia, 2013.
- [54] Ni, J., Jin, X.: „Decision support systems for effective maintenance operations“, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, No. 61 (1): 411–414, 2015.
- [55] Xia, T., Tao, X., Xi, L.: „Operation process rebuilding (OPR)-oriented maintenance policy for changeable system structures“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, No. 14 (1): 139–148, 2017.
- [56] Fertsch, M., Grzybowska, K., Stachowiak, A.: „Models of manufacturing systems – classification framework“, *Research in logistics and production*, Vol. 1, No. 1, 45-51, 2011.
- [57] Chisholm, A.W.J.: „Nomenclature and definitions for manufacturing systems“, *CIRP Annals*, Vol. 39/2, 735 – 742, 1990.
- [58] Anil Kumar, S., Suresh, N.: „Operations Management“, *New Age International Ltd, New Delhi*, 2009.
- [59] Bellgran, M., Säfsten, K.: „Production Development: Design and Operation of Production Systems“, *Springer London Dordrecht Heidelberg*, New York, 2010.

- [60] Vranješ, B., Jerebić, B., Kunica, Z.: „Inženjerski priručnik: Proizvodno strojarstvo – Projektiranje proizvodnih sustava“, *Školska knjiga*, Zagreb, 2012.
- [61] Groover, Mikell, P.: „Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems, 3rd ed.“, *John Wiley & Sons, Inc.*, New Jersey, 2007.
- [62] Selaković, M.: „Organizacija proizvodnje“, *Tehnički fakultet Rijeka*, Rijeka, 1987.
- [63] Ljubetić, J.: „Optimalizacija postupaka pri projektiranju višepredmetnih proizvodnih sistema – Doktorska disertacija“, *Tehnički fakultet Rijeka*, Rijeka, 1991.
- [64] Mikac, T., Doboviček S.: „Predicting Process Capability Index in Early Stage of Manufacturing System Design“, *Annual 2015 of the Croatian Academy of Engineering (HATZ)*, Zagreb, 2016.
- [65] Koren, Y., Gu, X., Badurdeen, F., Jawahir, I.S.: „Sustainable Living Factories for Next Generation Manufacturing“, *Procedia Manufacturing*, 21, 26-36, 2018.
- [66] Kovačec, M.: „Model učinkovitog upravljanja proizvodnim sustavima – Doktorska disertacija“, *Fakultet strojarstva i brodogradnje*, Zagreb, 2015.
- [67] Mikac, T.: „Projektiranje proizvodnih sustava“, *Tehnički fakultet Rijeka*, Rijeka, 2004.
- [68] Fujii, S., Morita, H., Kakino, Y., Ihara, Y., Takata, Y., Murakami, D., Miki, T., Tatsuta, Y.: „Highly productive and reconfigurable manufacturing system“. *Proc Pacific Conf Manufacturing 2*, 970–980, 2000.
- [69] Wiendahl, H. P.: „Some remarks on changeability, reconfigurability and flexibility of manufacturing systems. Paradigms of Manufacturing - A Panel Discussion“, *3rd Conference on Reconfigurable Manufacturing*, Ann Arbor, Michigan, USA, 2005.
- [70] Wiendahl, H. P., Heger, C.L.: „Justifying changeability: a methodical approach to achieving cost effectiveness“, *Proceedings of the CIRP 2nd International Conference on Reconfigurable Manufacturing*, Michigan, USA, 2003.
- [71] Mikac, T., Blažević, D.: „Planiranje i upravljanje proizvodnjom“, *Tehnički fakultet Rijeka*, Rijeka, 2007.
- [72] Novaes, A.G.N., Scholz-Reiter, B., Durski Silva, V.M., Rosa, H.: „Long-term planning of a container terminal under demand uncertainty and economies of scale“, *Pesquisa Operacional*, 32 (1), 55-85, 2012.
- [73] Spicer, J. P.: „A design methodology for scalable machining systems“, *Doctoral dissertation, The University of Michigan*, 2010.
- [74] Freidenfeld, J.: „Capacity expansions: Analysis of simple models with applications“, *Nord-Holland*, New York, 1981.
- [75] Sethi, A.K., Sethi, S.P.: „Flexibility in manufacturing: A Survey“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, No. 2 (3): 289–328, 1990.
- [76] Son, S.: „Configuration Generation Methodologies for Reconfigurable Machining Systems“, *PhD Dissertation, The University of Michigan*, 2000.

- [77] Spicer, P., Koren, Y., Shpitalni, M., Yip-Hoi, D.: „Design Principles for Machining System Configurations“, *CIRP Annals*, Volume 51, Issue 1, (275-280), 2002.
- [78] Spicer, P., Yip-Hoi, D., Koren, Y.: „Scalable reconfigurable equipment design principles“, *International Journal of Production Research*, Vol. 42, No. 22: 4839–4852, 2005.
- [79] Alfieri, A., Nicosia, G.; „Minimum cost multi-product flow lines“, *Annals of Operations Research*, Springer, Vol. 150(1), 31-46, 2007.
- [80] Wilhelm, W.E., Gadidov R.: „A Branch-and-Cut Approach for a Generic Multiple-Product, Assembly-System Design Problem“, *Inform Journal on Computing*, 16(1):39-55, 2004.
- [81] Kimms, A.: „Minimal investment budgets for flow line configuration“, *IIE Transactions*, 32(4), 287-298, 2000.
- [82] Youssef, A.M.A., ElMaraghy, H.A.: „Availability consideration in the optimal selection of multiple-aspect RMS configurations“, *International Journal of Production Research*, Vol. 46, No. 21: 5849–5882, 2008.
- [83] Youssef, A.M.A., ElMaraghy, H.A.: „Performance analysis of manufacturing systems composed of modular machines using the universal generating function“, *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 27, 55–69, 2008.
- [84] Holland, J.H.: „Adaptation in natural and artificial systems“, *A Bradford Book, The MIT Cambridge*, 1992.
- [85] Srinivas, M., Patnaik, L. M.: „Genetic Algorithms: A Survey“, *Computer*, IEEE Computer Society, Vol. 27, Issue: 6, 17-26, 1994.
- [86] Michalewicz, Z., Dasgupta, D., Le Riche, R. G., Schoenauer, M.: „Evolutionary Algorithms for Constrained Engineering Problems“, *Computer and Industrial Engineering*, Vol. 30, Issue 4 851-870, 1996.
- [87] Park, J.: „Basic Graph Algorithms“, *CS 97SI, Stanford University*, 2015. (dostupno sa: file:///C:/Users/Korisnik/Desktop/Doktorski/Park_Basic%20graph%20algorithms_presentation.pdf).
- [88] Gen, M., Cheng, R.: „Genetic algorithms and engineering optimization“, *John Wiley&Sons, Inc.*, New York, 2000.
- [89] Freiheit, T., Wng, W., Spicer, P.: „A case study in productivity-cost trade-off in the design of paced parallel production systems“, *International Journal of Production Research*, Vol. 45, No. 24: 3263–3288, 2007.
- [90] El-Baz, M.A.: „A genetic algoritam for facility layout problems of different manufacturing environments“, *Computers & industrial Engineering*, 47, 233-248, 2004.
- [91] Ahi, A., Aryanezhad, M.B., Ashtiani, B., Makui, A.: „A novel approach to determine cell formation, intracellular machine layout and cell layout in the CMS problem based on TOPSIS method“, *Computers & Operations Research*, 36, 1478-1496, 2009.
- [92] Wang, H., Zhu, X., Wang, H., Hu, S.J., Lin, Z., Chen, G.: „Multi-objective optimization of product variety and manufacturing complexity in mixed-model assembly systems“, *Journal of Manufacturing Systems*, 30, 16–27, 2011.

- [93] Rajasekharan, M., Peters, B. A., Yang, T.: „A genetic algorithm for facility layout design in flexible manufacturing systems“, *International Journal of Production Research*, Vol. 36, No. 1: 95–110, 1998.
- [94] Kuzgunkaya, O., ElMaraghy, H.A.: „Assessing the structural complexity of manufacturing systems configurations“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, Vol. 18, 145–171, 2006.
- [95] Youssef, A.M.A and ElMaraghy, H.A.: „Optimal configuration selection for reconfigurable manufacturing systems“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 19 (2), 67–106, 2007.
- [96] Tang, L.: „Design and reconfiguration of RMS for part family“, *Thesis (PhD)*, University of Michigan, 2005.
- [97] Murty, K.: „Linear and combinatorial programming“, *Robert E. Krieger Publishing Company, Inc.*, 1985.
- [98] Nahmias, S.: „Production and Operations Analysis“, *Richard D. Irwin Publishing Company, Inc.*, 1993.
- [99] Spicer, P., Carlo, H.J.: „Integration reconfiguration cost into the design of multi-period scalable reconfigurable manufacturing systems“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. = 129, 202–210, 2007.
- [100] Kuendee, P., Janjarassuk, U.: „A Comparative Study of Mixed-Integer Linear Programming and Genetic Algorithms for Solving Binary Problems“, *5th International Conference on Industrial Engineering and Applications*, 2018.
- [101] Youssef, A.M.A., ElMaraghy, H.A.: „Modeling and optimization of multiple-aspect RMS configuration“, *International Journal of Production Research*, Vol. 44, No. 22, 4929–4958, 2006.
- [102] Yang, S., Hu, S.J.: „Productivity analysis of a six CNC machine manufacturing system with different configurations“, *Proceedings of the 2000 Japan–USA Flexible Automation Conference*, p. 499–505, 2000.
- [103] Zhong, W., Maier-Speredelozzi, V., Bratzel, A., Yang, S., Chick, S.E. and Hu, S.J.: „Performance analysis of machining systems with different configurations“, *Proceedings of the 2000 Japan–USA Flexible Automation Conference*, p. 783–790, 2000.
- [104] Maier-Speredelozzi, V. and Hu, S.J.: „Selecting manufacturing system configurations based on performance using AHP“, *Society of Manufacturing Engineers*, 2002.
- [105] Xiaobo, Z., Jiancai, W. and Zhenbi, L.: „A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system. Part 1: A framework“, *International Journal of Production Research*, No. 38, 2273–2285, 2000.
- [106] Xiaobo, Z., Jiancai, W. and Zhenbi, L.: „A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system. Part 2: Optimal configurations“, *International Journal of Production Research*, No. 38, 2829–2842, 2000.

- [107] Xiaobo, Z., Jiancai, W. and Zhenbi, L.: „A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system. Part 3: Optimal selection policy“, *International Journal of Production Research*, No. 39, 747–758, 2001.
- [108] Xiaobo, Z., Jiancai, W. and Zhenbi, L.: „A stochastic model of a reconfigurable manufacturing system. Part 4: Performance measure“, *International Journal of Production Research*, No. 39, 1113–1126, 2001.
- [109] Ohiro, T., Myreshka, Morikawa, K. and Takahashi, K.: „A stochastic model for deciding an optimal production order and its corresponding configuration in a reconfigurable manufacturing system with multiple product groups“, *Proceedings of the CIRP 2nd International Conference on Reconfigurable Manufacturing*, 2003.
- [110] Tang, L., Yip-Hoi, D.M., Wang, W., Koren, Y.: „Concurrent line-balancing, equipment selection and throughput analysis for multi-part optimal line design“, *International Journal for Manufacturing Science and Production*, Vol. 6, Nos 1-2, 71–80, 2004.
- [111] Tang, L., Yip-Hoi, D.M., Wang, W., Koren, Y.: „Selection principles on manufacturing system for part family“, *Proceedings of the CIRP 3rd International Conference on Reconfigurable Manufacturing*, 2005.
- [112] Son, S.Y.: „Design principles and methodologies for reconfigurable machining systems“, *PhD thesis, University of Michigan*, 2000.
- [113] Dou, J., Dai, X., Meng, Z.: „Optimisation for multi-part flow-line configuration of reconfigurable manufacturing system using GA“, *International Journal of Production Research*, No. 48, No. 14, 4071–4100, 2010.
- [114] Dou, J., Dai, X., Meng, Z.: „Precedence graph-oriented approach to optimise single-product flow-line configurations of reconfigurable manufacturing system“, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 22, No. 10, 923–940, 2009.
- [115] Gen, M., Cheng, R.: „Genetic algorithms and engineering design“, *John Wiley&Sons, Inc.*, New York, 1997.
- [116] Deif, A.M., ElMaraghy, W.: „Effect of reconfiguration costs on planning for capacity scalability in reconfigurable manufacturing systems“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 18, 225–238, 2006.
- [117] Kratica, J.: „Paralelizacija genetskih algoritama za rešavanje nekih NP-kompletnih problema“, *Doktorska disertacija*, Beograd, 2000.
- [118] Servinc, A., Gur, S., Eren, T.: „Analysis of the Difficulties of SMEs in Industry 4.0 Applications by Analytical Hierarchy Process and Analytical Network Process“ *Processes*, Vol. 6, 264, 1-16, 2018.

POPIS ILUSTRACIJA

Popis tablica

Tablica 2.1 Usporedba u ključnim elementima između NPS-a i FPS-a [2]	17
Tablica 2.2 Evolucija proizvodnog okruženja [27]	18
Tablica 2.3 Karakteristike RPS-a koje podupiru produktivnost i smanjenje troškova [26]	30
Tablica 3.1 Klasifikacija i usporedba FPS i RPS-a [57]	51
Tablica 4.1 Učinci skalabilnosti kod primjene CNC obradnih strojeva [74]	59
Tablica 4.2 Pravila koja određuju gornju i donju granicu duljine i širine konfiguracije [74]	71
Tablica 6.1 Pregled proizvodne opreme za formiranje VRPS	112
Tablica 6.2 Odnos Z, KZ i SKZ za svaki proizvod	114
Tablica 6.3 20 najboljih konfiguracija za peti period potražnje	119
Tablica 6.4 Usporedni dobiveni podaci za tri pristupa rješavanja GA	130

Popis slika

Slika 1.1 Skalabilnost kao jedan od glavnih pokretača promjenjive proizvodnje [7]	2
Slika 1.2 Prikaz ukupne efektivne učinkovitosti proizvodne opreme	5
Slika 2.1 Industrijske revolucije kroz povijest (http://www.novomics.com/)	10
Slika 2.2 Inovacije u PS pokretane novim tehnološkim čimbenicima [2]	12
Slika 2.3 Vrijeme i ciklusi razvoja proizvoda i uvođenja proizvodnje [22]	13
Slika 2.4 Tržišne i društvene potrebe u usporedbi sa nastalim modelima proizvodnje [2]	14
Slika 2.5 Izgled FPS za proizvodnju automobilskih dijelova malih serija [38]	16
Slika 2.6 Evolucija proizvodnje kroz prizmu složenosti proizvoda i pojave na tržištu [27]	17
Slika 2.7 Prikaz koncepta preraspodjele resursa [43]	19

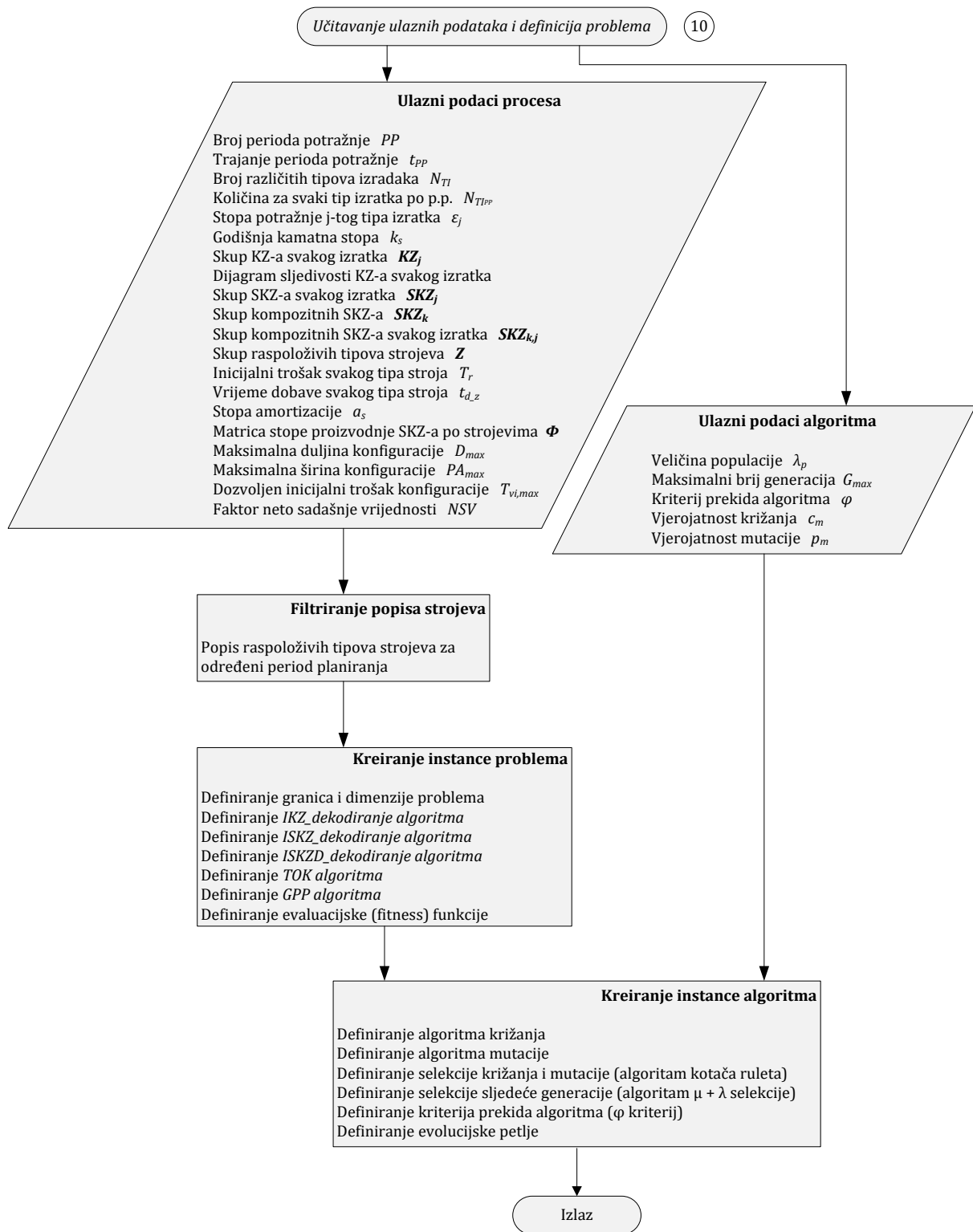
Slika 2.8 Skica RPS konfiguracije sa povratnim transportnim sustavom [20]	20
Slika 2.9 Prvi a) i drugi b) princip skalabilnosti [7].....	25
Slika 2.10 Konfiguracije sa različitim postavkama skalabilnosti [7]	26
Slika 2.11 Sustav standardiziranog priključka „priključi i proizvodi“ [46].....	28
Slika 2.12 a) Prototipni RS (The Arch-type Reconfigurable Machine Tool (RMT)) [2]	31
Slika 3.1 Prikaz PS kroz tok izrade.....	38
Slika 3.2 Komponente inteligentnog proizvodnog sustava	39
Slika 3.3 Modeliranje PS.....	42
Slika 3.4 Hodogram obrade kod: a) pojedinačnog proizvodnog kapaciteta, b) fleksibilne ćelije .	44
Slika 3.5 Hodogram obrade kod modela rasporeda strojeva prema vrsti opreme	45
Slika 3.6 Hodogram obrade kod modela strojeva sličnog redoslijeda	46
Slika 3.7 Hodogram obrade kod modela višepredmetnog linijskog sustava.....	47
Slika 3.8 Hodogram obrade kod FPS.....	48
Slika 3.9 Hodogram obrade kod RPS	49
Slika 3.10 Način projektiranja RPS	55
Slika 3.11 Konfiguracije sustava s četiri stroja	56
Slika 4.1 Prikaz ekspanzije kapaciteta [72].....	61
Slika 4.2 Prikaz koncepta proizvođača strojeva Elha [https://www.elha.de].....	65
Slika 4.3 Prikaz koncepta proizvođača strojeva Mikron [https://www.mikron.com/]	66
Slika 4.4 Sustav brzo izmjenjivih viševretenih obradnih jedinica proizvođača Grob.....	67
Slika 4.5 Primjer automatiziranog paletnog FPS [https://www.teh-cut.hr].....	67
Slika 4.6 Primjer automatiziranog robota za manipulaciju paletnih sustava	68
Slika 4.7 Konfiguracija varijabilnog procesa	70
Slika 5.1 Razvoj PS za predviđeni horizont.....	72
Slika 5.2 Ciklusi rotacije proizvodnje serija izradaka	75
Slika 5.3 Rekonfiguracija skalabilnog RPS.....	77
Slika 5.4 Izračun troška rekonfiguracije.....	78
Slika 5.5 Proces skaliranja kapaciteta [99, 102].....	78
Slika 5.6 Dijagram toka informacija za modeliranje višepredmetnog skalabilnog sustava.....	81
Slika 5.7 Primjer odabrane višepredmetne konfiguracije	82
Slika 5.8 Veza između Z (Z _a), KZ i SKZ	83
Slika 5.9 Primjer grafikona odnosa redoslijeda KZ ili sinoptika procesa obrade.....	84
Slika 5.10 Pregled GA-osnove pristupa.....	98
Slika 5.11 Prezentacija niza (kromosoma) za jedan ISKZD	100
Slika 5.12 Križanje komponente 1 kromosoma temeljeno na poziciji.....	102
Slika 5.13 Dijagram toka GA	103

