

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Sandro Doboviček

OPTIMIRANJE KONCEPTUALNOG MODELA
KONTROLNOG PODSUSTAVA PRI
PROJEKTIRANJU PROIZVODNOG SUSTAVA

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2014.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Sandro Doboviček

OPTIMIRANJE KONCEPTUALNOG MODELA
KONTROLNOG PODSUSTAVA PRI
PROJEKTIRANJU PROIZVODNOG SUSTAVA

DOKTORSKI RAD

Mentor: red. prof. dr. sc. Tonči Mikac

Rijeka, 2014.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

Sandro Doboviček

OPTIMIZING THE CONCEPTUAL MODEL OF
THE CONTROL SUBSYSTEM IN THE
MANUFACTURING SYSTEM DESIGN

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2014.

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

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

1. prof. dr. sc. Duško Pavletić – predsjednik
2. prof. dr. sc. Tonči Mikac – član, mentor
3. prof. dr. sc. Ivica Veža – član (FESB, Split)

Sveučilište u Rijeci
TEHNIČKI FAKULTET
-Fakultetsko vijeće-
Klasa: 602-04/10-02/50
Ur. br.: 2170-57-43-10-31
Rijeka, 24. rujna 2010.

Fakultetsko vijeće Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, na svojoj 50. (14.) sjednici u akad. god. 2007./08./09./10 održanoj 24. rujna 2010., donijelo je sljedeću

ODLUKU

Sukladno izvješću Stručnog povjerenstva, u sastavu: red. prof. dr. sc. Tonči Mikac, izv. prof. dr. sc. Milan Ikončić, izv. prof. dr. sc. Duško Pavletić te pozitivne ocjene prijave i obrane teme doktorskog rada, utvrđuje se da pristupnik *Sandro Doboviček, dipl. ing.* ispunjava Zakonom propisane uvjete za prijavu i izradu teme doktorskog rada naslovljenog:

„Optimiranje konceptualnog modela kontrolnog podsustava pri projektiranju proizvodnog sustava“

Mentorom se imenuje red. prof. dr. sc. Tončica Mikca.



Dekan

Prof. dr. sc. Tonči Mikac

Dostaviti:

1. Sandro Doboviček, dipl. ing.
2. Mentor, red. prof. dr. sc. Tonči Mikac
3. Služba studentske evidencije
4. Pismohrana FV

SAŽETAK

Rekonfigurabilni proizvodni sustavi pružaju proizvodnim organizacijama mogućnost odgovora na promjenjive zahtjeve tržišta, koji se iskazuju u vidu sve kraćih životnih ciklusa proizvoda i sve naglašenije personalizacije proizvoda, da promjenom konfiguracije proizvodnog sustava na brz i troškovno učinkovit način postignu potrebne promjene značajki proizvodnosti i promjenjivosti sustava. Tradicionalnim pristupom projektiranja proizvodnog sustava, postizanje odgovarajućih vrijednosti proizvodnosti i promjenjivosti primarni su ciljevi rane faze projektiranja dok se kvaliteta proizvoda kao treći, prvim dvjema ciljevima konkurirajući cilj projektiranja zanemaruje. Projektiranje kontrolnog podsustava i određivanje potrebnih napora za kontrolom kvalitete proizvoda takvim se tradicionalnim pristupom vrše tek u kasnim fazama projektiranja proizvodnog sustava ili čak i kasnije, što može dovesti do uvijek nepovoljnih, naknadnih povećanja potrebnih investicijskih ulaganja i troškova proizvodnje. Doktorski rad je posvećen ranom karakteriziranju napora pri izvođenju statističke kontrole procesa, potrebnih za postizanje indeksa sposobnosti konfiguracije proizvodnog sustava zadanog projektnim zadatkom. Rano karakteriziranje takvih napora podrazumijeva njihovo prepoznavanje već u ranoj fazi projektiranja proizvodnih sustava, prije definiranja konačnog koncepta proizvodnog sustava, detaljiziranja pojedinih operacija i izrade plana realizacije proizvodnje. U radu je predložena metoda simultanog projektiranja konceptualnih modela proizvodnog sustava i pripadajućeg optimalnog kontrolnog podsustava kojom se u ranoj fazi projektiranja omogućuje određivanje dodatnih značajki pojedinih konceptata proizvodnih sustava. Pri procjeni opterećenosti kontrolnog podsustava koriste se modeli neizrazite logike koji su za tu potrebu prilagođeni posebnostima statističke kontrole procesa, kako bi se u ranoj fazi projektiranja odredili redovi veličina parametara planova kontrole, a time i potrebni naponi za održavanjem povoljne razine kvalitete proizvoda. Metoda pretpostavlja postojanje baze podataka iskustvenih saznanja o

procesima, koje proizvodne organizacije održavaju i koriste u svrhu boljeg predviđanja pogrešaka i njihovih posljedica.

ABSTRACT

Reconfigurable manufacturing systems are manufacturing systems designed to be able for rapid change in its structure, as well as its hardware and software components, in order to quickly adjust its production capacity and functionality within a certain part family in response to sudden market changes or intrinsic system change. Such abilities of manufacturing systems are achieved in their design processes. Traditional objectives in manufacturing system design are productivity and flexibility but in the early stage of design process quality is usually neglected. Control subsystem design and determination of efforts necessary for product quality control are usually done at later stages of manufacturing system design, which can lead to unfavourable increase in the value of the expected investments and production costs. Since system's configuration does affect product quality significantly, necessary efforts for quality control becomes more important for frequently changed system reconfigurations. This thesis focuses on a quality as a third objective of early manufacturing system design process, considering sometimes complex variability distributions within manufacturing process. Therefore, method for early determination of statistical process control efforts required to maintain a favourable configuration capability index are proposed. Fuzzy logic model for predicting expected configuration capability index are available in literature, although it is tailored for systems with 100% in process control. Fuzzy variables in this paper are redesigned to fit inspection errors of statistical process control, in order to allow system designer to define required statistical process control efforts for each system configuration and make better choices in the early stages of manufacturing system design. This method assumes the existence of a database of empirical knowledge about the processes that manufacturing companies maintain in order to better predict process capabilities, errors and their effects.