Slika 5.14	Križanje komponente 2 kromosoma temeljeno na dvije točke prekida	104
Slika 5.15	Mutacija komponente 1 kromosoma temeljeno na uzajamnoj razmjeni gena.....	105
Slika 5.16	Mutacija komponente 2 kromosoma temeljeno na inverziji gena	105
Slika 5.17	Mutacija komponente 3 kromosoma metodom usporedbe sa susjedima.....	105
Slika 6.1	Grupa proizvoda kućišta turbokompresora	108
Slika 6.2	Prikaz dinamike potražnje za dani program s predviđenim radom u dvije smjene.....	108
Slika 6.3	Koncepti strojne opreme u primjeni steznih elemenata	113
Slika 6.4	Ispis ulaznih parametara za peti period potražnje.....	116
Slika 6.5	Ispis izlaznih parametara za peti period potražnje.....	118
Slika 6.6	Ispis izlaznih parametara za sve periode potražnje.....	120
Slika 6.7	Skalabilni RPS za VRPS u prvom PP.....	121
Slika 6.8	Skalabilni RPS za VRPS u drugom PP	122
Slika 6.9	Skalabilni RPS za VRPS u trećem PP	123
Slika 6.10	Skalabilni RPS za VRPS u četvrtom PP	123
Slika 6.11	Skalabilni RPS za VRPS u petom PP.....	124
Slika 6.12	Skalabilni RPS za VRPS u šestom periodu potražnje.....	124
Slika 6.13	Skalabilni RPS za VRPS u petom PP s jeftinijim CNC visokoproduktivnim OC.....	126
Slika 6.14	Usporedba početnih troškova konfiguracije i cijelog konfiguracijskog perioda	126
Slika 6.15	Usporedba konfiguracija GA: a) Youssef i sur. [82], b) Dou i sur. [113] i Novi GA	129
Slika 6.16	Krivulje konvergencije za minimalni trošak.....	130
Slika 6.17	Usporedba krivulja konvergencije za tri predložena GA.....	131
Slika 6.18	Izgled postojećeg VFPS	132
Slika 6.19	Izgled VRPS dobiven Novim GA	133
Slika 6.20	Usporedba konfiguracija za različite početne troškove.....	134
Slika 6.21	Usporedba konfiguracija za različite stupnjeve iskorištenja η	134

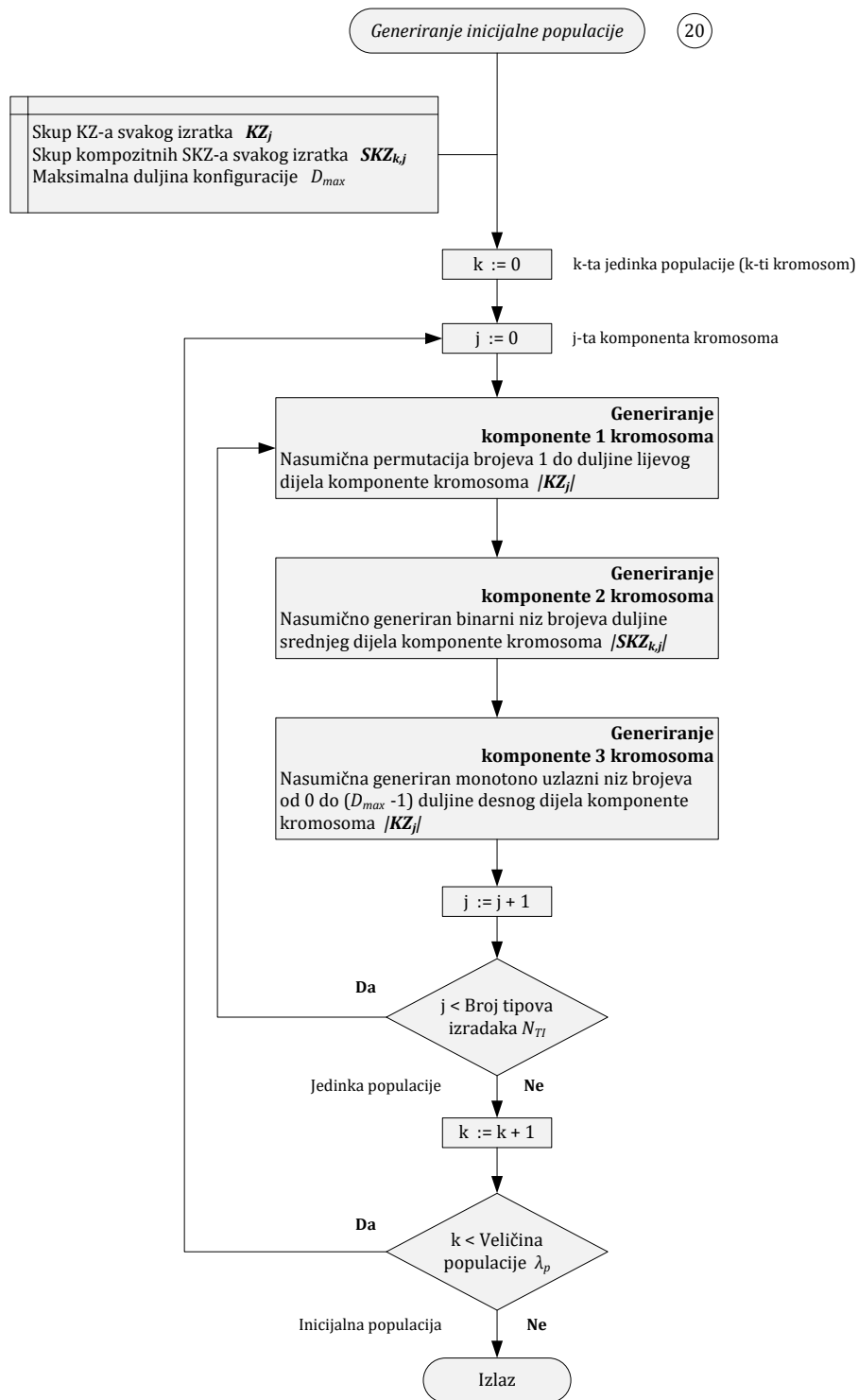
POPIS PRILOGA

PRILOG A

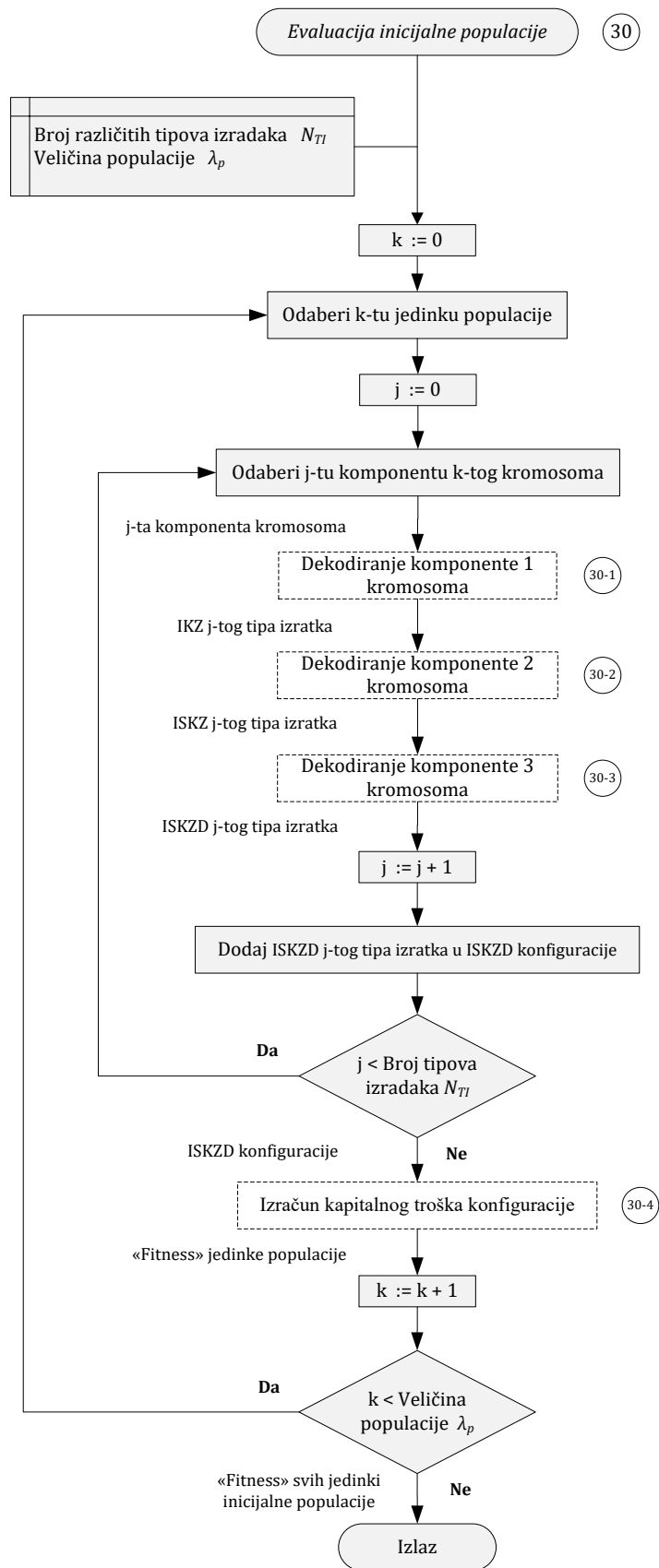
Dijagram toka genetskog algoritma



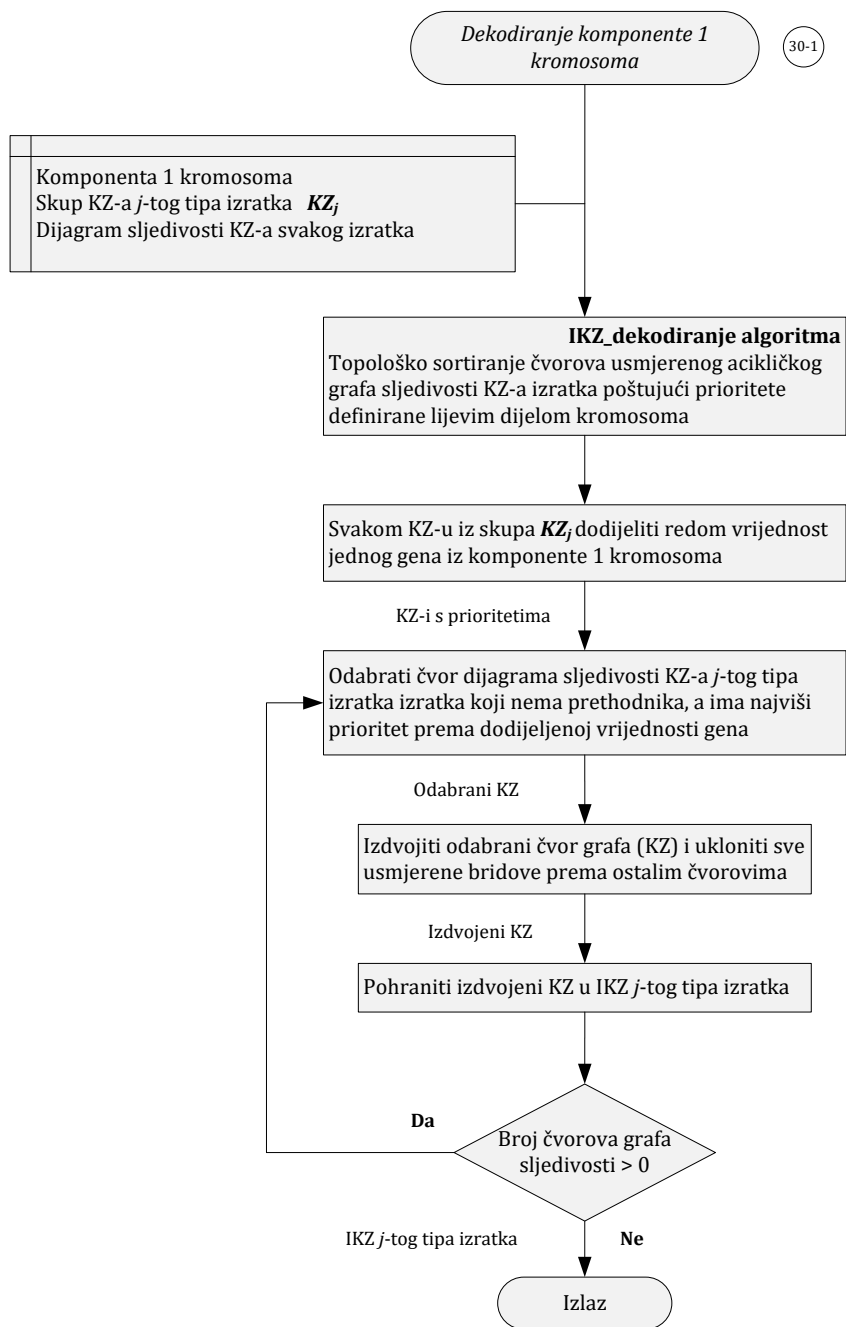
Slika A1: Učitavanje ulaznih podataka i definicija problema



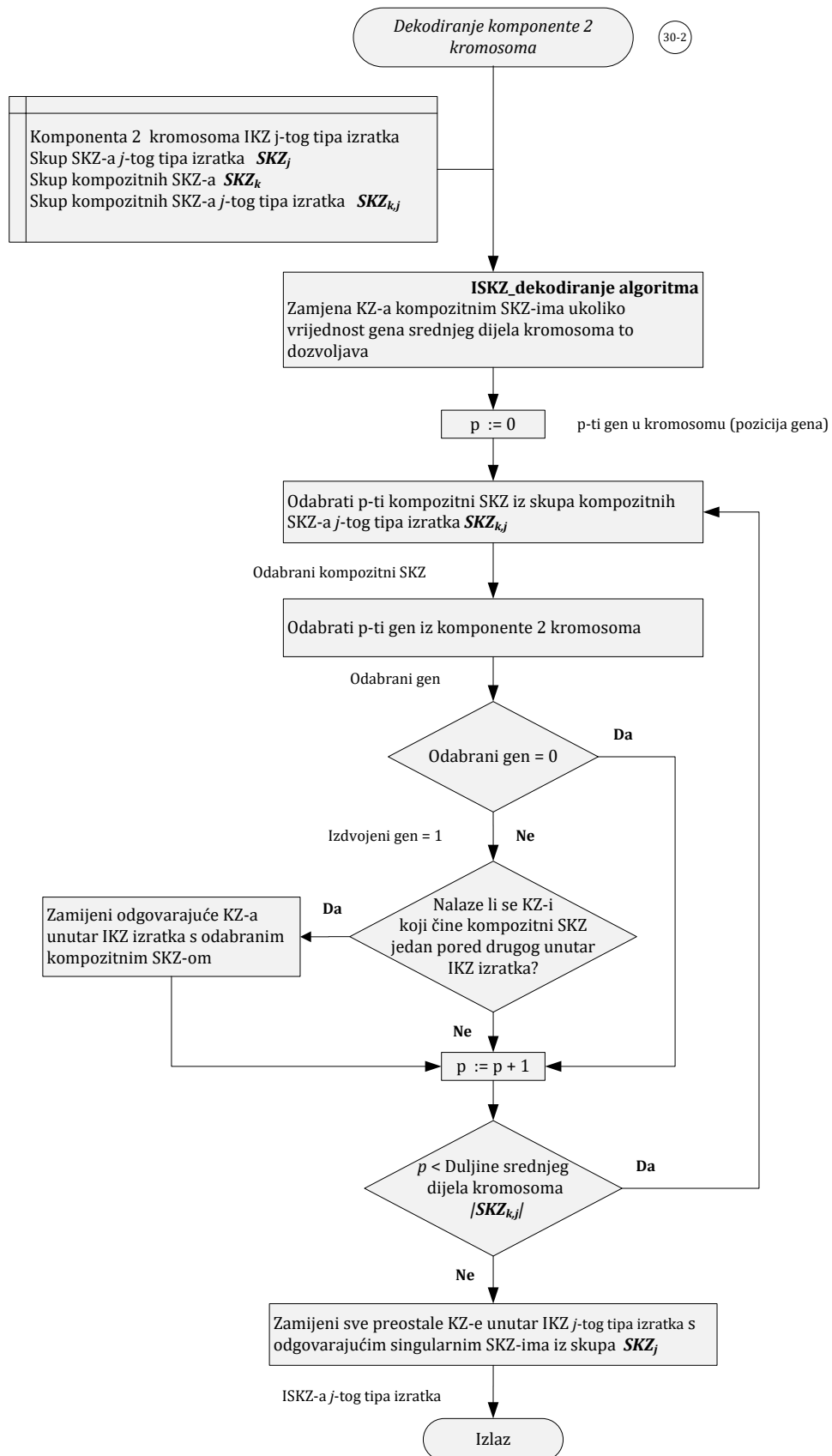
Slika A2: Generiranje inicijalne populacije



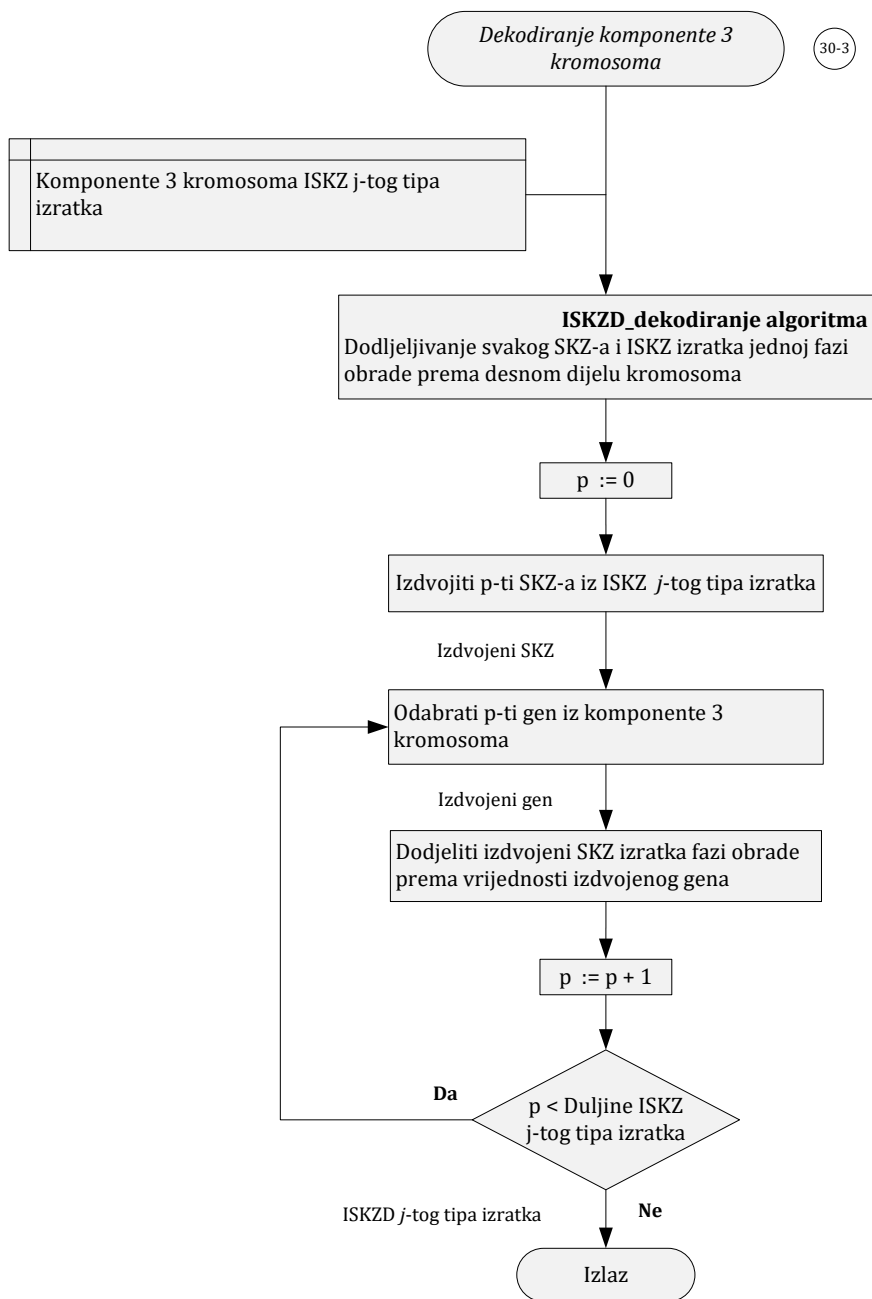
Slika A3: Evaluacija inicijalne populacije



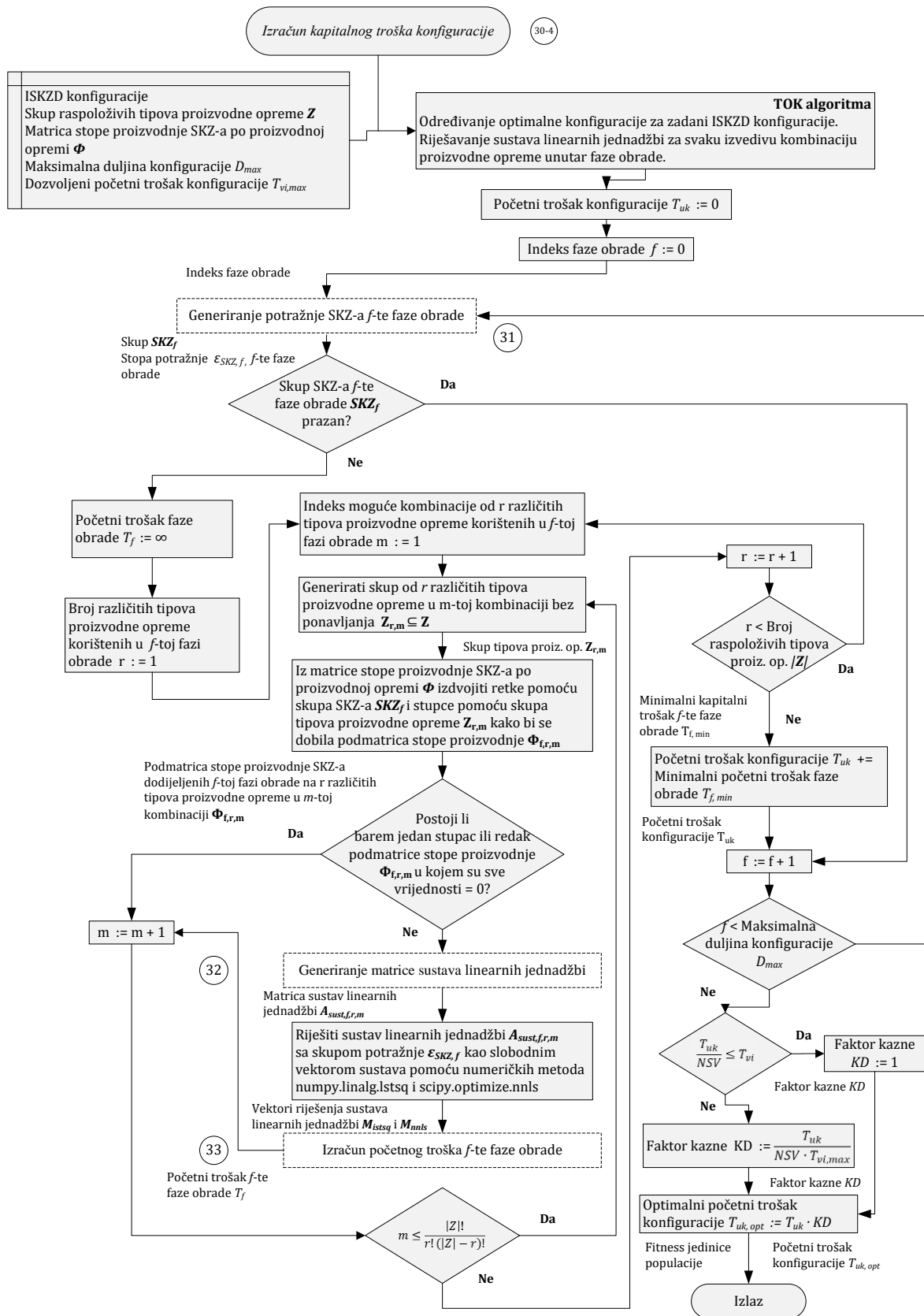
Slika A4: Dekodiranje komponente 1 kromosoma



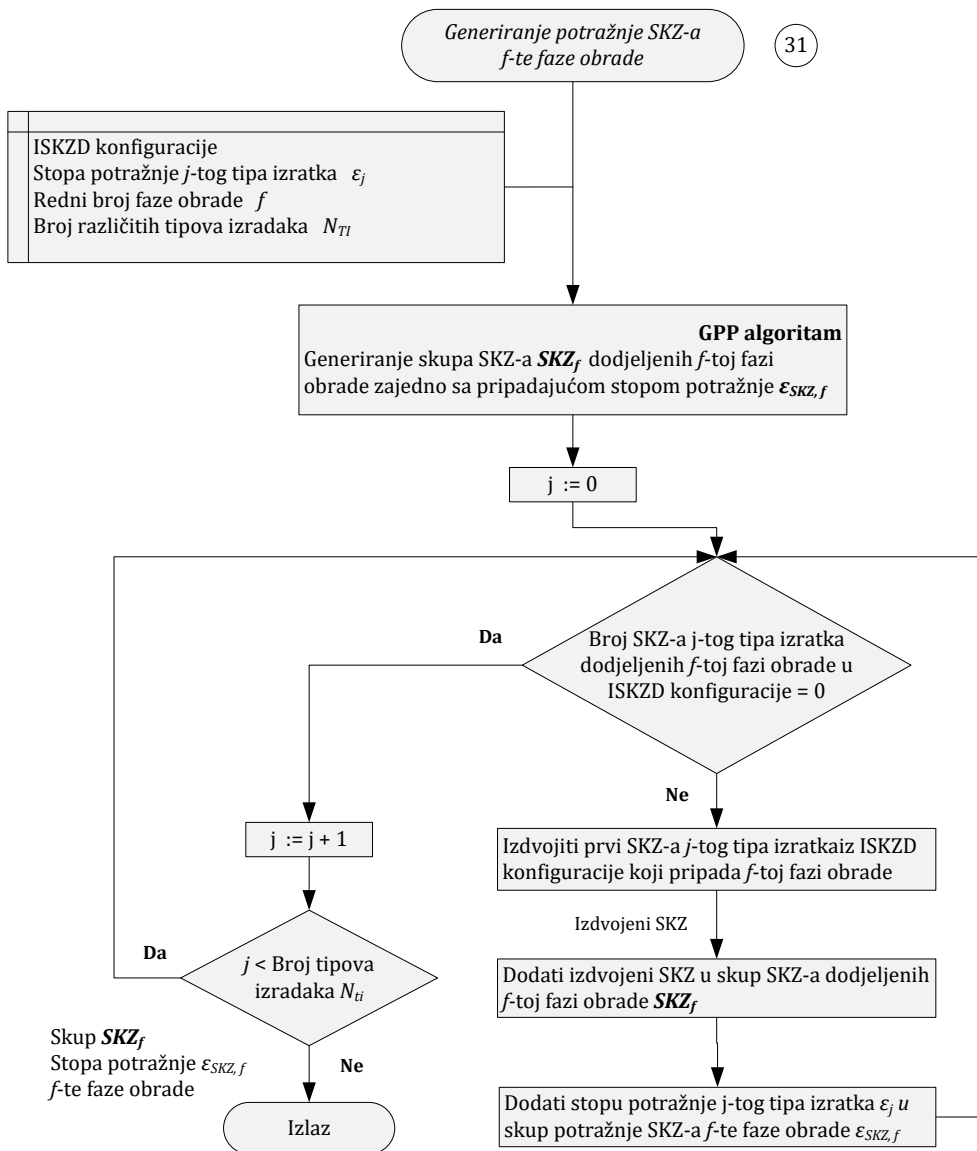
Slika A5: Dekodiranje komponente 2 kromosoma



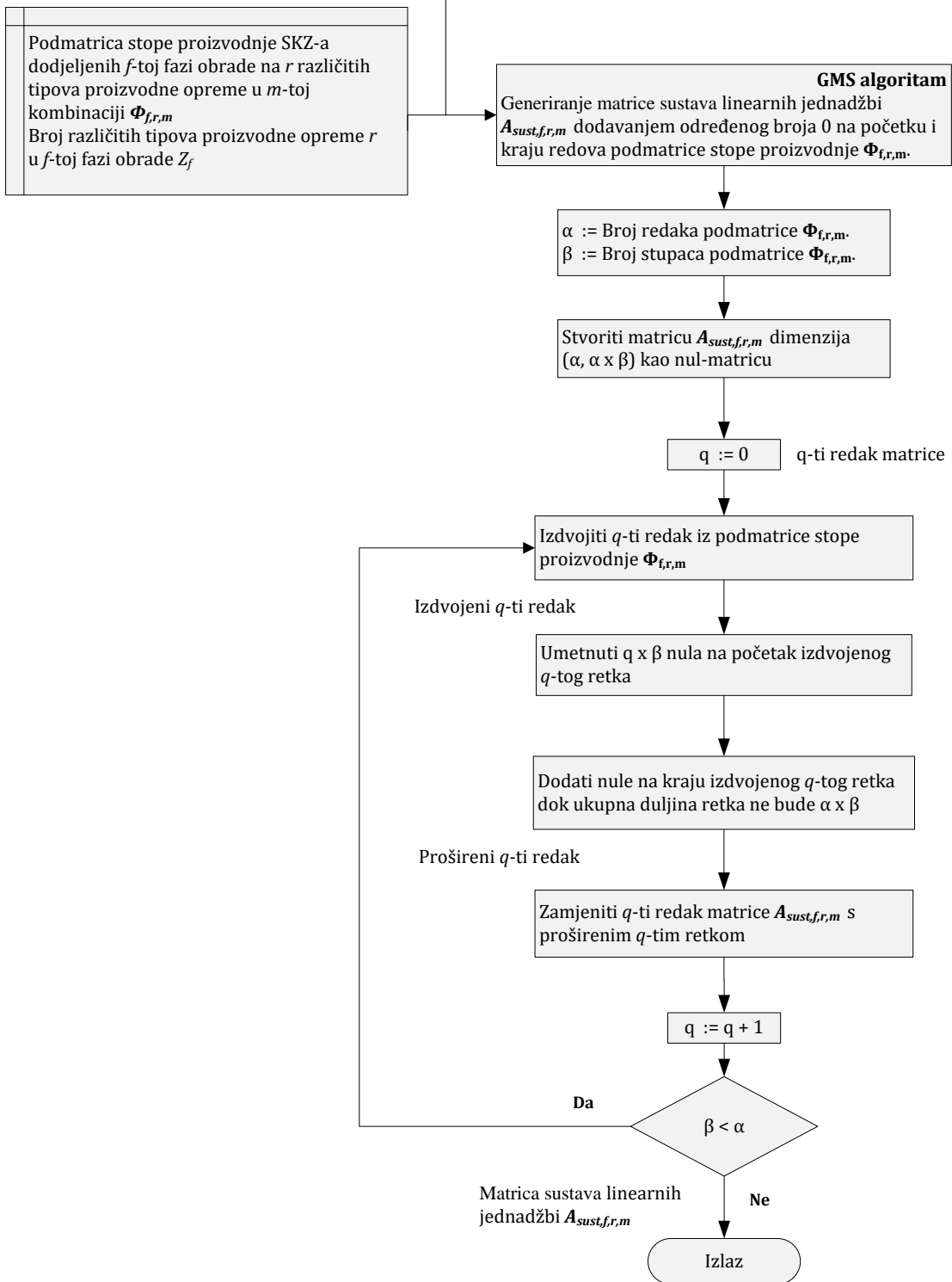
Slika A6: Dekodiranje komponente 3 kromosoma



Slika A7: Evaluacija početnog troška konfiguracije



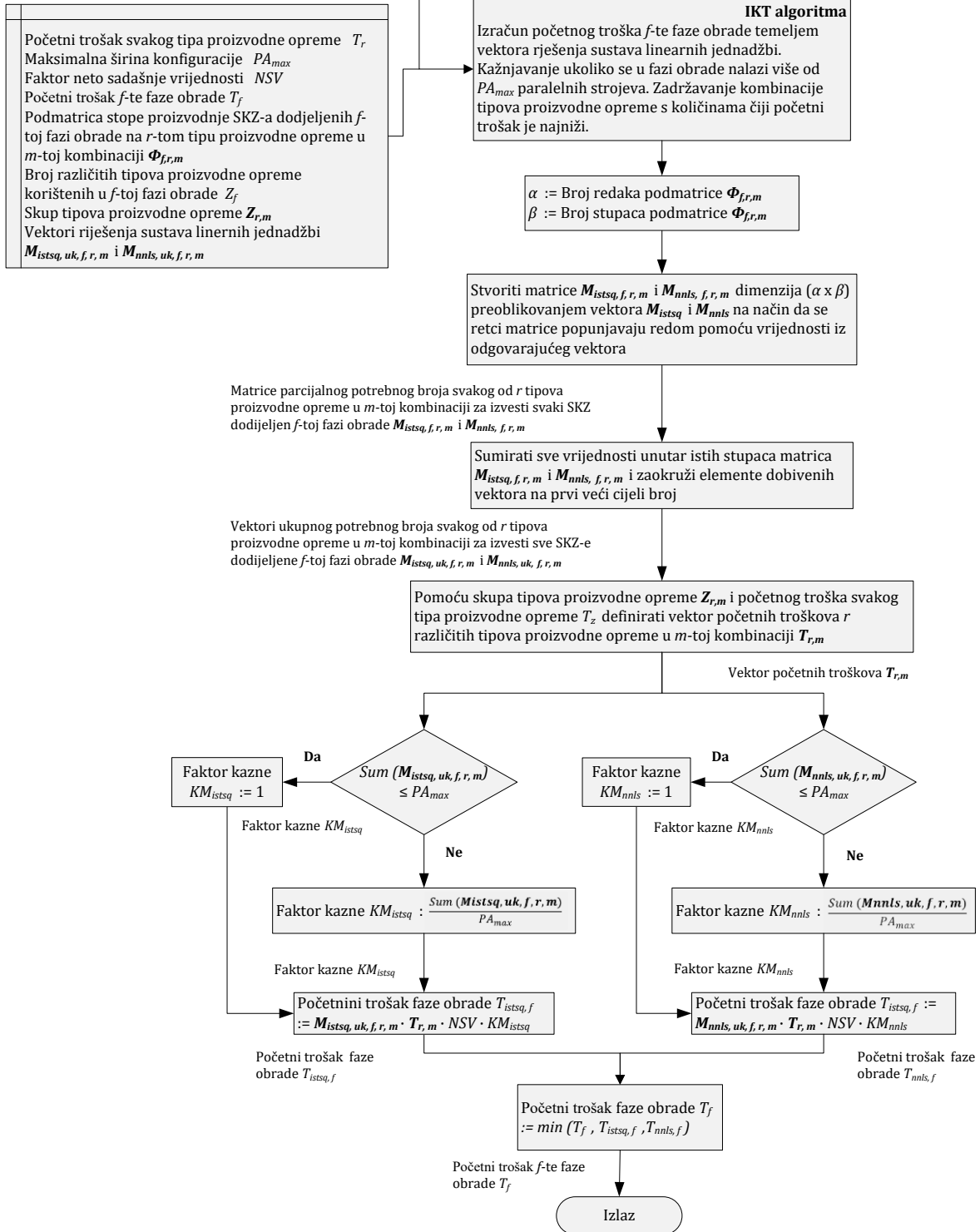
Slika A8: Generiranje potražnje SKZ-a f -te faze obrade



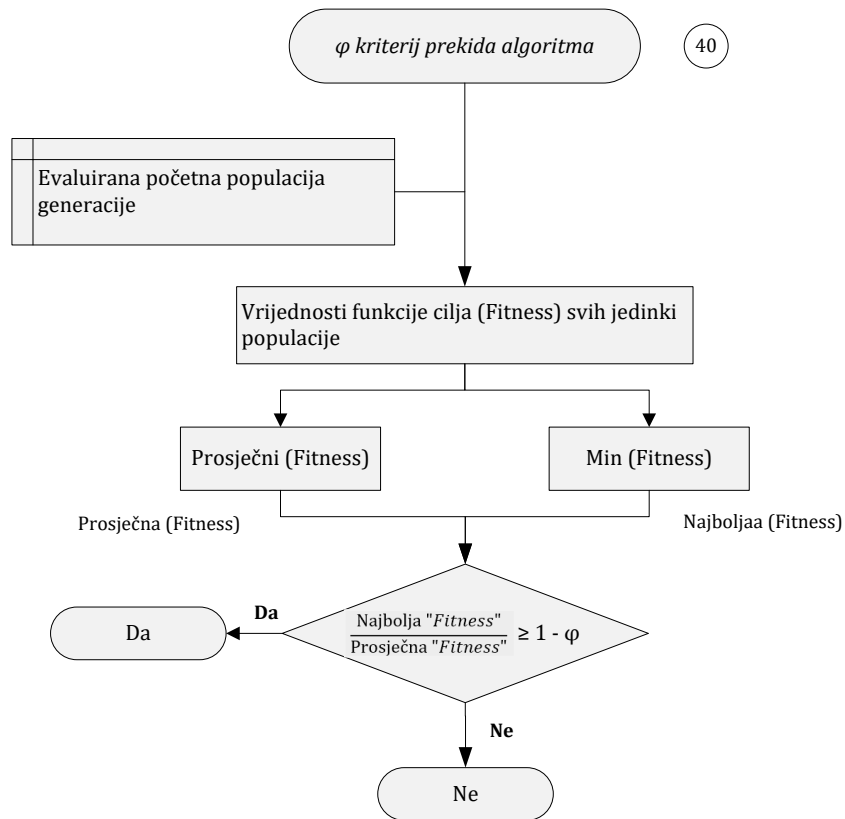
Slika A9: Generiranje matrice sustava linearnih jednadžbi

Izračun početnog troška konfiguracije f -te faze obrade

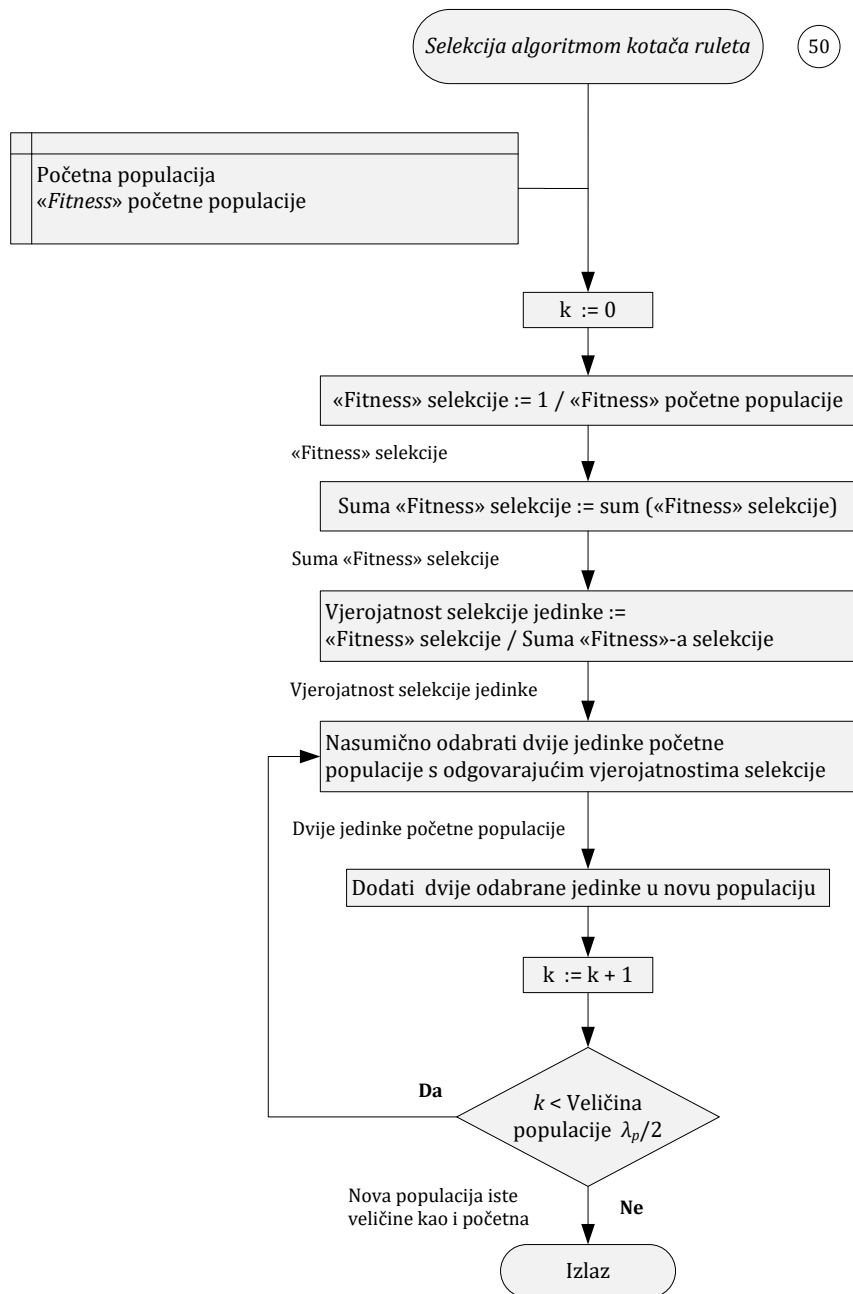
33



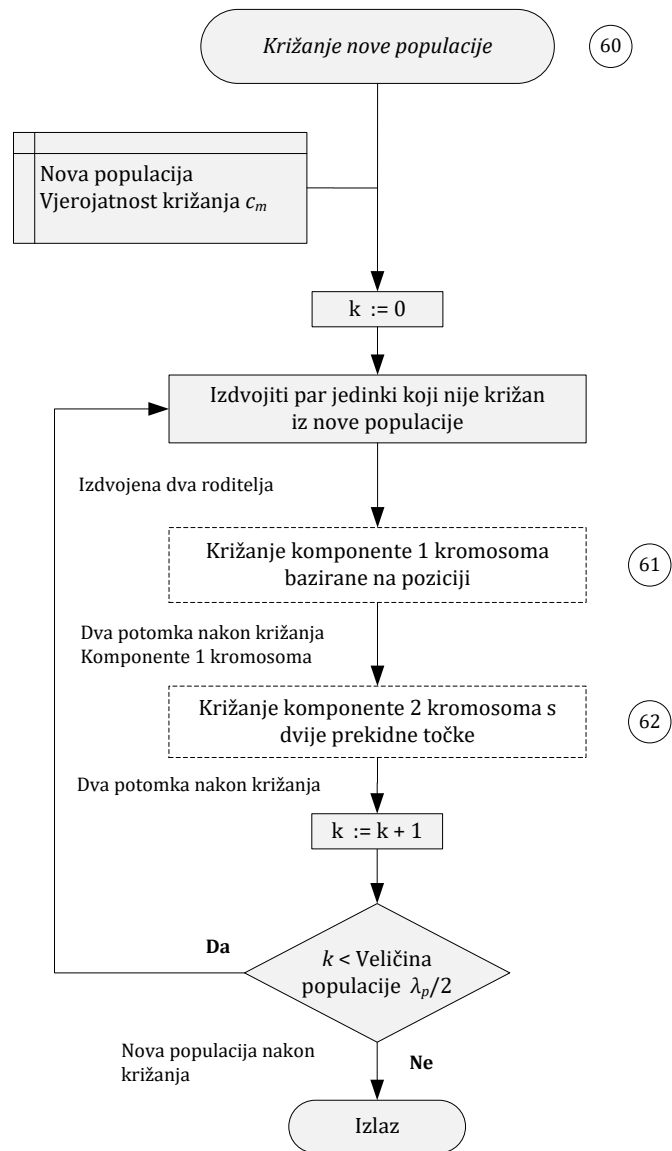
Slika A10: Izračun početnog troška konfiguracije f -te faze obrade