KLJUČNE RIJEČI

Rekonfigurabilni proizvodni sustavi

Projektiranje proizvodnog sustava

Kvaliteta proizvoda

Statistička kontrola procesa

Strategije kontrole

KEYWORDS

Reconfigurable manufacturing systems

Manufacturing system design

Product quality

Statistical process control

Control strategies

SADRŽAJ

SAŽETAK	I
ABSTRACT	III
KLJUČNE RIJEČI	V
NOMENKLATURA	XIII
Latinični simboli	xiii
Grčki simboli	xv
Eksponenti i indeksi.....	xv
Kratice.....	xvi
1 UVOD	1
1.1 Postavljanje problema.....	3
1.2 Metodologija istraživanja.....	5
1.3 Sadržaj rada	6
1.4 Očekivani znanstveni doprinos istraživanja	6
1.5 Hipoteza istraživanja	7
1.6 Primjena rezultata istraživanja.....	7
2 KVALITETA KAO CILJ PROJEKTIRANJA PROIZVODNIH SUSTAVA	9
2.1 Projektiranje proizvodnog sustava za kvalitetu	10
2.1.1 Oblikovanje dobavljačkog lanca	10
2.1.2 Planiranje proizvodnog procesa.....	11
2.1.3 Raspored sustava.....	12
2.1.4 Odabir opreme	13
2.1.5 Upravljanje proizvodnjom	14

2.2	Kontrola kvalitete proizvodnih sustava	15
2.2.1	Razvoj funkcije kvalitete (QFD)	15
2.2.2	Analiza utjecaja i posljedica pogrešaka (FMEA)	15
2.2.3	Planiranje kontrole	16
2.2.4	Planiranje pokusa (DOE)	17
2.2.5	Statistička kontrola procesa (SPC)	17
2.3	Mogućnosti daljnje integracije projektiranja	18
3	POLAZNE OSNOVE	19
3.1	Industrijska proizvodnja – stanje i trendovi	19
3.2	Proizvodne inovacije u automobilskoj industriji	22
3.2.1	Toyotin proizvodni sustav, TPS	23
3.2.2	Vitka proizvodnja.....	25
3.2.3	Mercedes-Benzov proizvodni sustav, MPS.....	26
3.3	Osnovni pojmovi.....	27
3.3.1	Proizvodni sustav	27
3.3.2	Prostorna struktura	28
3.3.3	Hodogram obrade.....	29
3.3.4	Ciklus izrade.....	29
3.4	Projektiranje složenih proizvodnih sustava.....	29
3.4.1	Infrastrukturno projektiranje proizvodnih sustava.....	30
3.4.2	Strategija proizvoda.....	31
3.4.3	Strukturno projektiranje proizvodnih sustava.....	32
3.4.4	Metode pokušaja i pogreške.....	37
3.4.5	Zajedničko odlučivanje.....	37
3.4.6	Standardni proizvodni sustavi	38
3.4.7	Sistematike projektiranja	38
4	PROJEKTIRANJE PROIZVODNIH SUSTAVA	42
4.1	Dominantni modeli osnovnih proizvodnih sustava	42
4.1.1	Posvećene proizvodne linije.....	42
4.1.2	Fleksibilni proizvodni sustavi.....	45
4.1.3	Rekonfigurabilni proizvodni sustavi	47
4.2	Izlazne značajke rješenja proizvodnih sustava	51
4.2.1	Promjenjivost na razini tvornice	51
4.2.2	Promjenjivost na razini proizvodnog sustava	54

4.2.3	Upravljivost odvijanja procesa.....	56
4.2.4	Proizvodnost.....	56
4.2.5	Pouzdanost.....	56
4.2.6	Raspoloživost.....	57
4.2.7	Opterećenje kontrolnog podsustava.....	59
4.2.8	Investicijska ulaganja.....	61
4.2.9	Indeks sposobnosti konfiguracije.....	63
4.2.10	Troškovi.....	64
4.2.11	Efektivne površine.....	65
4.2.12	Utjecaj na okolinu.....	65
4.3	Značajke dominantnih modela proizvodnih sustava.....	65
4.4	Principi projektiranja rekonfigurabilnih proizvodnih sustava.....	67
4.5	Proizvodni procesi rekonfigurabilnih proizvodnih sustava.....	68
4.6	Klasifikacija konfiguracija proizvodnih sustava.....	70
4.6.1	Određivanje broja mogućih RPS konfiguracija sustava.....	73
5	STATISTIČKA KONTROLA PROCESA	75
5.1	Praćenje kvalitete proizvodnog procesa.....	77
5.1.1	Numerička interpretacija skupa podataka.....	77
5.1.2	Distribucije vjerojatnosti.....	78
5.1.3	Statističke osnove kontrolnih karti.....	81
5.1.4	Odabir kontrolnih granica kontrolnih karti.....	87
5.2	\bar{x} -potez i R kontrolne karte.....	88
5.2.1	Efekti ne-normalnosti kod \bar{x} -potez i R kontrolnih karti.....	90
5.2.2	Krivulje operativnih karakteristika \bar{x} -potez kontrolnih karti.....	91
5.2.3	Krivulje operativnih karakteristika R kontrolnih karti.....	94
5.2.4	Prosječna duljina protoka \bar{x} -potez kontrolnih karti.....	94
5.3	Analiza sposobnosti proizvodnog procesa.....	97
5.3.1	Indeks sposobnosti procesa za ne centrirane procese.....	97
5.3.2	Efekti ne-normalnosti distribucije na indeks sposobnosti procesa.....	98
5.3.3	Indeks izvođenja procesa.....	99
5.3.4	Sigma razina procesa.....	99
5.3.5	Doprinos procesa.....	101
6	STRATEGIJE KONTROLE KVALITETE	102
6.1	Utjecaj izvora varijabilnosti na dimenzijska odstupanja proizvoda.....	102