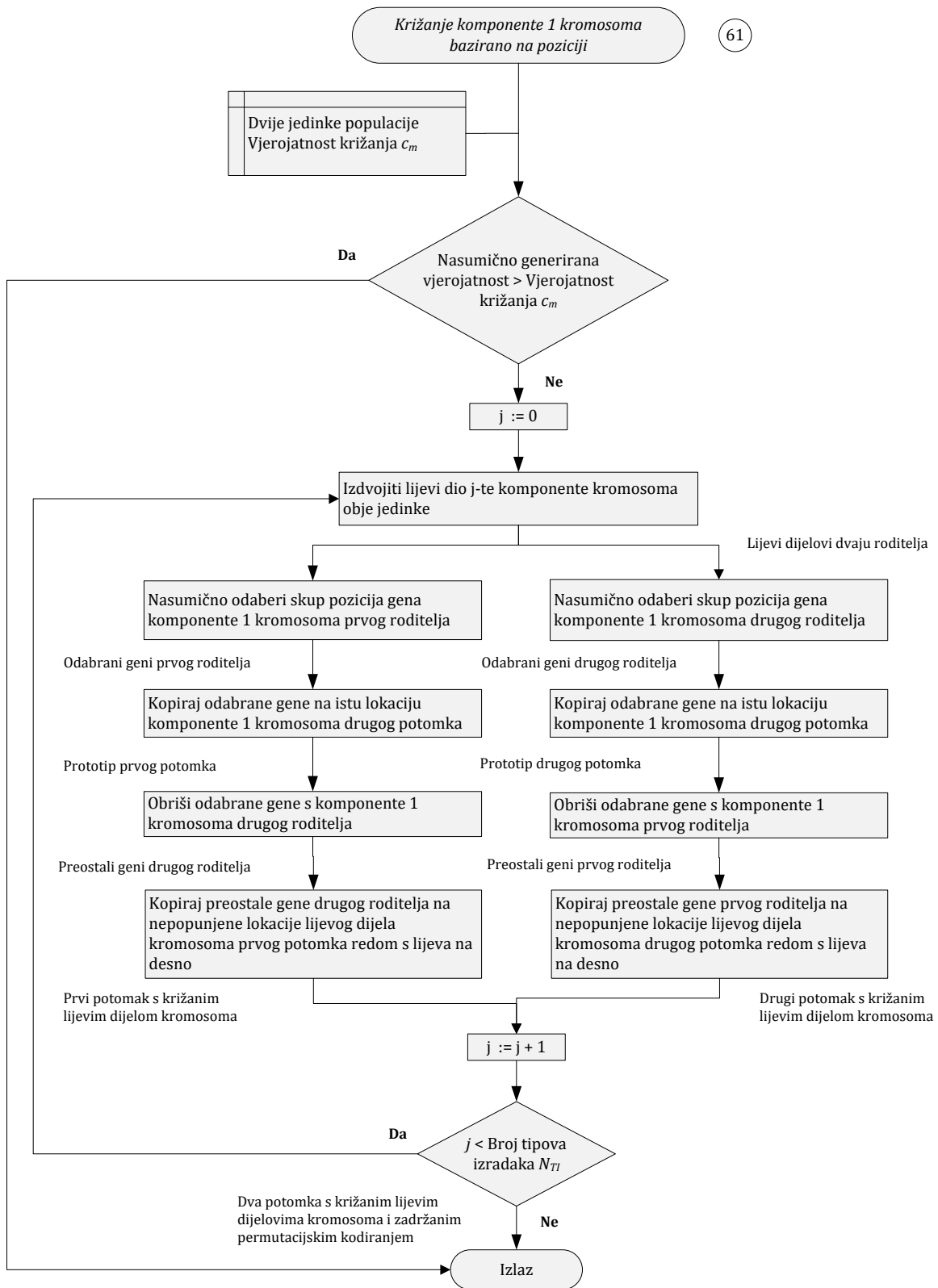
Slika A11: φ kriterij prekida algoritma



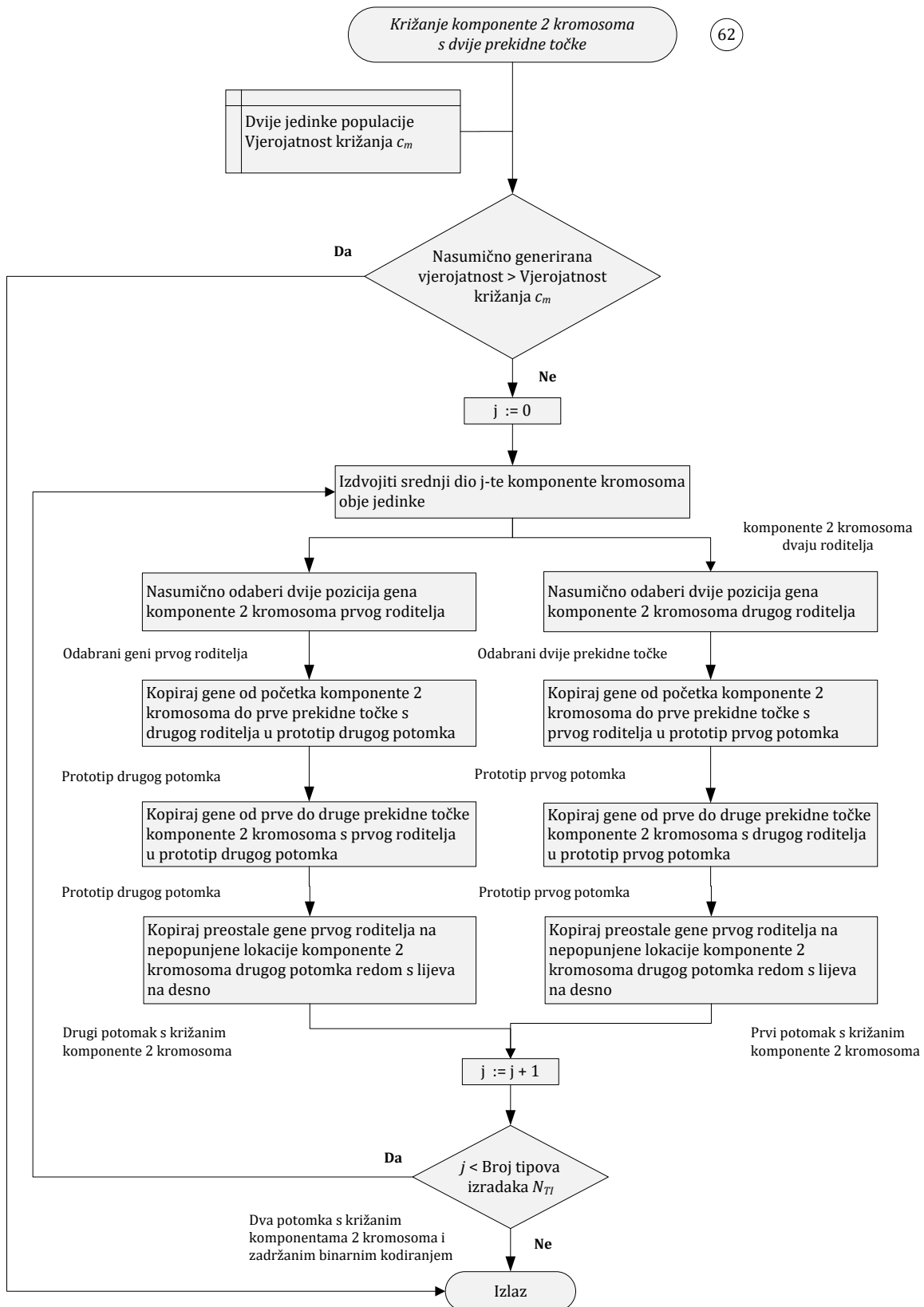
Slika A12: Selekcija algoritmom kotača ruleta



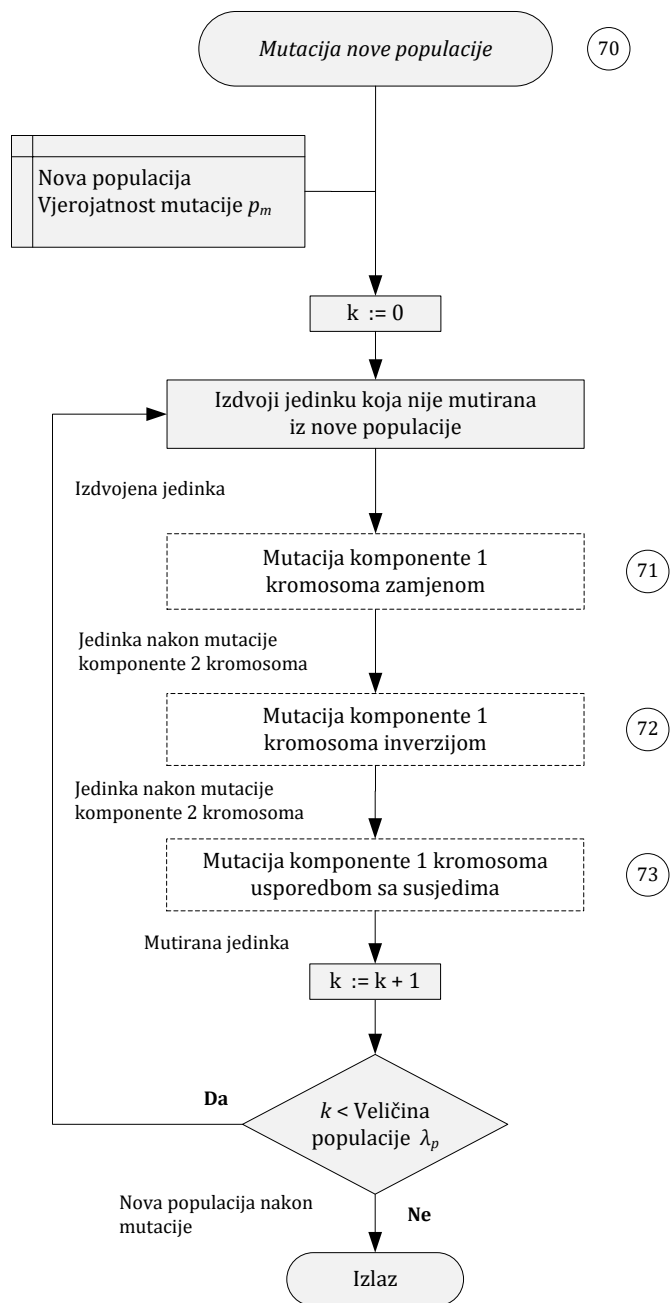
Slika A13: Križanje nove populacije



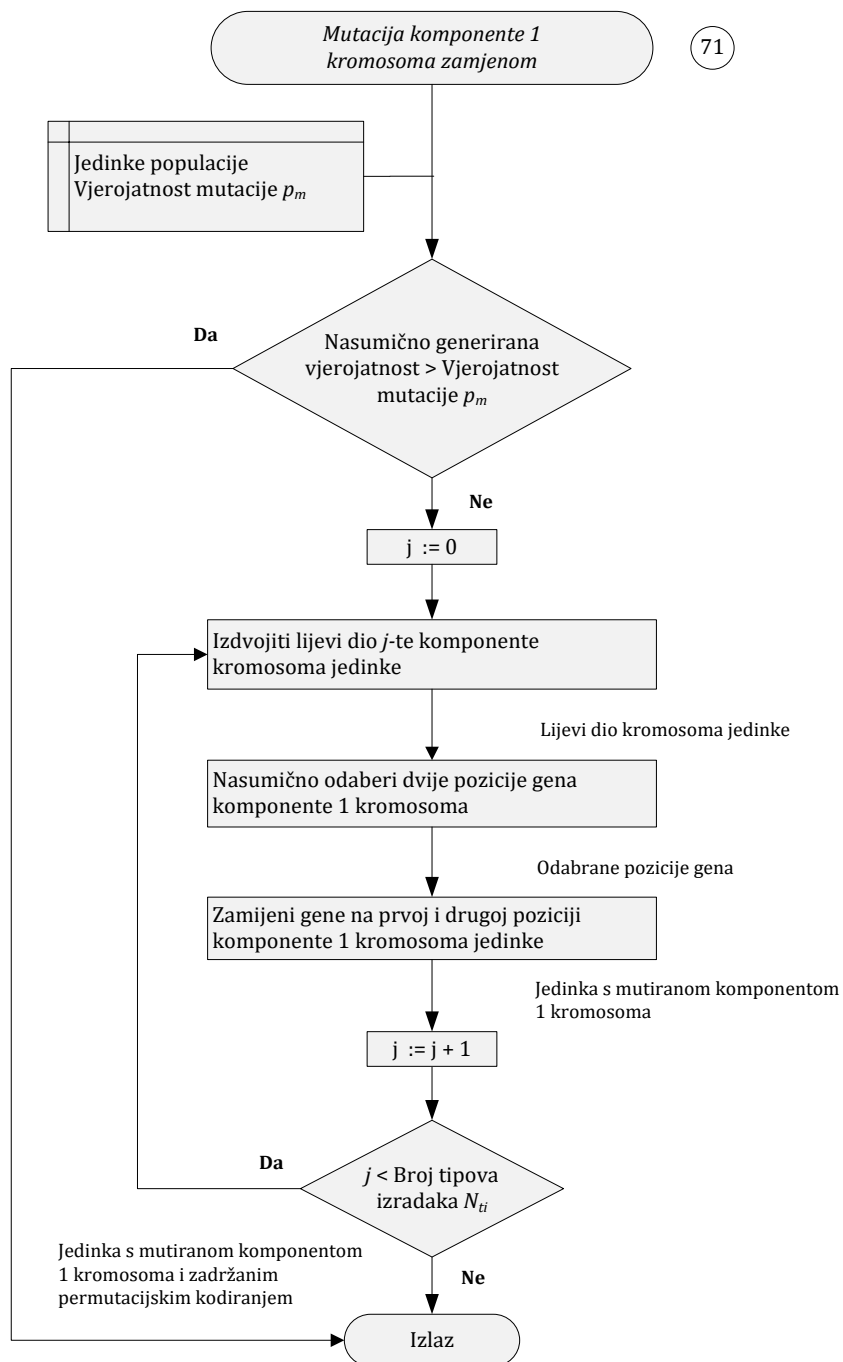
Slika A14: Križanje komponente 1 kromosoma temeljeno na poziciji



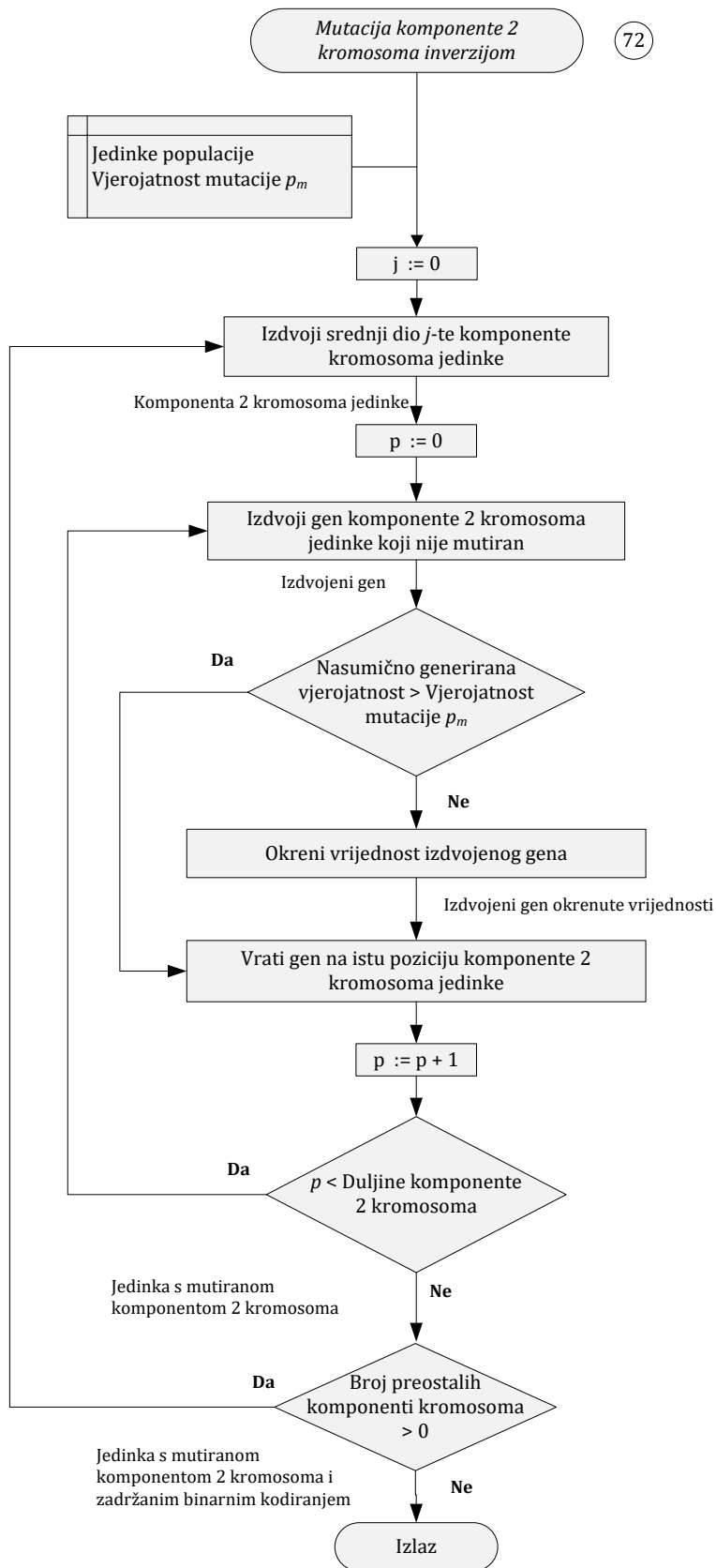
Slika A15: Križanje komponente 2 kromosoma s dvije prekidne točke



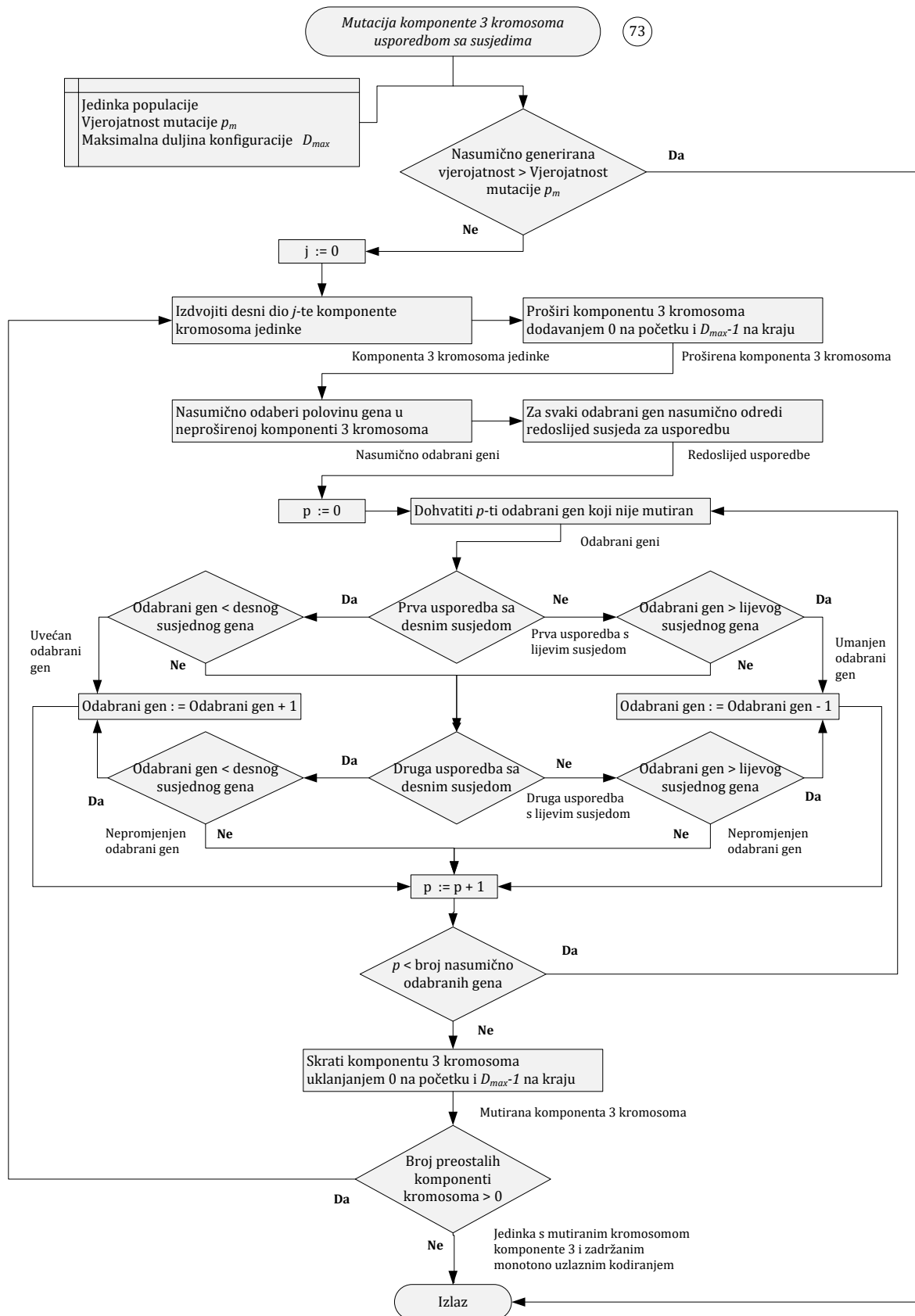
Slika A16: Mutacija nove populacije



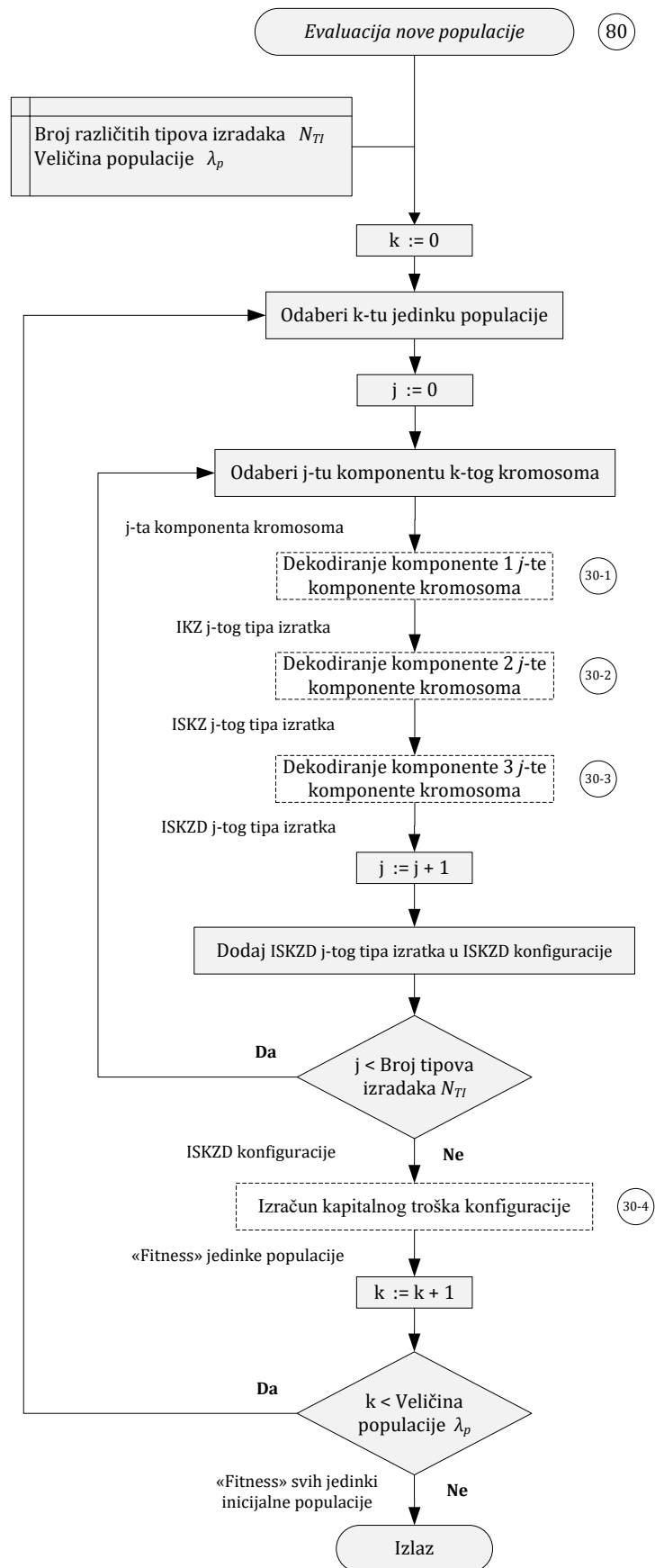
Slika A17: Mutacija komponente 1 kromosoma zamjenom



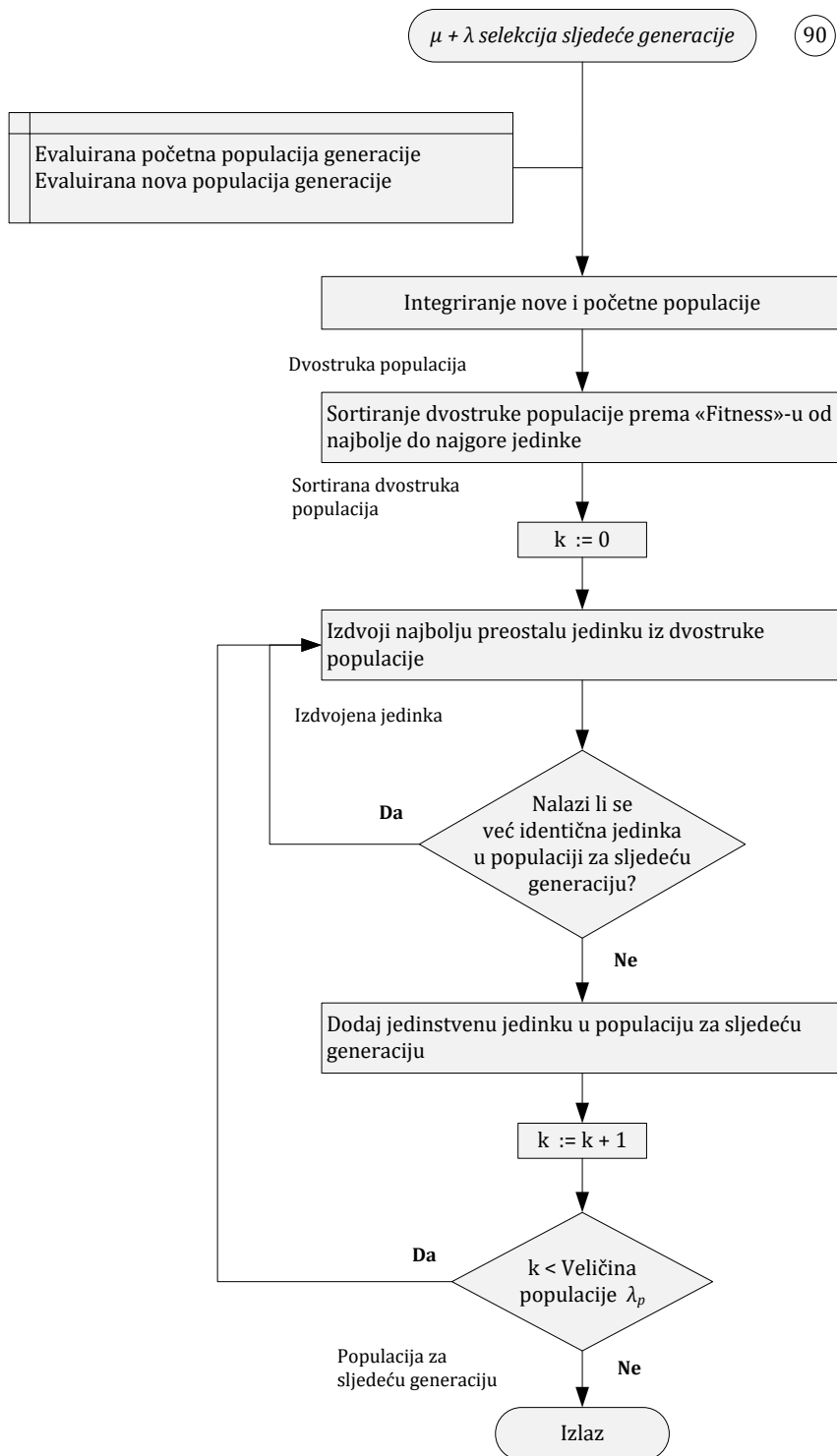
Slika A18: Mutacija komponente 2 kromosoma inverzijom



Slika A19: Mutacija komponente 3 kromosoma usporedbom sa susjedima



Slika A20: Evaluacija nove populacije



Slika A21: $\lambda + \mu$ selekcija sljedeće generacije

PRILOG B

Izgled kromosoma za svaki proizvod

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Broj gena kromosoma izradka			
2031-D	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	30	31	39	43	47	51																				26
736-C	1	4	7	9	13	11	8	10	3	5	2	6	12	1	1	1	0	0	0	0	1	2	2	3	3	5	5	5							32	
355-A	1	6	3	8	12	9	4	5	7	10	2	11	0	0	1	1	0	0	1	1	1	2	2	3	3	3	3	5	5	5						29
129-B	1	4	3	9	7	10	5	2	6	8	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	3	3	4	5	6	6									25	
640-B+	1	7	4	2	5	9	10	6	8	11	3	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	2	2	4	4	5	5								27	

Ukupno gena u kromosomu **139**

Slika B1: Izgled (dužina) kromosoma za sve proizvode

PRILOG C

Tehnološki postupak strojne obrade sa pripadajućim vremenima izrade

2031 - D

Zahvat	Obradna površina	Prethodnik	Alat	Tip alata	Vrijeme obrade (min/kom) 1	Strojevi opcija 1	Vrijeme obrade (min/kom) 2	Strojevi opcija 2	Vrijeme obrade (min/kom) 3	Strojevi opcija 3	Vrijeme obrade (min/kom) 4	Strojevi opcija 4
1	Tokarenje tlačne strane	0	T008	Zvono	0,36	Daewoo Lynx 220 1	0,36	Daewoo Lynx 220 1	0,36	Daewoo Lynx 220 1	0,12	
2	Tokarenje difuzora	1	T007	Motika 1	0,58		0,58		0,58		0,3	
3	Tokarenje konture grubo	2	T010	Motika 2	0,35	Daewoo Lynx 220 2	0,35	Daewoo Lynx 220 2	0,35	Daewoo Lynx 220 2	0,09	
4	Tokarenje konture fino	3	T009	Motika 3	0,48		0,48		0,48		0,09	
5	Ukupno vrijeme tokarenja				1,77		1,77		1,77			
6	Glodanje iza tlačne strane	4	T113	glodalo Ø20	0,16		0,13		0,11		0,13	
7	Glodanje pločice	5	T113	glodalo Ø20	0,07		0,05		0,05		0,05	
8	Glodanje bracket	6	T123	glodalo Ø40	0,21		0,16		0,14		0,16	
9	Bušenje fi 5,2 x 3 provrta	7	T111	svrdlo Ø5,2	0,08		0,06		0,05		0,06	
10	Urezivanje navoja M6 x 3 provrta	8	T121	ureznik M6	0,19		0,16		0,14		0,16	
11	Glodanje tlačne strane	9	T123	glodalo Ø40	0,26		0,21		0,18		0,21	
12	Bušenje i upuštanje fi 5,2 x 2 provrta	10	T112	svrdlo Ø12/Ø5,2	0,08		0,06		0,06		0,06	
13	Urezivanje navoja M6 x 2 provrta	11	T121	ureznik M6	0,19	M. Seiki NHX4000	0,16	Elha FM3+X	0,14	Mikron XT 200	0,16	
14	Bušenje fi 2,55 za pin	12	T141	svrdlo Ø2,55	0,06		0,05		0,04		0,05	
15	Bušenje fi 4,2 x 5 provrta	13	T151	svrdlo Ø4,2	0,14		0,11		0,10		0,11	
16	Urezivanje navoja M5 x 5 provrta	14	T153	ureznik M5	0,24		0,19		0,17		0,19	
17	Bušenje fi 6 x 2 provrta	15	T131	svrdlo Ø6	0,21		0,17		0,15		0,17	
18	Razvrstavanje fi 7,2 x 2	16	T207	Razvrstač Ø7,2	0,27		0,22		0,19		0,22	
	Ukupno ostalo vrijeme				2,16		1,73		1,51		2,33	
	Ukupno vrijeme obrade				3,93		3,50		3,28		2,33	

736 - C

Zahvat	Obradna površina	Prethodnik	Alat	Tip alata	Vrijeme obrade (min/kom) 1	Strojevi opcija 1	Vrijeme obrade (min/kom) 2	Strojevi opcija 2	Vrijeme obrade (min/kom) 3	Strojevi opcija 3	Vrijeme obrade (min/kom) 4	Strojevi opcija 4
1	Tokarenje difuzora	0	T007	Motika 1	0,49	Daewoo Lynx 220 2	0,49	Daewoo Lynx 220 2	0,49	Daewoo Lynx 220 2	0,3	
2	Tokarenje konture grubo	1	T010	Motika 2	0,32		0,32		0,32		0,09	
3	Tokarenje konture fino	2	T009	Motika 3	0,41		0,41		0,41		0,09	
4	Ukupno vrijeme tokarenja				1,22		1,22		1,22			
5	Glodanje tlačne strane-unutarnji dio	3	T123	glodalo Ø40	0,21		0,15		0,12		0,15	
6	Glodanje tlačne strane-vanjski dio	4	T113	glodalo Ø20	0,10		0,06		0,04		0,06	
7	Bušenje fi 5,2 x 2 provrta	5	T111	svrdlo Ø5,2	0,08		0,03		0,03		0,03	
8	Urezivanje navoja M6 x 2 provrta	6	T121	ureznik M6	0,10		0,07		0,05		0,07	
9	Glodanje vanjskog dijela	7	T111	glodalo Ø40	0,11		0,09		0,07		0,09	
10	Glodanje usisne strane-vanjski dio	8	T117	glodalo Ø24	0,36		0,27		0,20		0,27	
11	Glodanje usisne strane-unutarnji dio	9	T151	zvono Ø52	0,19		0,13		0,11		0,13	
12	Bušenje izdanka fi 5,2 x 2 provrta	10	T111	svrdlo Ø5,2	0,08		0,04		0,03		0,04	
13	Urezivanje navoja M6 x 2 provrta	11	T121	ureznik M6	0,10	M. Seiki NHX4000	0,07	Elha FM3+X	0,05	Mikron XT 200	0,07	
14	Glodanje flange	12	T123	glodalo Ø40	0,11		0,07		0,06		0,07	
15	Glodanje makera na flangi	13	T117	glodalo Ø24	0,15		0,11		0,09		0,11	
16	Bušenje fi 5,2 x 2 provrta	14	T111	svrdlo Ø5,2	0,08		0,04		0,03		0,04	
17	Urezivanje navoja M6 x 2 provrta	15	T121	ureznik M6	0,10		0,09		0,07		0,09	
18	Poravnavanje i bušenje fi 5,2 x 3 provrta	16	T112	svrdlo Ø12/Ø5,2	0,12		0,10		0,09		0,10	
19	Urezivanje navoja M6 x 3 provrt	17	T121	ureznik M6	0,26		0,24		0,22		0,24	
20	Bušenje fi 2,55 za pin	18	T141	svrdlo Ø2,55	0,08		0,03		0,03		0,03	
21	Bušenje fi 4,2 x 5 provrta	19	T151	svrdlo Ø4,2	0,14		0,11		0,09		0,11	
22	Urezivanje navoja M5 x 5 provrta	20	T153	ureznik M5	0,31		0,24		0,20		0,24	
	Ukupno ostalo vrijeme				2,73		1,91		1,55		2,39	
	Ukupno vrijeme obrade				3,95		3,13		2,77		2,39	

355 - A

Zahvat	Opis	Obradna površina	Prethodnik	Alat	Tip alata	Vrijeme obrade (min/kom) 1	Strojevi opcija 1	Vrijeme obrade (min/kom) 2	Strojevi opcija 2	Vrijeme obrade (min/kom) 3	Strojevi opcija 3	Vrijeme obrade (min/kom) 4	Strojevi opcija 4
1	Tokarenje usisne strane	Usisna strana	0	T008	Zvono	0,31	Daewoo Lynx 220 1	0,31	Daewoo Lynx 220 1	0,31	Daewoo Lynx 220 1	0,13	
2	Tokarenje difuzora	Tlačna strana	1	T007	Motka 1	0,67		0,67		0,67		0,32	
3	Tokarenje konture grubo	Tlačna strana	2	T010	Motka 2	0,49	Daewoo Lynx 220 2	0,49	Daewoo Lynx 220 2	0,49	Daewoo Lynx 220 2	0,11	
4	Tokarenje konture fino	Tlačna strana	3	T009	Motka 3	0,59		0,59		0,59		0,16	
	Ukupno vrijeme tokarenja					2,06		2,06		2,06			
5	Glodanje tlačne strane-unutarnji dio	Tlačna strana	4	T002	zvono	0,25		0,19		0,15		0,19	
6	Glodanje tlačne strane-vanjski dio	Tlačna strana	5	T117	glodalo Ø20	0,17		0,13		0,10		0,13	
7	Poravnavanje pločica za natpis	Tlačna strana 2	6	T117	glodalo Ø20	0,07		0,05		0,04		0,05	
8	Poravnavanje i bušenje fi 5,2 x 2 provrta	Tlačna strana 2	7	T112	svrdlo Ø12/Ø5,2	0,08		0,06		0,05		0,06	
9	Urezivanje navoja M6 x 2 provrta	Tlačna strana 2	8	T121	ureznik M6	0,10		0,08		0,06		0,08	
10	Glodanje flange	Usisna strana	9	T123	glodalo Ø40	0,13		0,10		0,08		0,10	
11	Glodanje boleva flange	Tijelo kućišta	10	T117	glodalo Ø24	0,11		0,08		0,07		0,08	
12	Bušenje fi 5,2 x 2 provrta	Tijelo kućišta	11	T111	svrdlo Ø5,2	0,08	M. Selki NHR4000	0,06		0,05		0,06	
13	Urezivanje navoja M6 x 2 provrta	Tijelo kućišta	12	T121	ureznik M6	0,10		0,08		0,06		0,08	
14	Razvrtavanje fi 12 - 2 prolaza	Izdanak	13	T161	razvrtac Ø12,8	0,22		0,17		0,13		0,17	
15	Bušenje fi 5,2 x 2 provrta	Izdanak	14	T111	svrdlo Ø5,2	0,08		0,06		0,05		0,06	
16	Urezivanje navoja M6 x 2 provrta	Izdanak	15	T121	ureznik M6	0,10		0,08		0,06		0,08	
17	Bušenje fi 4,2 x 4 provrta	Difuzor	16	T151	svrdlo Ø4,2	0,12		0,09		0,07		0,09	
18	Urezivanje navoja M5 x 4 provrta	Difuzor	17	T153	ureznik M5	0,26		0,20		0,16		0,20	
	Ukupno ostalo vrijeme					1,87		1,41		1,12		2,13	
	Ukupno vrijeme obrade					3,93		3,47		3,18		2,13	