6.2	Model propagacija varijabilnosti kroz proizvodni sustav	103
6.3	Reducirani model propagacija varijabilnosti kroz proizvodni sustav.....	105
6.4	Redukcija ulaznih vektora odstupanja procesa U	106
6.5	Redukcija vektora izmjerenih odstupanja karakteristika kvalitete Y.....	106
6.5.1	Model distribucije varijabilnosti pojedinih konfiguracija sustava	108
7	PROJEKTIRANJE KONCEPTA PROIZVODNOG SUSTAVA S OPTIMALNIM	
	KONTROLNIM PODSUSTAVOM	114
7.1	Detaljna formulacija projektnog zadatka	115
7.2	Definiranje preliminarnog tehnološkog procesa izrade.....	116
7.3	Formiranje fonda mogućih konfiguracija proizvodnog sustava	120
7.4	Optimiranje konceptualnog modela kontrolnog podsustava.....	122
7.4.1	Potrebna alokacija kontrolnih stanica i dozvoljena pogreška provjere.....	123
7.4.2	Varijabla statističke pogreške provjere.....	127
7.4.3	Oblikovanje optimalnog konceptualnog modela kontrolnog podsustava.....	132
7.5	Vrednovanje konfiguracija sustava.....	135
7.5.1	Najveća moguća proizvodnost sustava.....	136
7.5.2	Promjenjivost	136
7.5.3	Potrebne efektivne površine	137
7.5.4	Modeli distribucija varijabilnosti kroz sustav.....	137
7.5.5	Sposobnost prevencije pogreške.....	138
7.5.6	Investicijska ulaganja.....	138
7.6	Odabir optimalne konfiguracije sustava	138
8	PRIMJER PROJEKTIRANJA KONCEPTA PROIZVODNOG SUSTAVA	140
8.1	Odabir konfiguracije i usporedba rezultata.....	161
9	ZAKLJUČAK	167
9.1	Osvrt na provedeno istraživanje i rezultate	168
9.2	Smjerovi daljnjih istraživanja.....	170
	LITERATURA	171
	POPIS SLIKA	178
	POPIS TABLICA	183
	PRILOG A	185

PRILOG B	191
ŽIVOTOPIS	205
POPIS RADOVA	206

NOMENKLATURA

Latinični simboli

A	tranzicijska matrica na segmentu proizvodnog procesa
a	amortizacijski iznos
B	ulazna matrica na segmentu proizvodnog procesa
C	matrica odnosa stvarnih i izmjerenih devijacija proizvoda
c	redni broj uzastopnog uzorkovanja
C_{inv}	veličina investicijskog ulaganja
C_p	indeks sposobnosti procesa
C_{pk}	sposobnost procesa
C_{spec}	veličina specifičnog troška
D	doprinos procesa
D_3	faktor kontrolnih granica R kontrolne karte
D_4	faktor kontrolnih granica R kontrolne karte
d	redni broj diferencijacije operacije
$d_{py,j}$	broj diferencijacija operacija proizvodnog procesa za proizvodnju j -tog izratka na kojima postoji element za sprječavanje pogreške
d_{uk}	ukupni broj diferencijacija operacija proizvodnog procesa za proizvodnju j -tog izratka
f	funkcija
F	funkcija cilja
H_0	hipoteza
H_1	alternativna hipoteza
h	vremenski interval
I	broj uzastopnih segmenata proizvodnog procesa
i	redni broj (opreme, ako nije drugačije navedeno)

j	redni broj proizvoda
K	vrijednost kontrolnog polja
K_i	raspoloživ vremenski kapacitet i -te proizvodne opreme
K_w	raspoloživ vremenski kapacitet w -te kontrolne opreme
\mathcal{K}	broj mogućih konfiguracija
\mathcal{K}_I	broj mogućih konfiguracija raspoređenih u I segmenata
k	koeficijent granica kontrolnog polja
M	ukupan broj pozicija opreme u proizvodnom sustavu
M	matrica
$N(\mu, \sigma^2)$	normalna distribucija s parametrima μ i σ^2 .
N	ukupan broj proizvoda, broj promatranja (veličina uzorka)
n	broj promatranja (veličina uzorka)
P	vjerojatnost
\mathcal{P}	broj putanji kretanja izradaka
p	redni broj putanje kretanja izradaka
q	količina izradaka
R	raspon
\bar{R}	prosječan raspon na uzorku
R_σ	sigma razina
$R_{\sigma, pd}$	očekivana dugoročna sigma razina proizvodnog procesa
$R_{\sigma, pk}$	očekivana kratkoročna sigma razina proizvodnog procesa
\mathcal{R}	ukupan broj segmenta (operacije) proizvodnog procesa
r	redni broj segmenta (operacije) proizvodnog procesa
S	količina opreme
s	standardna devijacija uzorka
s^2	varijanca uzorka
s_{dn}	broj radnih smjena na dan
T	vrijednost tolerancijskog polja
T_{op}	takt operacije
T_{sus}	takt sustava
t	vrijeme
U	vektor devijacija nastalih na segmentu proizvodnog procesa, granica upozorenja
u	redni broj kontrolnog postupka
V	vektor šuma mjernog senzora (instrumenta)

W	vektor inherentnog šuma na segmentu proizvodnog procesa
w	redni broj kontrolne opreme
X	vektor stanja devijacija karakteristika proizvoda
x	vrijednost varijable
\bar{x}	prosječna vrijednost varijable na uzorku
$\bar{\bar{x}}$	prosječna vrijednost prosječnih vrijednosti varijable na m uzoraka
Y	vektor stanja izmjerenih devijacija karakteristika proizvoda
y	karakteristika proizvoda
Z_0	vrijednost statističkog testa
$Z_{\alpha/2}$	jednostrana $\alpha/2$ točka postotka standardne normalne distribucije
z	ukupan broj parcijalnih elemenata

Grčki simboli

α	vjerojatnost nastanka pogreške prve vrste
β	vjerojatnost nastanka pogreške druge vrste
δ	veličina pomaka
η	stupanj iskoristivosti
η_{bt}	stupanj iskoristivosti bruto raspoloživog vremena
λ	relativni omjer standardnih devijacija
μ	srednja vrijednost populacije
ξ	koeficijent pomaka srednje vrijednosti
σ	standardna devijacija populacije
σ^2	varijanca populacije
$\Phi(\cdot)$	funkcija kumulativne distribucije standardne normalne distribucije
χ_0^2	vrijednost statističkog testa

Eksponenti i indeksi

0	vrijednost nul-hipoteze
c	centralna vrijednost
d	donja vrijednost
dn	dnevna vrijednost
ek	ekonomska vrijednost
g	gornja vrijednost
i	vrijednost i -te opreme, ako nije drugačije navedeno

int	cjelobrojna vrijednost
j	vrijednost j -tog proizvoda
max	najveća vrijednost
min	najmanja vrijednost
p	vrijednost na p -toj putanji kretanja izratka
per	vrijednost perioda
r	vrijednost na r -tom segmentu proizvodnog procesa (operaciji)
sus	vrijednost sustava
t	vremenska vrijednost
teh	tehnička vrijednost
u	vrijednost u -tog kontrolnog postupka
uk	ukupna vrijednost
w	vrijednost w -te kontrolne opreme

Kratice

3DCE	Trodimenzionalno simultano inženjerstvo (eng. <i>3-Dimensional Concurrent Engineering</i>)
3P	Proces pripreme proizvodnje (eng. <i>Production Preparation Process</i>)
AKS	Alokacija kontrolnih stanica
ARL	Prosječna duljina protoka (engl. <i>Average Run Length</i>) kontrolne karte
ATS	Prosječno vrijeme do signala (eng. <i>Average Time to Signal</i>) kontrolne karte
BSP	Broj segmenata procesa
BP	Broj putanji
CMM	Koordinatni mjerni stroj (eng. <i>Coordinate Measuring Machine</i>)
CNC	Računalno-numeričko upravljanje (eng. <i>Computer Numerical Control</i>)
DFQ	Projektiranje za kvalitetu (eng. <i>Design for Quality</i>)
DGP	Donja granica povjerenja
DKG	Donja kontrolna granica
DNMP	Defekata na milijun pokušaja
DOE	Planiranje pokusa (eng. <i>Design of Experiments</i>)
DTG	Donja tolerancijska granica
FMEA	Analiza utjecaja i posljedica pogrešaka (eng. <i>Failure Mode and Effects Analysis</i>)
FPS	Fleksibilni proizvodni sustav (eng. <i>Flexible Manufacturing System, FMS</i>)
FZ	Funkcijski zahtjevi
GGP	Gornja granica povjerenja

GKG	Gornja kontrolna granica
GTG	Gornja tolerancijska granica
IPK	Interval procesa pod kontrolom
IU	Investicijsko ulaganje
JIT	Točno-na-vrijeme (eng. <i>Just-In-Time</i>)
KKP	Ključna karakteristika proizvoda
KMC	Količina izradaka u među-operacijskom čekanju
KMSK	Kvaliteta morfološke strukture konfiguracije
MPS	Mercedes-Benzov proizvodni sustav
MSDD	Dekompozicija projektiranja proizvodnog sustava (eng. <i>Manufacturing System Design Decomposition</i>)
ODL	Oblikovanje dobavljačkog lanca
OO	Odabir opreme
PP	Pogreška provjere
PPL	Posvećena proizvodna linija (eng. <i>Dedicated Manufacturing Line, DML</i>)
PPP	Planiranje proizvodnog procesa
QFD	Razvijanje funkcije kvalitete (eng. <i>Quality Function Deployment</i>)
RIESP	Razina implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka
RIJ	Razina implementacije Jidoka
RPS	Rekonfigurabilni proizvodni sustav (eng. <i>Reconfigurable Manufacturing System, RMS</i>)
RS	Raspored sustava
RTY	Ukupni doprinos sustava (eng. <i>Rolled Throughput Yield</i>)
SDP	Sposobnost detekcije pogreške
SMED	Jednominutna promjena alata (eng. <i>Single-Minute Exchange of Die</i>)
SOVA	Analiza strujanja varijabilnosti (eng. <i>Stream Of Variation Analysis</i>)
SPC	Statistička kontrola procesa (eng. <i>Statistical Process Control</i>)
SPP	Sposobnost prevencije pogreške
STPP	Statistička pogreška provjere
T&E	Pokušaj i pogreška (eng. <i>Trial & Error</i>)
TPS	Toyotin proizvodni sustav
TQM	Potpuno upravljanje kvalitetom (eng. <i>Total Quality Management</i>)
USP	Ukupna sposobnost procesa
UP	Upravljanje proizvodnjom