0129 - B

Zahvat	Opis	Obradna površina	Prethodnik	Alat	Tip alata	Vrijeme obrade (min/kom) 1	Strojevi opcija 1	Vrijeme obrade (min/kom) 2	Strojevi opcija 2	Vrijeme obrade (min/kom) 3	Strojevi opcija 3	Vrijeme obrade (min/kom) 4	Strojevi opcija 4
1	Tokarenje difuzora	Tlačna strana	0	T007	Motka 1	0,70		0,70		0,70		0,32	
2	Tokarenje konture grubo	Tlačna strana	1	T010	Motka 2	0,66	Daewoo Lynx 220 2	0,66	Daewoo Lynx 220 2	0,66	Daewoo Lynx 220 2	0,11	
3	Tokarenje konture fino	Tlačna strana	2	T009	Motka 3	0,84		0,84		0,84		0,16	
	Ukupno vrijeme tokarenja					2,20		2,20		2,20			
4	Tokarenje usisne strane	Usisna strana	3	T005	Zvono	0,32		0,27		0,22		0,27	
5	Glodanje tlačne strane-unutarnji dio	Tlačna strana	4	T113	glodalo Ø20	0,46		0,39		0,32		0,39	
6	Glodanje tlačne strane-vanjski dio	Tlačna strana	5	T137	glodalo Ø65	0,64		0,54		0,45		0,54	
7	Bušenje fi 5,2 x 2 provrta	Tlačna strana	6	T111	svrdlo Ø5,2	0,08		0,07		0,06		0,07	
8	Urezivanje navoja M6 x 2 provrta	Tlačna strana	7	T121	ureznik M6	0,10		0,09		0,07		0,09	
9	Glodanje EG Ra-grubo	Usisna strana	8	T377	Zvono 2 Ø30	0,56		0,48		0,39		0,48	
10	Glodanje EG Ra-fino	Usisna strana	9	T378	Zvono 3 Ø29	0,47		0,40		0,33		0,40	
11	Glodanje flange	Usisna strana	10	T123	glodalo Ø40	0,14	M. Selki NHR4000	0,12		0,10		0,12	
12	Bušenje fi 5,2 x 3 provrta	Tijelo kućišta	11	T111	svrdlo Ø5,2	0,12		0,10		0,08		0,10	
13	Urezivanje navoja M6 x 3 provrta	Tijelo kućišta	12	T121	ureznik M6	0,16		0,14		0,11		0,14	
14	Glodanje površine za natpis	Izdanak	13	T113	glodalo Ø20	0,08		0,07		0,06		0,07	
15	Poravnavanje i bušenje fi 5,2 x 1 provrta	Izdanak	14	T112	svrdlo Ø12/Ø5,2	0,07		0,06		0,05		0,06	
16	Urezivanje navoja M6 x 1 provrt	Izdanak	15	T121	ureznik M6	0,05		0,04		0,04		0,04	
17	Bušenje fi 4,2 x 4 provrta	Difuzor	16	T151	svrdlo Ø4,2	0,14		0,12		0,10		0,12	
18	Urezivanje navoja M5 x 4 provrta	Difuzor	17	T153	ureznik M5	0,31		0,26		0,22		0,26	
	Ukupno ostalo vrijeme					3,70		3,15		2,59		3,74	
	Ukupno vrijeme obrade					5,90		5,35		4,79		3,74	

640 - B+

Zahvat	Opis	Prethodnik	Alat	Tip alata	Vrijeme obrade (min/kom) 1	Strojovi opcija 1	Vrijeme obrade (min/kom) 2	Strojovi opcija 2	Vrijeme obrade (min/kom) 3	Strojovi opcija 3	Vrijeme obrade (min/kom) 4	Strojovi opcija 4
1	Tokarenje usisne strane	0	T008	Zvono	0,32	Daewoo Lynx 220 1	0,32	Daewoo Lynx 220 1	0,32	Daewoo Lynx 220 1	0,27	
2	Tokarenje difuzora	1	T007	Motka 1	0,61		0,61		0,61		0,52	
3	Tokarenje konture grubo	2	T010	Motka 2	0,52	Daewoo Lynx 220 2	0,52	Daewoo Lynx 220 2	0,52	Daewoo Lynx 220 2	0,44	
4	Tokarenje konture fino	3	T009	Motka 3	0,68		0,68		0,68		0,58	
	Ukupno vrijeme tokarenja				2,13		2,13		2,13			
5	Glodanje tlače strane-vanjski dio	4	T003	zvono	0,38		0,32		0,27		0,32	
6	Glodanje kolizije na tlačnoj strani	5	T119	glodalo Ø12	0,29		0,25		0,20		0,25	
7	Ponavljajući bušenje fi 5,2 x 1 provrta	6	T112	svrdlo Ø12/Ø5,2	0,07		0,03		0,05		0,06	
8	Urezivanje navoja M6 x 1 provrt	7	T121	ureznik M6	0,09		0,07		0,06		0,08	
9	Glodanje površine za natpis	8	T113	glodalo Ø20	0,08		0,04		0,06		0,07	
10	Glodanje površina na strani difuzora	9	T117	glodalo Ø24	0,34	M. Seiki NRX4000	0,29	Elha FM3+X	0,24	Mikron XT 200	0,29	
11	Bušenje fi 3,2 x 3 provrta	10	T111	svrdlo Ø5,2	0,12		0,04		0,08		0,10	
12	Urezivanje navoja M6 x 3 provrta	11	T121	ureznik M6	0,16		0,09		0,11		0,14	
13	Bušenje fi 4,2 x 7 provrta	12	T151	svrdlo Ø4,2	0,26		0,19		0,14		0,19	
14	Urezivanje navoja M5 x 7 provrta	13	T153	ureznik M5	0,55		0,45		0,37		0,45	
15	Bušenje fi 2,55 za pin	14	T141	svrdlo Ø2,55	0,08		0,03		0,06		0,07	
	Ukupno ostalo vrijeme				2,42		1,80		1,64		3,82	
	Ukupno vrijeme obrade				4,55		3,93		3,77		3,82	

PRILOG D

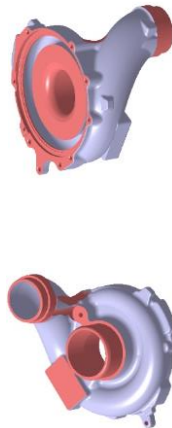
Poveznice značajki, Z, KZ i SKZ

Plan obrade za izradak 2031



Značajka	Opis značajke	Orijentacija obratka	Zahvat	Oznaka zahvata	Smjer obrade	Oznaka alata	Tip alata	Ukupno značajki
Zn1	Obrada tlačne strane	Tlačna strana	Tokarenje	Z1	-z	T008	Zvono	1
Zn2	Obrada difuzora	Usisna strana	Tokarenje	Z2	-z	T007	Motka 1	1
Zn3	Obrada konture	Usisna strana	Tokarenje grubo	Z3	-z	T010	Motka 2	1
Zn4	Obrada usisne strane	Usisna strana	Tokarenje fino	Z4	-z	T009	Motka 3	1
Zn5	Obrada provrta na usisu	Usisna strana	Glodanje	Z5	+x	T123	Glodalo Ø40	2
Zn6	Obrada iza usisne strane	Tlačna strana	Bušenje	Z6	-z	T131	Svrđlo Ø6	2
Zn7	Obrada iza usisne strane	Tlačna strana	Razvrtavanje	Z7	-y	T207	Razvrtac Ø7,2	2
Zn8	Obrada provrta na pločici	Tlačna strana	Glodanje	Z8	-z	T113	Glodalo Ø20	1
Zn9	Obrada pločice	Tlačna strana	Glodanje	Z9	-x, +y	T123	Glodalo Ø40	3
Zn10	Obrada provrta na pločici	Tlačna strana	Urežavanje navoja	Z10	-z	T111	Svrđlo Ø5,2	1
Zn11	Obrada markera i nastavka	Tlačna strana	Glodanje	Z11	-x, +y	T121	Ureznik M6	1
Zn12	Obrada izdanka	Tlačna strana	Urežavanje navoja	Z12	-z	T112	Svrđlo Ø12/Ø5,2	2
Zn13	Obrada provrta za pin	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z13	-z	T121	Ureznik M6	1
Zn14	Obrada provrta za pin	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z14	-z	T141	Svrđlo Ø2,55	1
Zn15	Obrada montažnih provrta	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z15	-z	T151	Svrđlo Ø4,2	5
Zn16	Obrada montažnih provrta	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z16	-z	T151	Svrđlo Ø4,2	5
Zn17	Obrada montažnih provrta	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z17	-z	T153	Ureznik M5	1

Plan obrade za izradak 640



Značajka	Opis značajke	Orijentacija obratka	Zahvat	Oznaka zahvata	Smjer obrade	Oznaka alata	Tip alata	Ukupno značajki
Zn12	Obrada tlačne strane	Tlačna strana	Tokarenje	Z12	-z	T004	Zvono	1
Zn24	Obrada difuzora	Usisna strana	Tokarenje	Z24	-z	T007	Motka 1	1
Zn34	Obrada konture	Usisna strana	Tokarenje grubo	Z34	-z	T010	Motka 2	1
Zn31	Obrada tlačne strane A1	Usisna strana	Tokarenje fino	Z44	-z	T009	Motka 3	1
Zn32	Obrada kolizije A1	Tlačna strana	Tokarenje	Z50	-z	T003	Zvono	1
Zn19	Obrada markera	Tlačna strana	Glodanje	Z51	+x, +y	T119	Glodalo Ø12	1
Zn20	Obrada izdanka 1	Tlačna strana	Glodanje	Z12	-z	T113	Glodalo Ø20	1
Zn33	Obrada montažne površine	Tlačna strana	Urežavanje navoja	Z31	-z	T112	Svrđlo Ø12/Ø5,2	1
Zn81	Obrada provrta za pločicu	Tlačna strana	Urežavanje navoja	Z32	-z	T121	Ureznik M6	1
Zn11	Obrada provrta za pin	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z52	-x, +y	T117	Glodalo Ø24	1
Zn122	Obrada montažnih provrta	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z101	-z	T111	Svrđlo Ø5,2	3
Zn111	Obrada provrta za pin	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z111	-z	T121	Ureznik M6	1
Zn122	Obrada montažnih provrta	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z15	-z	T141	Svrđlo Ø2,55	1
Zn122	Obrada montažnih provrta	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z162	-z	T151	Svrđlo Ø4,2	7
Zn122	Obrada montažnih provrta	Usisna strana	Urežavanje navoja	Z172	-z	T153	Ureznik M5	1

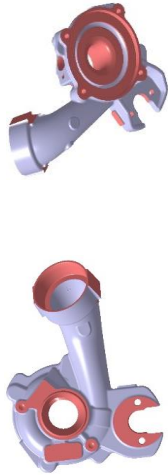
Skup klastera zahvata	Klaster zahvata	Zahvati	Značajke
SKZ1	KZ1	Z1	Zn1
SKZ2	KZ2	Z2	Zn2
SKZ3	KZ3	(Z3, Z4)	Zn3
SKZ4	KZ4	(Z5, Z6, Z7)	(Zn4, Zn5)
SKZ5	KZ5	Z12	Zn9
SKZ6	KZ6	Z8	Zn6
SKZ7	KZ7	(Z9, Z10, Z11)	(Zn7, Zn8)
SKZ8	KZ8	(Z13, Z14)	Zn10
SKZ9	KZ9	Z15	Zn11
SKZ10	KZ10	(Z16, Z17)	Zn12

Skup klastera zahvata	Kombinacije
SKZ30	KZ2, KZ3
SKZ31	KZ9, KZ10
SKZ39	KZ4, KZ9, KZ10
SKZ43	KZ5, KZ6, KZ7, KZ8
SKZ47	KZ4, KZ5, KZ6, KZ7, KZ8, KZ9, KZ10
SKZ51	KZ1, KZ2, KZ3, KZ4, KZ5, KZ6, KZ7, KZ8, KZ9, KZ10

Skup klastera zahvata	Klaster zahvata	Zahvati	Značajke
SKZ12	KZ12	Z12	Zn12
SKZ24	KZ24	Z24	Zn24
SKZ34	KZ34	(Z34, Z44)	Zn34
SKZ27	KZ27	Z50	Zn31
SKZ28	KZ28	Z51	Zn32
SKZ5	KZ5	Z12	Zn9
SKZ16	KZ16	(Z31, Z32)	Zn20
SKZ29	KZ29	Z52	Zn53
SKZ81	KZ81	(Z101, Z111)	Zn81
SKZ9	KZ9	Z15	Zn11
SKZ122	KZ122	(Z162, Z172)	Zn122

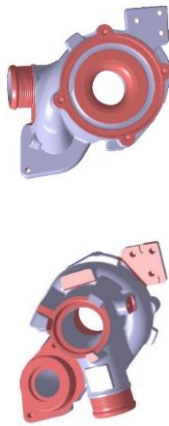
Skup klastera zahvata	Kombinacije
SKZ38	KZ24, KZ34
SKZ44	KZ5, KZ16, KZ27, KZ28
SKZ45	KZ81, KZ9, KZ122, KZ29
SKZ50	KZ5, KZ81, KZ9, KZ122, KZ16, KZ27, KZ28, KZ29
SKZ53	KZ24, KZ34, KZ5, KZ81, KZ9, KZ122, KZ16, KZ27, KZ28, KZ29

Plan obrade za izradak 355



Značajka	Opis značajke	Orientacija obratka	Zahvat	Oznaka zahvata	Smjer obrade	Oznaka alata	Tip alata	Ukupno značajki
Zn11	Obrada tlačne strane	Tlačna strana	Tokarenje	Z11	-	T006	Zvono	1
Zn12	Obrada difuzora	Usisna starna	Tokarenje	Z22	-	T007	Motka 1	1
Zn32	Obrada konture	Usisna starna	Tokarenje grubo	Z32	-	T010	Motka 2	1
Zn23	Obrada EGR-a	Usisna starna	Tokarenje fino	Z42	-	T009	Motka 3	1
Zn19	Obrada markera	Tlačna strana	Glodanje unutarnje	Z36	-	T002	Zvono 2	1
Zn10	Obrada markera	Tlačna strana	Glodanje bokova	Z37	-	T113	Glodalo Ø20	2
Zn10	Obrada markera	Tlačna strana	Glodanje	Z12	-	T113	Glodalo Ø20	1
Zn4	Obrada flange	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z13	-	T112	Svrđlo Ø12/Ø5,2	2
Zn5	Obrada provrta na flangi	Usisna starna	Glodanje	Z14	-	T121	Ureznik M6	1
Zn24	Obrada bokova flange	Tlačna strana	Rezrtavanje	Z6	-	T131	Svrđlo Ø6	2
Zn25	Obrada prokove	Tlačna strana	Glodanje	Z7	+y	T207	Razrtac Ø7,2	2
Zn26	Obrada izdanak 2	Tlačna strana	Glodanje	Z38	+y	T117	Glodalo Ø24	2
Zn27	Obrada prihvata za izdanak 2	Tlačna strana	Rezrtavanje	Z40	-x, +y	T119	Svrđlo Ø12	1
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z41	-	T118	Razrtac Ø12,8	2
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z43	-	T121	Svrđlo Ø5,2	2
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z161	-	T151	Svrđlo Ø4,2	4
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z171	-	T153	Ureznik M5	4

Plan obrade za izradak 129



Značajka	Opis značajke	Orientacija obratka	Zahvat	Oznaka zahvata	Smjer obrade	Oznaka alata	Tip alata	Ukupno značajki
Zn23	Obrada difuzora	Usisna starna	Tokarenje	Z23	-	T007	Motka 1	1
Zn33	Obrada konture	Usisna starna	Tokarenje grubo	Z33	-	T010	Motka 2	1
Zn28	Obrada tlačne strane A1	Tlačna strana	Tokarenje fino	Z43	-	T009	Motka 3	1
Zn29	Obrada pribubice	Tlačna strana	Glodanje unutarnje	Z44	-	T005	Zvono	1
Zn15	Obrada montažnih provrta	Tlačna strana	Glodanje vanjsko	Z45	+x, +y	T113	Glodalo Ø20	1
Zn15	Obrada montažnih provrta	Tlačna strana	Glodanje unutarnje	Z46	-	T135	Glodalo Ø10	1
Zn30	Obrada EGR-a	Tlačna strana	Ureziivanje navoja	Z47	-	T137	Glodalo Ø65	1
Zn9	Obrada markera	Tlačna strana	Ureziivanje navoja	Z20	-	T111	Svrđlo Ø5,2	2
Zn7	Obrada pločice	Tlačna strana	Glodanje grubo	Z21	-	T121	Ureznik M6	1
Zn8	Obrada provrta na pločici	Tlačna strana	Glodanje fino	Z48	-	T378	Zvono 2 Ø30	1
Zn20	Obrada izdanak 2	Tlačna strana	Ureziivanje navoja	Z12	-x, +y	T113	Glodalo Ø20	1
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z9	-x, +y	T123	Glodalo Ø40	1
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z10	-	T111	Svrđlo Ø5,2	3
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z31	-	T112	Svrđlo Ø12/Ø5,2	1
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z32	-	T121	Ureznik M6	1
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z161	-	T151	Svrđlo Ø4,2	4
Zn121	Obrada montažnih provrta	Usisna starna	Ureziivanje navoja	Z171	-	T153	Ureznik M5	4

Skup klastera zahvata	Klaster zahvata	Zahvati	Značajke
SKZ11	KZ11	Z11	Zn11
SKZ22	KZ22	Z22	Zn22
SKZ32	KZ32	(Z32, Z42)	Zn32
SKZ19	KZ19	(Z36, Z37)	Zn23
SKZ25	KZ25	Z12	Zn9
SKZ9	KZ9	(Z13, Z14)	Zn10
SKZ4	KZ4	(Z5, Z6, Z7)	(Zn4, Zn5)
SKZ20	KZ20	Z38	Zn24
SKZ21	KZ21	Z39	Zn25
SKZ22	KZ22	(Z40, Z41)	Zn26
SKZ23	KZ23	(Z42, Z43)	Zn27
SKZ121	KZ121	(Z161, Z171)	Zn121

Skup klastera zahvata	Kombinacije
SKZ34	KZ22, KZ32
SKZ46	KZ4, KZ5, KZ9, KZ20, KZ21
SKZ35	KZ22, KZ23
SKZ48	KZ4, KZ5, KZ9, KZ19, KZ20, KZ21, KZ22, KZ23
SKZ55	KZ22, KZ32, KZ4, KZ5, KZ9, KZ19, KZ20, KZ21, KZ22, KZ23, KZ121

Skup klastera zahvata	Kombinacije
SKZ36	KZ23, KZ33
SKZ42	KZ5, KZ8, KZ24
SKZ37	KZ12, KZ25
SKZ49	KZ5, KZ8, KZ12, KZ16, KZ24, KZ25, KZ26, KZ121
SKZ52	KZ23, KZ33, KZ5, KZ8, KZ12, KZ16, KZ24, KZ25, KZ26, KZ121

Skup klastera zahvata	Klaster zahvata	Zahvati	Značajke
SKZ23	KZ23	Z23	Zn23
SKZ23	KZ23	(Z33, Z43)	Zn33
SKZ24	KZ24	(Z44, Z45)	Zn28
SKZ25	KZ25	(Z46, Z47)	Zn29
SKZ12	KZ12	(Z20, Z21)	Zn15
SKZ26	KZ26	(Z48, Z49)	Zn30
SKZ5	KZ5	Z12	Zn9
SKZ8	KZ8	(Z9, Z10, Z11)	(Zn7, Zn8)
SKZ16	KZ16	(Z31, Z32)	Zn20
SKZ121	KZ121	(Z161, Z171)	Zn121

Plan obrade za izradak 736



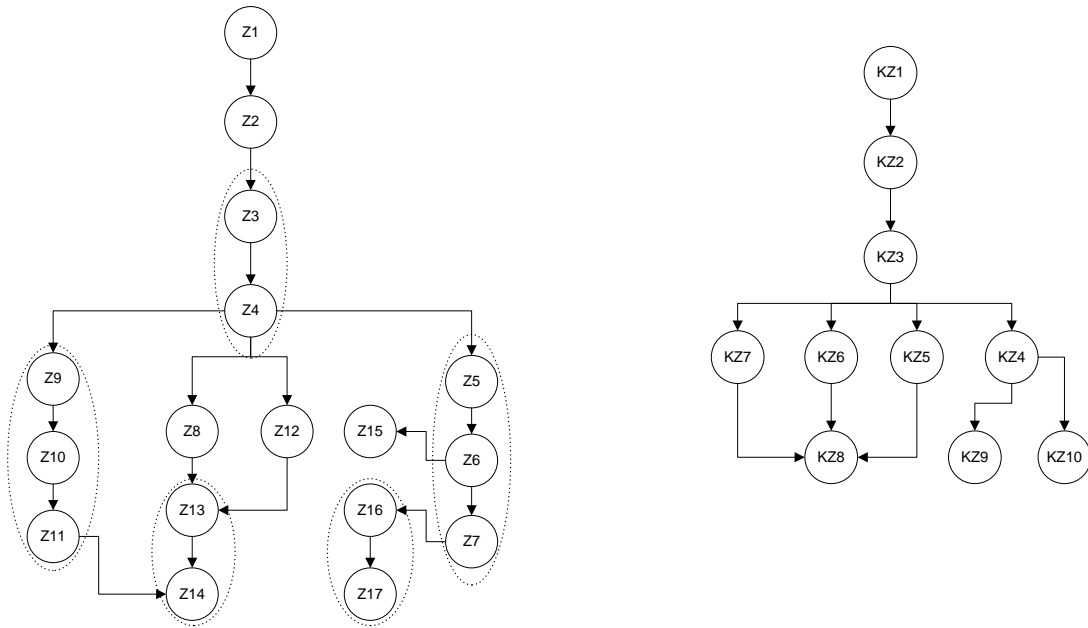
Značajka	Opis značajke	Orijentacija obratka	Zahvat	Oznaka zahvata	Smjer obrade	Oznaka alata	Tip alata	Ukupno značajki
Zn21	Obrada difuzora	Usisna stana	Tokarenje	Z21	-	T007	Motka 1	1
Zn31	Obrada konture	Usisna stana	Tokarenje grubo	Z31	-	T010	Motka 2	1
		Usisna stana	Tokarenje fino	Z41	-	T009	Motka 3	
Zn13	Obrada tlačne strane A1	Tlačna strana	Glodanje vanjsko	Z18	-	T113	Glodalo Ø20	1
Zn14	Obrada tlačne strane A2	Tlačna strana	Glodanje unutarne	Z19	-	T123	Glodalo Ø40	1
Zn15	Obrada provrta tlačne strane A	Tlačna strana	Bušenje	Z20	-	T111	Svrđlo Ø5,2	2
		Tlačna strana	Ureziivanje navoja	Z21	-	T121	Ureznik M6	
Zn16	Obrada tlačne pribubnice B1	Tlačna strana	Glodanje dna	Z22	-x, +y	T123	Glodalo Ø40	1
	Obrada tlačne pribubnice B2	Tlačna strana	Glodanje izdanka	Z23	-x, +y	T117	Glodalo Ø24	1
	Obrada tlačne pribubnice B3	Tlačna strana	Glodanje vrha	Z24	-	T375	Zvono Ø52	1
Zn17	Obrada flanše	Tlačna strana	Glodanje	Z25	-x, +y	T123	Glodalo Ø40	1
Zn18	Obrada provrta na flanši	Tlačna strana	Bušenje	Z26	-	T111	Svrđlo Ø5,2	2
Zn9	Obrada markera na flanši	Tlačna strana	Ureziivanje navoja	Z27	-	T121	Ureznik M6	1
Zn19	Obrada izdanka 1	Tlačna strana	Glodanje	Z12	-x	T117	Glodalo Ø24	1
		Tlačna strana	Glodanje	Z28	-x	T117	Glodalo Ø24	1
		Tlačna strana	Bušenje	Z29	-	T111	Svrđlo Ø5,2	
		Tlačna strana	Bušenje	Z30	-	T121	Ureznik M6	
Zn20	Obrada izdanka 2	Tlačna strana	Bušenje i lupuštanje	Z31	-	T112	Svrđlo Ø12/Ø5,2	1
		Tlačna strana	Bušenje i lupuštanje	Z32	-	T121	Ureznik M6	
Zn21	Obrada prihvatna senzora	Tlačna strana	Bušenje i lupuštanje	Z33	-	T112	Svrđlo Ø12/Ø5,2	3
		Tlačna strana	Bušenje	Z34	-	T121	Ureznik M6	
Zn22	Obrada provrta za centriranje	Tlačna strana	Bušenje	Z35	-	T145	Svrđlo Ø3,2	2
Zn11	Obrada provrta za pin	Usisna stana	Bušenje	Z15	-	T141	Svrđlo Ø2,55	1
Zn12	Obrada montažnih provrta	Usisna stana	Bušenje	Z16	-	T151	Svrđlo Ø4,2	5
		Usisna stana	Ureziivanje navoja	Z17	-	T153	Ureznik M5	

Skup klastera zahvata	Klaster zahvata	Zahvat	Značajke
SKZ21	KZ21	Z21	Zn21
SKZ31	KZ31	(Z31, Z41)	Zn31
SKZ11	KZ11	(Z18, Z19)	(Zn13, Zn14)
SKZ12	KZ12	(Z20, Z21)	Zn15
SKZ13	KZ13	(Z22, Z23, Z24)	Zn16
SKZ14	KZ14	(Z25, Z26, Z27)	(Zn17, Zn18)
SKZ5	KZ5	Z12	Zn9
SKZ15	KZ15	(Z28, Z29, Z30)	Zn19
SKZ16	KZ16	(Z31, Z32)	Zn20
SKZ17	KZ17	(Z33, Z34)	Zn21
SKZ18	KZ18	Z35	Zn22
SKZ9	KZ9	Z15	Zn11
SKZ10	KZ10	(Z16, Z17)	Zn12

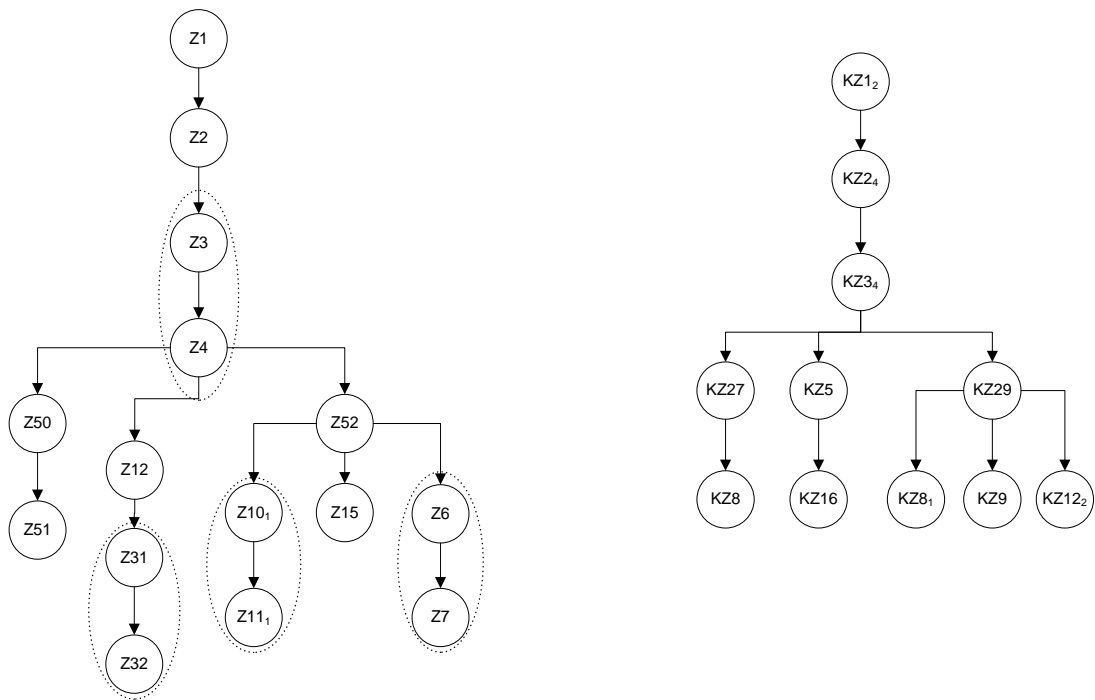
Skup klastera zahvata	Kombinacije
SKZ32	KZ21, KZ31
SKZ33	KZ11, KZ12
SKZ40	KZ5, KZ14, KZ16
SKZ41	KZ15, KZ17, KZ18
SKZ54	KZ5, KZ9, KZ10, KZ11, KZ12, KZ13, KZ14, KZ15, KZ16, KZ17, KZ18
SKZ56	KZ21, KZ31, KZ5, KZ9, KZ10, KZ11, KZ12, KZ13, KZ14, KZ15, KZ16, KZ17, KZ18

PRILOG E

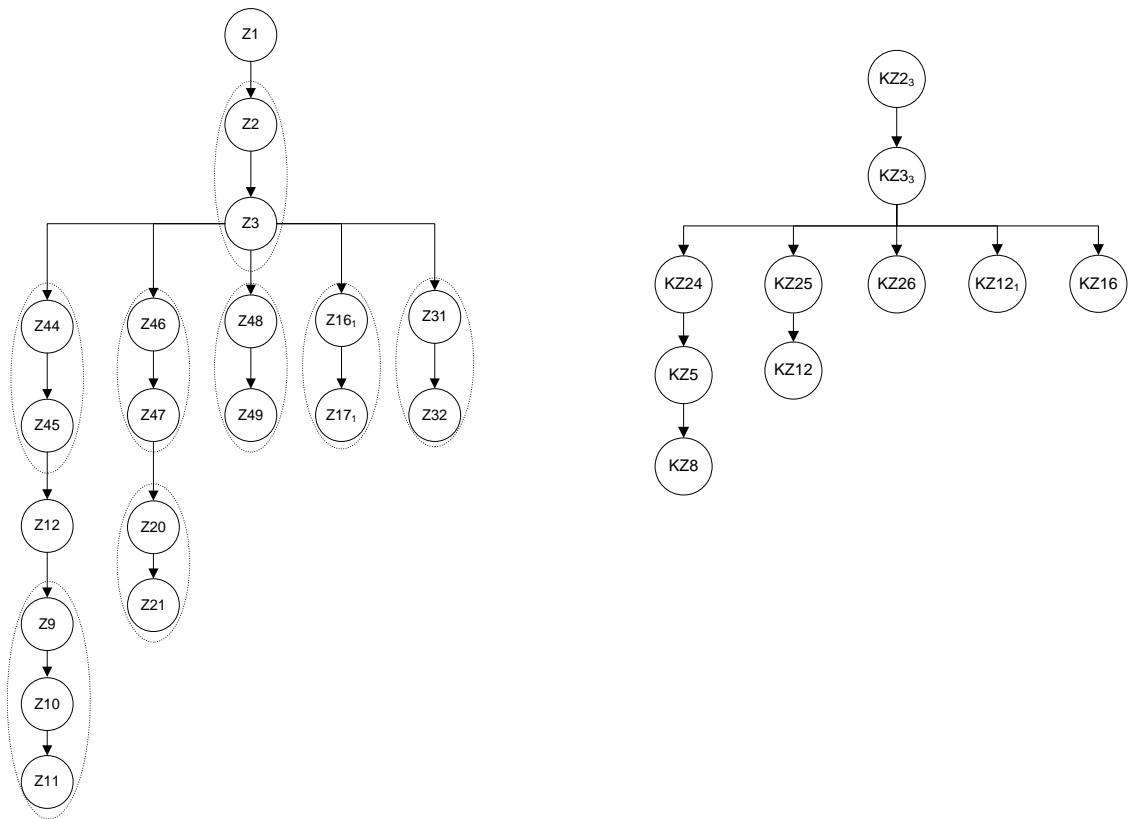
Grafikoni odnosa redoslijeda Z i KZ



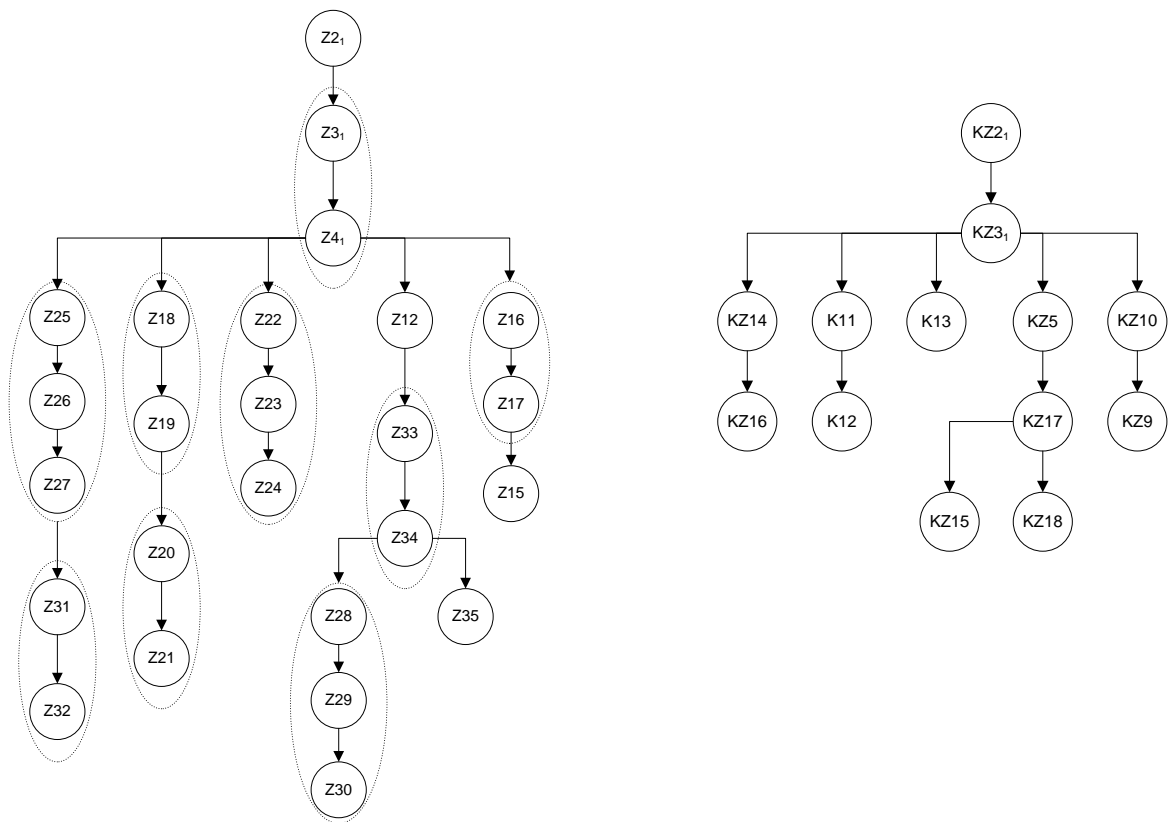
Slika E1: Grafikon odnosa redoslijeda za proizvod 2031-D



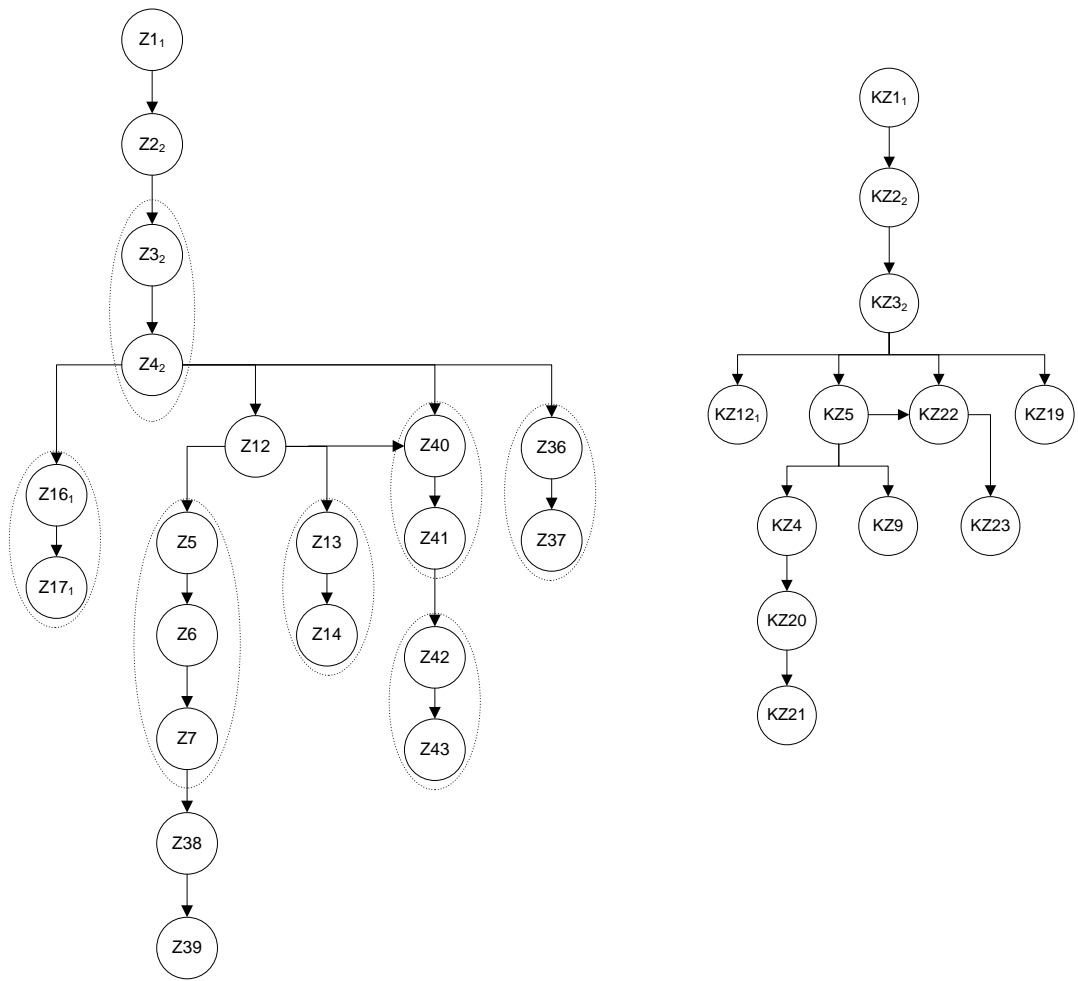
Slika E2: Grafikon odnosa redoslijeda za proizvod 640-B+



Slika E3: Grafikon odnosa redosljeda za proizvod 129-B



Slika E4: Grafikon odnosa redosljeda za proizvod 736-C



Slika E4: Grafikon odnosa redoslijeda za proizvod 355-A

PRILOG F

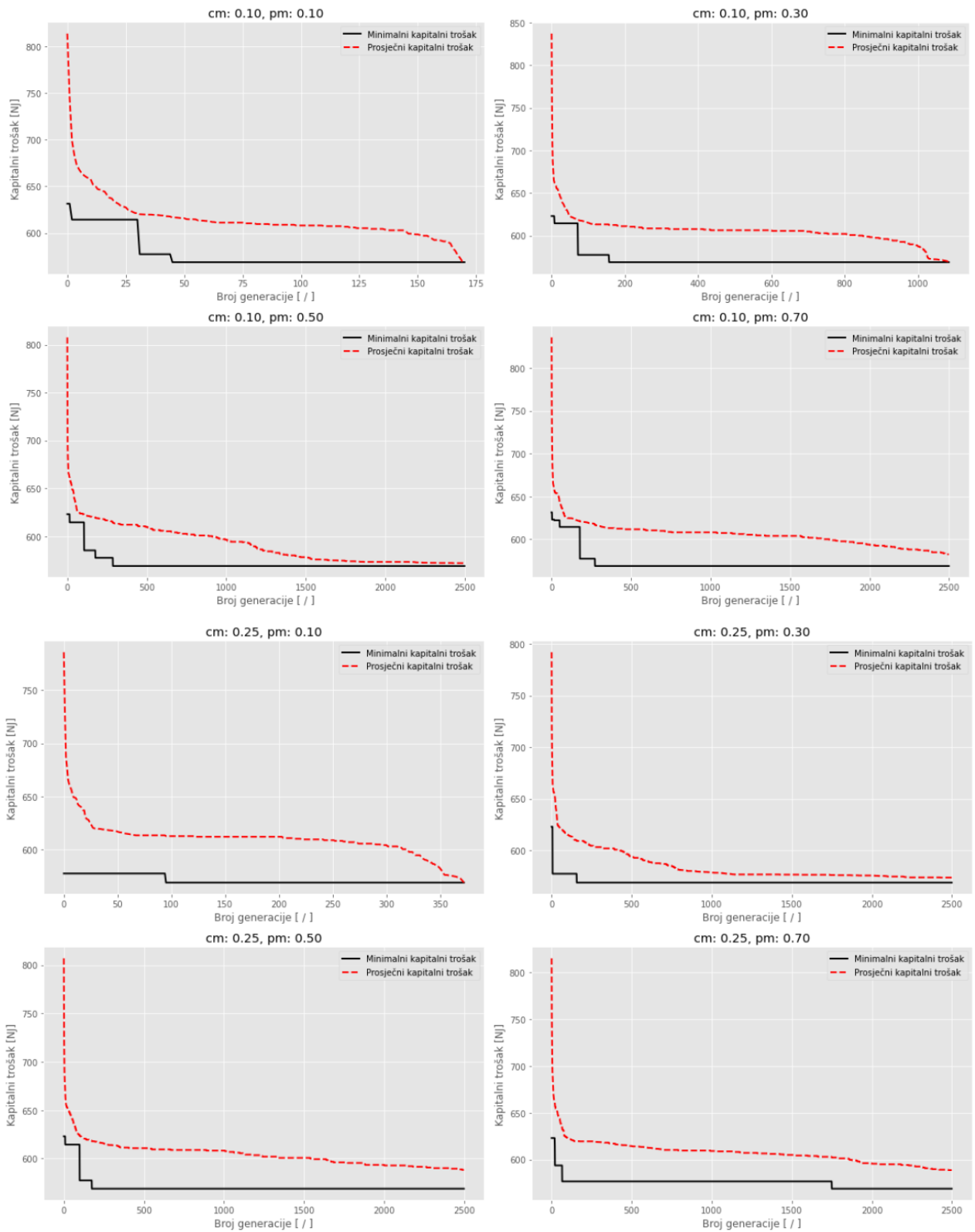
Prikaz mogućnosti obrade SKZ na odabranim tipova strojeva