1 UVOD

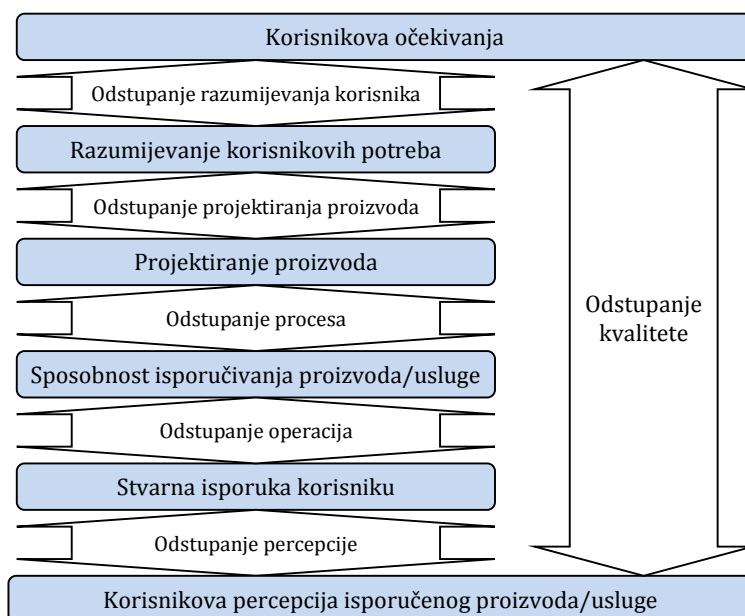
Kvaliteta je jedan od najvažnijih faktora odluke pri odabiru između ponuđenih proizvoda i usluga. Pri tome je nevažno da li je korisnik individualni kupac, industrijska organizacija, trgovina na malo, banka ili financijska institucija. Zbog toga su shvaćanje kvalitete i njeno poboljšanje ključni faktori koji vode do poslovnog uspjeha, rasta i povećanja konkurentnosti. Poboljšanje kvalitete i uspješno korištenje kvalitete kao integralnog dijela poslovne strategije mogu dovesti i do značajnog povrata investicijskih ulaganja.

Kvaliteta proizvoda može se opisati na više načina. Pri tome je važno razlikovati različite dimenzije kvalitete proizvoda. Garvin (1987.) je definirao osam ključnih točaka koje definiraju pojedine dimenzije kvalitete proizvoda:

- učinkovitost (u kojoj mjeri proizvod zadovoljava očekivanu funkciju?)
- pouzdanost (koliko često proizvod ne zadovoljava očekivanu funkciju?)
- trajnost (koliko dugo vremena će proizvod trajati?)
- održavanje (koliko je lako popraviti proizvod?)
- estetika (kakva je vizualna pojava proizvoda?)
- značajke (koje su mogućnosti proizvoda?)
- percipirana kvaliteta (kakav je ugled kompanije ili njenog proizvoda?)
- usklađenost s normama (da li je proizvod proizveden onako kako je to bilo planirano?)

Iz navedenih dimenzija kvalitete proizvoda može se zaključiti da je kvaliteta po definiciji višeznačan entitet pa tako niti ne postoji jednostavan odgovor na pitanja „Što je kvaliteta?“ ili „Što je poboljšanje kvalitete?“. Tradicionalna definicija kvalitete temelji se na stajalištu da svi proizvodi i usluge moraju zadovoljiti zahtjeve onih koji ih koriste. Early i Coletti (1999.) su kategorizirali odstupanja između korisnikovih očekivanja i korisnikove percepcije kvalitete gotovog proizvoda ili usluge, slika 1.1. Pojava bilo koje komponente ukupnog odstupanja može dovesti do percepcije loše kvalitete proizvoda, pri čemu su sva odstupanja jednako važna. Prva komponenta odstupanja

kvalitete je odstupanje razumijevanja, tj. nedostatak razumijevanja korisnikovih potreba. No, čak i kad se korisnikove potrebe savršeno razumiju, moguć je nastanak odstupanja projektiranja proizvoda kad se te potrebe ne implementiraju u samu funkciju proizvoda pri njegovom projektiranju. Treća komponenta ukupnog odstupanja, odstupanje procesa, može nastati ukoliko ne postoji sposobnost da proizvedeni proizvod ili pružena usluga budu sukladni sa svojim definiranim, projektiranim oblikom i svojstvima. Četvrta komponenta odstupanja, odstupanje operacija, može nastati kad način izvođenja ili kontroliranja proizvodnog procesa uzrokuju da proizvedeni proizvod ili pružena usluga ne budu konzistentno sukladni sa svojim definiranim oblikom i svojstvima. Posljednja, peta komponenta ukupnog odstupanja kvalitete predstavlja odstupanje korisnikove percepcije isporučenog proizvoda ili usluge (Early i Coletti, 1999.).



slika 1.1 Komponente odstupanja kvalitete (Early i Coletti, 1999.)