Skup klastera zahvata	Klaster zahvata	Stopa proizvodnje [izr./h]						2031	736	355	129	640
		Vrijeme obrade [min/izr.]										
		S1	S2	S3	S4	S5	S6					
SKZ1	KZ1	167	-	-	-	-	500	x				
		0,36	-	-	-	-	0,12	x				
SKZ11	KZ11	194	-	-	-	-	462			x		
		0,31	-	-	-	-	0,13			x		
SKZ12	KZ12	188	-	-	-	-	222					x
		0,32	-	-	-	-	0,27					x
SKZ2	KZ2	-	103	-	-	-	200	x				
		-	0,58	-	-	-	0,3	x				
SKZ21	KZ21	-	122	-	-	-	200		x			
		-	0,49	-	-	-	0,3		x			
SKZ22	KZ22	-	90	-	-	-	188			x		
		-	0,67	-	-	-	0,32			x		
SKZ23	KZ23	-	86	-	-	-	176				x	
		-	0,7	-	-	-	0,34				x	
SKZ24	KZ24	-	98	-	-	-	115					x
		-	0,61	-	-	-	0,52					x
SKZ3	KZ3	-	72	-	-	-	333	x				
		-	0,83	-	-	-	0,18	x				
SKZ31	KZ31	-	82	-	-	-	333		x			
		-	0,73	-	-	-	0,18		x			
SKZ32	KZ32	-	56	-	-	-	222			x		
		-	1,08	-	-	-	0,27			x		
SKZ33	KZ33	-	49	-	-	-	162				x	
		-	1,23	-	-	-	0,37				x	
SKZ34	KZ34	-	50	-	-	-	59					x
		-	1,2	-	-	-	1,02					x
SKZ4	KZ4	-	-	98	122	140	122	x		x		
		-	-	0,61	0,49	0,43	0,49	x		x		
SKZ5	KZ5	-	-	857	1200	1200	1200	x	x	x	x	x
		-	-	0,07	0,05	0,05	0,05	x	x	x	x	x
SKZ6	KZ6	-	-	375	462	545	462	x				
		-	-	0,16	0,13	0,11	0,13	x				
SKZ7	KZ7	-	-	125	158	182	158	x				
		-	-	0,48	0,38	0,33	0,38	x				
SKZ8	KZ8	-	-	273	333	400	333	x			x	
		-	-	0,22	0,18	0,15	0,18	x			x	
SKZ81	KZ81	-	-	375	429	545	429					x
		-	-	0,16	0,14	0,11	0,14					x
SKZ9	KZ9	-	-	1000	1200	1500	1200	x	x	x		
		-	-	0,06	0,05	0,04	0,05	x	x	x		
SKZ10	KZ10	-	-	158	200	222	200	x	x			
		-	-	0,38	0,3	0,27	0,3	x	x			
SKZ11	KZ11	-	-	194	286	375	286		x			
		-	-	0,31	0,21	0,16	0,21		x			
SKZ12	KZ12	-	-	240	300	353	300		x		x	
		-	-	0,25	0,2	0,17	0,2		x		x	
SKZ121	KZ121	-	-	300	375	462	375			x	x	
		-	-	0,2	0,16	0,13	0,16			x	x	
SKZ122	KZ122	-	-	74	94	118	94					x
		-	-	0,81	0,64	0,51	0,64					x
SKZ13	KZ13	-	-	91	120	158	120		x			
		-	-	0,66	0,5	0,38	0,5		x			
SKZ14	KZ14	-	-	207	300	375	300		x			
		-	-	0,29	0,2	0,16	0,2		x			
SKZ15	KZ15	-	-	250	286	333	286		x			
		-	-	0,24	0,21	0,18	0,21		x			
SKZ16	KZ16	-	-	353	400	462	400		x		x	x
		-	-	0,17	0,15	0,13	0,15		x		x	x
SKZ17	KZ17	-	-	214	250	316	250		x			
		-	-	0,28	0,24	0,19	0,24		x			
SKZ18	KZ18	-	-	750	857	1000	857		x			
		-	-	0,08	0,07	0,06	0,07		x			
SKZ19	KZ19	-	-	143	188	240	188			x		
		-	-	0,42	0,32	0,25	0,32			x		
SKZ20	KZ20	-	-	545	667	750	667			x		
		-	-	0,11	0,09	0,08	0,09			x		
SKZ21	KZ21	-	-	462	545	667	545			x		
		-	-	0,13	0,11	0,09	0,11			x		
SKZ22	KZ22	-	-	188	222	250	222			x		
		-	-	0,32	0,27	0,24	0,27			x		
SKZ23	KZ23	-	-	333	429	545	429			x		
		-	-	0,18	0,14	0,11	0,14			x		
SKZ24	KZ24	-	-	55	65	78	65				x	
		-	-	1,1	0,93	0,77	0,93				x	
SKZ25	KZ25	-	-	188	222	273	222				x	
		-	-	0,32	0,27	0,22	0,27				x	
SKZ26	KZ26	-	-	58	68	83	68				x	
		-	-	1,03	0,88	0,72	0,88				x	
SKZ27	KZ27	-	-	158	188	222	188					x
		-	-	0,38	0,32	0,27	0,32					x
SKZ28	KZ28	-	-	207	240	300	240					x
		-	-	0,29	0,25	0,2	0,25					x
SKZ29	KZ29	-	-	182	222	250	222					x
		-	-	0,33	0,27	0,24	0,27					x
SKZ30	KZ2, KZ3	-	43	-	-	-	125	x				
		-	1,41	-	-	-	0,48	x				
SKZ31	KZ9, KZ10	-	-	136	171	194	171	x				
		-	-	0,44	0,35	0,31	0,35	x				
SKZ32	KZ21, KZ31	-	49	-	-	-	125		x			
		-	1,22	-	-	-	0,48		x			
SKZ33	KZ11, KZ12	-	-	107	146	182	146		x			
		-	-	0,56	0,41	0,33	0,41		x			
SKZ34	KZ22, KZ32	-	34	-	-	-	102			x		
		-	1,75	-	-	-	0,59			x		
SKZ35	KZ22, KZ23	-	-	120	146	171	146			x		
		-	-	0,5	0,41	0,35	0,41			x		
SKZ36	KZ23, KZ33	-	31	-	-	-	85				x	
		-	1,93	-	-	-	0,71				x	
SKZ37	KZ12, KZ25	-	-	105	128	154	128				x	
		-	-	0,57	0,47	0,39	0,47				x	
SKZ38	KZ24, KZ34	-	33	-	-	-	39					x
		-	1,81	-	-	-	1,54					x

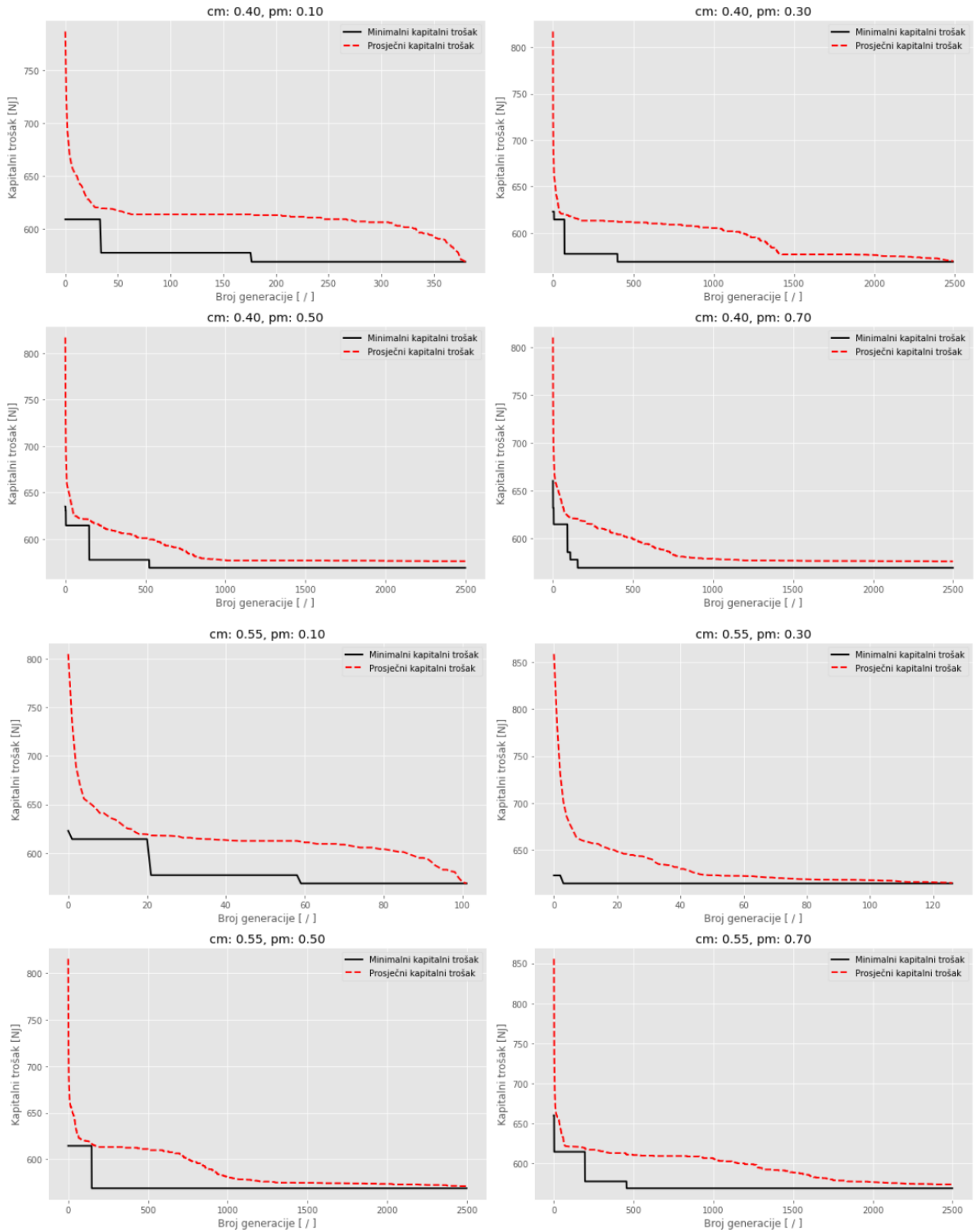
Skup klastera zahvata	Klaster zahvata	Stopa proizvodnje [izr./h]						2031	736	355	129	640
		Vrijeme obrade [min/izr.]										
		S1	S2	S3	S4	S5	S6					
SKZ39	KZ4, KZ9, KZ10	-	-	57	71	81	71	x				
		-	-	1,05	0,84	0,74	0,84	x				
SKZ40	KZ5, KZ14, KZ16	-	-	113	150	176	150		x			
		-	-	0,53	0,4	0,34	0,4		x			
SKZ41	KZ15, KZ17, KZ18	-	-	100	115	140	115		x			
		-	-	0,6	0,52	0,43	0,52		x			
SKZ42	KZ5, KZ8, KZ24	-	-	43	52	62	52				x	
		-	-	1,39	1,16	0,97	1,16				x	
SKZ43	KZ5, KZ6, KZ7, KZ8	-	-	65	81	94	81	x				
		-	-	0,93	0,74	0,64	0,74	x				
SKZ44	KZ5, KZ16, KZ27, KZ28	-	-	66	78	92	78					x
		-	-	0,91	0,77	0,65	0,77					x
SKZ45	KZ81, KZ9, KZ122, KZ29	-	-	44	55	67	55					x
		-	-	1,36	1,1	0,9	1,1					x
SKZ46	KZ4, KZ5, KZ9, KZ20, KZ21	-	-	61	76	87	76			x		
		-	-	0,98	0,79	0,69	0,79			x		
SKZ47	KZ4, KZ5, KZ6, KZ7, KZ8, KZ9, KZ10	-	-	-	-	43	38	x				
		-	-	-	-	1,38	1,58	x				
SKZ48	KZ4, KZ5, KZ9, KZ19, KZ20, KZ21, KZ22, KZ23	-	-	-	-	58	50			x		
		-	-	-	-	1,04	1,2			x		
SKZ49	KZ5, KZ8, KZ12, KZ16, KZ24, KZ25, KZ26, KZ121	-	-	-	-	26	21				x	
		-	-	-	-	2,34	2,82				x	
SKZ50	KZ5, KZ81, KZ9, KZ122, KZ16, KZ27, KZ28, KZ29	-	-	-	-	39	32					x
		-	-	-	-	1,55	1,87					x
SKZ51	KZ1, KZ2, KZ3, KZ4, KZ5, KZ6, KZ7, KZ8, KZ9, KZ10	-	-	-	-	-	30	x				
		-	-	-	-	-	1,98	x				
SKZ52	KZ23, KZ33, KZ5, KZ8, KZ12, KZ16, KZ24, KZ25, KZ26, KZ121	-	-	-	-	-	17				x	
		-	-	-	-	-	3,53				x	
SKZ53	KZ24, KZ34, KZ5, KZ81, KZ9, KZ122, KZ16, KZ27, KZ28, KZ29	-	-	-	-	-	16					x
		-	-	-	-	-	3,68					x
SKZ54	KZ5, KZ9, KZ10, KZ11, KZ12, KZ13, KZ14, KZ15, KZ16, KZ17, KZ18	-	-	-	-	34	28		x			
		-	-	-	-	1,79	2,18		x			
SKZ55	KZ22, KZ32, KZ4, KZ5, KZ9, KZ19, KZ20, KZ21, KZ22, KZ23, KZ121	-	-	-	-	-	31			x		
		-	-	-	-	-	1,92			x		
SKZ56	KZ21, KZ31, KZ5, KZ9, KZ10, KZ11, KZ12, KZ13, KZ14, KZ15, KZ16, KZ17, KZ18	-	-	-	-	-	23		x			
		-	-	-	-	-	2,66		x			

PRILOG G

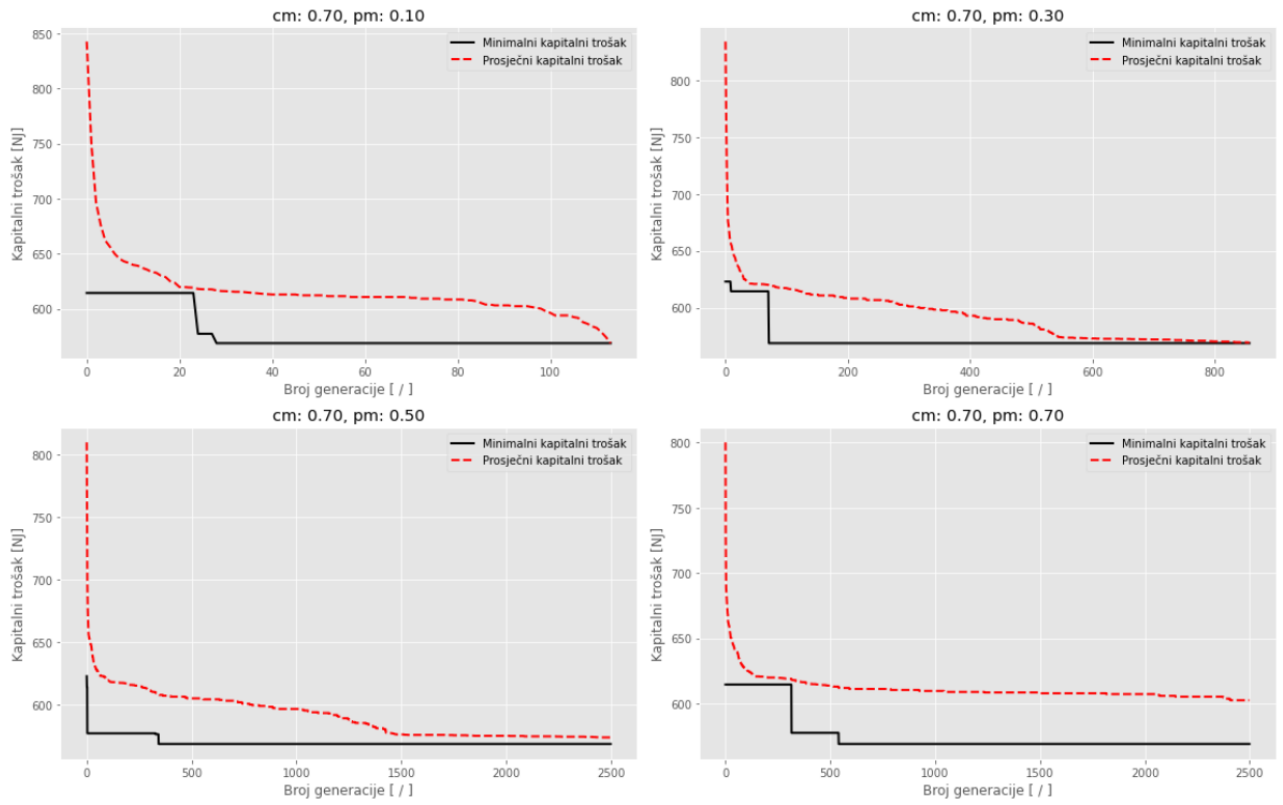
Prikaz krivulja konvergencije za vjerojatnostima križanja za peti period potražnje



Slika H1: Prikaz krivulja konvergencije za vjerojatnostima križanja $c_m = 0,1$ i $c_m = 0,25$



Slika H2: Prikaz krivulja konvergencije za vjerojatnostima križanja $c_m = 0,4$ i $c_m = 0,55$



Slika H#: Prikaz krivulja konvergencije za vjerojatnostima križanja $c_m = 0,7$

ŽIVOTOPIS

Valter Uran rođen je 13. kolovoza 1965. godine u Rijeci. Nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja pohađa Elektrotehničku školu u Rijeci gdje maturira 1984. godine i stječe zvanje elektroničar. Iste godine upisuje Tehnički fakultet Sveučilišta u Rijeci gdje obranom diplomskog rada *Idejni projekt proizvodnog sistema strojne obrade*, pod mentorstvom prof. dr. Marka Selakovića, diplomira 1992. godine. Nakon stjecanja diplome zapošljava se u tvrtki Cimos gdje na radnom mjestu Projektant-konstruktor kao član projektnog tima sudjeluje u projektiranju i uvođenju novih proizvodnih sustava za izradu proizvoda za automobilsku industriju, prvenstveno motornih dijelova i prijenosnika snage. U svom dugogodišnjem radu radi na poslovima inženjera prodaje te voditelja projekata na području razvoja proizvoda i procesa poput ručne kočnice, nosača motora, nosača opreme, kućišta filtra za ulje, zamašnjaka, osovina mjenjača, kućišta turbo kompresora, uglavnom djelova za prvu ugradnju u automobilskoj industriji. Vodi projekte u dizaju i rekonstrukcije motokultivatora te ostalih poljoprivrednih strojeva te projekte organizacije prototipnog odjela i odjela kvalitete. Od 2005. godine postaje voditeljem odjela industrijalizacije te surađuje na projektima i platformama za kupce BMW, PSA, Ford, Volvo, Eaton, Honeywell, Bosch Mahle, Toyota, Borg Warner, Sogefi, SHW, ZF, TPS Labinprogres, a nakon toga direktor razvoja i tehnologije na području proizvodnje oprema za tlačno, gravitacijsko i centrifugalno lijevanje, strojeva za obrezivanje, strojevi za montažu te strojeva za strojnu obradu. Od 2018. godine radi kao direktor proizvodnje u alatnici TEH-CUT u Zagrebu. Interes za daljnje istraživanje proizvodnih sustava, rekonfigurabilnih proizvodnih sustava te Industrije 4.0 sintetizira kroz temu doktorske disertacije naslova *Utjecaj skalabilnosti na optimalno formiranje višepredmetnih rekonfigurabilnih proizvodnih sustava* pod mentorstvom prof. dr. Tončija Mikca i komentorstva doc. dr. Sandra Dobovičeka. Autor je ili koautor nekoliko radova objavljenih u domaćim i stranim znanstvenim i stručnim časopisima.

POPIS RADOVA

- Uran, V., Radović, D., Rob, M.: "The impact of palletization on the flexibility in manufacturing systems", *4th International Scientific Conference, Lean Spring summit 2019*, Lovran, 94-103, 2019.
- Uran, V.: "Scalability design impact in multi-product RMS", *My first conference, 2nd Annual conference for doctoral students of engineering and technology*, Rijeka, 35, 2018.
- Uran, V., Doboviček, S., Hadjina, M., Perinić, M.: "An impact of PLM system on collaboration activities in automotive industry", *10th International Scientific Conference, Management of Technology-Step to Sustainable Production, MOTSP 2018.*, Primošten, 21-30, 2018.
- Uran, V., Pavletić, D., Doboviček, S.: "An approach to the capability analysis of a multi-spindle machining centre", *Engineering review: znanstveni časopis za nove tehnologije u strojarstvu, brodogradnji i elektrotehnici*, Vol.38, No.1, 86-97, 2018.
- Uran, V., Lasič, T., Logar, R.: "Robotizirano gravitacijsko litje aluminija", *6th Industrial forum IRT*, Portorož, 2014.