Montgomery (2009.) je u svom opsežnom radu definirao tradicionalnu i modernu definiciju kvalitete. Tradicionalno, kvalitetu definira kao sposobnost korištenja. Pri tome postoje dva aspekta sposobnosti korištenja: kvaliteta projektiranja i kvaliteta sukladnosti. Svi su proizvodi (ili usluge) ciljano oblikovani kako bi odgovarali određenim razinama kvalitete. Prikladan terminološki izraz tada je – kvaliteta projektiranja. Npr. svim automobilima je siguran prijevoz putnika osnovni cilj ali međusobno se razlikuju s obzirom na veličinu, oblik, opremu, performanse i sl. Takve su razlike među njima tada rezultat ciljanog djelovanja u procesu njihovog projektiranja. S druge strane, kvaliteta sukladnosti predstavlja mjeru koliko je proizvod sukladan s tehničkim podacima definiranim u procesu projektiranja. Kvaliteta sukladnosti je tako pod utjecajem brojnih čimbenika kao što su: izbor proizvodnog procesa, stručna osposobljenost radne

snage i njihova motiviranost, izbor načina kontrole kvalitete, aktivnostima provjere i sl.

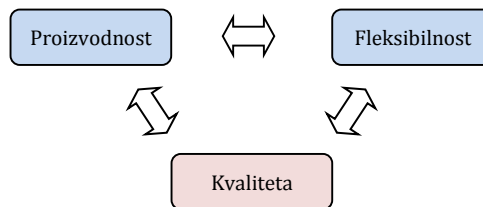
Moderna definicija kvalitete proizvoda definira kvalitetu kao mjeru obrnuto proporcionalnu varijabilnosti važnih karakteristika proizvoda. Pri tome kvaliteta proizvoda raste sa smanjenjem neželjene varijabilnosti važnih karakteristika tog proizvoda. Povećana varijabilnost važnih karakteristika proizvoda, kao i povećana varijabilnost svojstava proizvodnog sustava za njegovu proizvodnju, često rezultiraju gubicima pa se smanjenjem tih varijabilnosti mogu smanjiti gubici i povećati kvaliteta proizvoda. Ovakva definicija vodi do jednostavne definicije termina „poboljšanje kvalitete“: Poboljšanje kvalitete je smanjenje varijabilnosti u procesima i proizvodima. Kvaliteta je tako jedna od ključnih mjera učinkovitosti koja može značajno utjecati na proizvođačevu konkurentnost (Montgomery, 2009.).

1.1 Postavljanje problema

Projektiranje proizvodnog sustava može utjecati na nastanak odstupanja procesa i odstupanje operacija (ukoliko ne postoji sposobnost da proizvod ili usluga konzistentno budu sukladni sa svojim definiranim oblikom) te samim time i na ukupno odstupanje kvalitete proizvoda. Previše bi bilo očekivati da proizvodni sustav jamči dobru kvalitetu loše projektiranog proizvoda. No, loše projektiran proizvodni sustav itekako može pokvariti kvalitetu čak i dobro projektiranog proizvoda. Projektiranje proizvodnih sustava je vrlo složen proces u kojem se nastoje obuhvatiti svi utjecajni čimbenici. Problemi koji se pri projektiranju javljaju predstavljaju stoga predmet neprestanih znanstvenih i praktičnih istraživanja. Osnovni cilj projektiranja je oblikovanje proizvodnog sustava koji osigurava traženu kvalitetu proizvodnje, ali uz uvijek izrazito pitanje ekonomičnosti, lake upravljivosti proizvodnim procesom, sigurnih rokova proizvodnje i cijelog niza drugih zahtjeva u svezi sa organizacijom i vođenjem proizvodnje. U postupku projektiranja je izrazito važna pravilna identifikacija i valorizacija utjecajnih čimbenika, posebno u ranoj fazi izrade projekta – pri definiciji koncepta proizvodnog sustava (Mikac, 1994.).

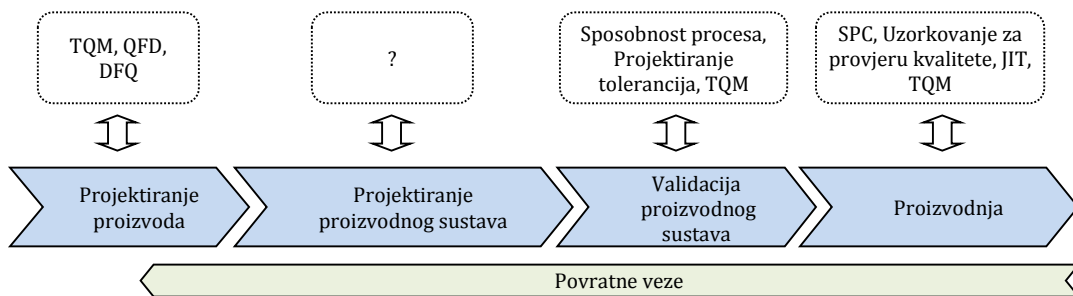
Mnogim znanstvenim istraživanjima pokušalo se istražiti kakva je veza između projektiranja proizvodnih sustava i proizvodnosti, a u cilju definiranja metoda za projektiranje proizvodnih sustava kojima će se moći proizvoditi više proizvoda uz korištenje manje ljudskih, materijalnih i prostornih resursa. S druge strane, od 1980-tih godina pojavila su se intenzivna istraživanja u području kvalitete kojima se prikazala njena važnost. Ta dva područja istraživanja, koja imaju različite ciljeve – proizvodnost i kvalitetu, intenzivno su istraživana u literaturi koja se bavi projektiranjem proizvodnih sustava no opseg literature koja se bavi njihovim presjekom još je uvijek vrlo skroman. Pri tradicionalnom projektiranju proizvodnih sustava jedini cilj je proizvodnost u mjerilima troškovi/proizvod ili radni-sati/proizvod. 1990-tih godina se počela

razmatrati mjera fleksibilnosti kao značajan cilj pri projektiranju proizvodnih sustava (De Toni i Tonchia, 1998.) te su tadašnja istraživanja bila usmjerena k stvaranju kompromisa proizvodnost/fleksibilnost. Inman et al. (2003.) su predložili treći cilj – kvalitetu, slika 1.2. Isti autori su prikazali nekoliko scenarija iz automobilske industrije kojima su prikazali da proces projektiranja proizvodnog sustava znatno utječe na konačnu kvalitetu proizvoda.



slika 1.2 Konkurirajući ciljevi projektiranja proizvodnih sustava (Inman et al., 2003.)

Tako slika 1.3 prikazuje samo osnovne procese koji se odvijaju pri plasiranju novog proizvoda na tržište s perspektive projektiranja i uloženi napori za postizanjem željene kvalitete proizvoda: proces projektiranja proizvoda, proces projektiranja proizvodnog procesa, proces validacije proizvodnog procesa i proces proizvodnje. Ti procesi se međusobno djelomično preklapaju te su međusobno povezani stalnim povratnim (korektivnim) vezama. Gornji dio slike prikazuje grubu kategorizaciju alata i tehnika za poboljšanje kvalitete na mjestima gdje su oni u interakciji s proizvodom ili proizvodnim sustavom.



slika 1.3 Primjena tehnika za poboljšanje kvalitete tijekom nekih od osnovnih procesa plasiranja novog proizvoda na tržište (Inman et al., 2003.)

Potpuno upravljanje kvalitetom (eng. *Total Quality Management, TQM*) je pristup upravljanju koji nastoji integrirati kvalitetu u sve procese plasiranja proizvoda na tržište. Pri projektiranju proizvoda, uz Potpuno upravljanje kvalitetom, primjenjuju se poznate metode kao što su razvijanje funkcije kvalitete (eng. *Quality Function Deployment, QFD*) te projektiranje za kvalitetu (eng. *Design For Quality, DFQ*). Razvijanje funkcije kvalitete je metoda translacije svih zahtjeva

korisnika nekog proizvoda u kvalitetu njegova projektiranja, kako bi se pri projektiranju proizvoda u njega implementirale sve funkcije koje čine kvalitetu proizvoda (Prasad, 1998.; Bode et al., 1998.; Kim et al., 1998.; Zholi, 1998.; Karsak et al., 2002.).

Pri validaciji proizvodnog sustava učestalo se koriste alati za poboljšanje kvalitete kao što su sposobnost procesa (eng. *process capability*) koja je detaljno obuhvaćena literaturom (Palmer et al., 1999.; Tang et al., 1999.; Wu et al., 2009.; Kaya et al., 2011.; Ball et al., 2011.) i projektiranje tolerancija (eng. *tolerance design*) (Hong i Chang, 2002.). Mnogi znanstveni radovi bave se poboljšanjem kvalitete u fazi proizvodnje (Venkatesan, 2003.; Ho et al., 2012.; Epprecht et al., 2013.). Primarno, sva se istraživanja o poboljšanju kvalitete u fazi proizvodnje oslanjaju se na statističku kontrolu procesa (eng. *Statistical Process Control, SPC*), istražuju uzorkovanje za provjeru kvalitete procesa ili proizvoda (Cochran, 1977., Deming, 1950.) i proizvodnju točno na vrijeme (eng. *Just-In-Time, JIT*) (Lau, 2000.).

Međutim, za proces projektiranja proizvodnog sustava postoji izraziti manjak literature koja se bavi alatima i tehnikama za poboljšanje kvalitete u ovoj fazi što je posljednjih godina otvorilo prostor stalnim istraživanjima ovog procesa i utjecaja odluka koje se donose prilikom projektiranja proizvodnog sustava na kvalitetu. Procjena utjecaja odluka donesenih pri projektiranju proizvodnog sustava na kvalitetu proizvoda u vrlo ranim fazama projektiranja proizvodnog sustava, tj. u njegovoj konceptualnoj fazi, može pomoći u postizanju željene kvalitete proizvoda po nižim troškovima. Promjene u konfiguraciji i opremi sustava su uvijek jeftinije kada su pravovremeno planirane i napravljene u ranim fazama projektiranja proizvodnog sustava nego kad se te promjene vrše naknadno tijekom faze proizvodnje.

Osim toga, sadašnja i buduća proizvodna okruženja su pod utjecajem čestih promjena tržišnih uvjeta i naglašenom personalizacijom proizvoda čime se nameće potreba rekonfiguracije proizvodnih sustava tijekom njihovog životnog ciklusa. U takvom okruženju, u ranim fazama projektiranja, konfiguriranja ili rekonfiguriranja proizvodnog sustava, projektanti razmatraju nekoliko alternativnih modela proizvodnih sustava. Pri tome je ključno korištenje alata i tehnika koje omogućuju usporedbu značajki pojedinih modela proizvodnog sustava, uključujući i očekivanu kvalitetu proizvoda.

1.2 Metodologija istraživanja

Tijekom istraživanja analizirat će se postojeća saznanja i suvremena istraživanja u polju projektiranja proizvodnih sustava s kvalitetom kao jednim od ciljeva projektiranja. Identificirat će se čimbenici projektiranog proizvodnog sustava koji utječu na kvalitetu kao i načini kontrole

proizvodnih procesa i proizvoda. Sintezom tih saznanja formirati će se praktično primjenjiva metoda projektiranja koncepta proizvodnog sustava s optimalnim kontrolnim podsustavom.

1.3 Sadržaj rada

U drugom poglavlju ovog rada promatrana je kvaliteta kao jedan od ciljeva projektiranja proizvodnih sustava s opsežnim pregledom dosadašnjih znanstvenih istraživanja tog područja. Razmatrani su segmenti ranih faza projektiranja proizvodnog sustava i kontrolnog podsustava te odnosi među njima. U trećem poglavlju su navedeni značajniji doprinosi i inovacije protekle iz evolucije proizvodnih sustava, okarakterizirane osnovne vrste danas najčešće korištenih proizvodnih sustava i trendovi u industrijskoj proizvodnji. Treće poglavlje sadrži i kratki pregled metoda i sistematika projektiranja složenih proizvodnih sustava. U četvrtom poglavlju opisni su dominantni modeli proizvodni sustava te njihove značajke. Isto poglavlje sadrži pregled osnovnih načela na kojima se zasniva projektiranje rekonfigurabilnih proizvodnih sustava. Peto poglavlje opisuje statističku kontrolu procesa kao snažan skup alata korisnih za uspostavljanje i poboljšavanje sposobnosti procesa kroz smanjivanje varijabilnosti u proizvodnim procesima. U šestom poglavlju se razmatraju strategije kontrole kvalitete te moguće redukcije složenih modela propagacija varijabilnosti u serijsko-paralelnim višesegmentnim proizvodnim procesima. Sedmo poglavlje opisuje novu metodu projektiranja proizvodnih sustava s optimalnim kontrolnim podsustavom kojim se osim proizvodnosti i fleksibilnosti promatra i kvaliteta kao jedan od ciljeva rane faze projektiranja proizvodnog sustava. Osmo poglavlje sadrži prikaz metode na konkretnom primjeru ranog projektiranja koncepta proizvodnog sustava te komentare i usporedbu rezultata s poznatom metodom projektiranja rekonfigurabilnih proizvodnih sustava.

1.4 Očekivani znanstveni doprinos istraživanja

Odluke koje se donose prilikom projektiranja proizvodnih sustava utječu i na kvalitetu proizvoda. Jedan od ciljeva istraživanja je identifikacija i analiza utjecaja odluka donesenih u ranoj fazi projektiranja proizvodnih sustava kao čimbenika kvalitete proizvoda. Istraživanje će očekivano donijeti detaljan pregled dosadašnjih znanstvenih istraživanja na temu projektiranja proizvodnih sustava s kvalitetom kao jednim od ciljeva projektiranja ali i rezultirati definiranjem znanstveno zasnovane metode za projektiranje optimalnog konceptualnog modela kontrolnog podsustava. Promatranje kontrolnog podsustava u ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava rezultira formiranjem dodatnog seta značajki koji opsežnije definiraju konceptualni model proizvodnog sustava od tradicionalnih metoda projektiranja koje kontrolni podsustav promatraju tek u kasnim fazama projektiranja. Time je moguće uz manji broj iterativnih postupaka, a time i očekivano

manje troškova, osigurati potrebne uvjete za održavanje povoljne razine kvalitete u proizvodnom sustavu.

1.5 Hipoteza istraživanja

Istraživanja projektiranja proizvodnih sustava koji imaju značajke rekonfigurabilnosti vrlo su aktualna posljednjih godina no uglavnom kao ciljeve projektiranja imaju proizvodnost odnosno promjenjivost sustava (Koren, 2002; Spicer et al., 2005.; ElMaraghy, 2006.; Koren i Shiptalni, 2010.).

Nada et al. (2006.) su predložili sustav neizrazite logike za izračun indeksa sposobnosti konfiguracije (ISK) kao vrijednosti kojom proizvodne organizacije mogu procijeniti očekivanu razinu kvalitete novo projektiranih proizvodnih sustava i na taj način donositi ispravne odluke u ranoj fazi projektiranja proizvodnih sustava. Kao jednu od ulaznih varijabli za izračun ISK, autori koriste neizrazitu varijablu pogreške provjere (eng. *inspection error*), koja predstavlja razinu prosječne vjerojatnosti nastanka pogreške pri izvođenju kontrolnih postupaka, a određena je subjektivnom procjenom projektanata. Takav pristup je prikladan za koncepte proizvodnih sustava u kojima se predviđa 100%-tna provjera kvalitete izradaka u proizvodnom procesu no ni na koji način ne obuhvaća vjerojatnosti pogrešne procjene pri statističkoj kontroli procesa.

Hipoteza: Uvođenjem nove neizrazite varijable statističke pogreške provjere kao ulazne varijable za izračun indeksa sposobnosti konfiguracije, omogućuje se oblikovanje optimalnog konceptualnog modela kontrolnog podsustava potrebnog da bi se dosegla ciljana vrijednost indeksa sposobnosti konfiguracije sustava.

Pri tome se pretpostavlja da kontrolni podsustav koristi \bar{x} kontrolne karte za praćenje varijabli te da proizvodna organizacija prati i održava bazu podataka o sigma razinama svojih proizvodnih procesa kao i o događajima koji su u prošlosti utjecali na kvalitetu. Novo razvijena metoda projektiranja koja uključuje i projektiranje konceptualnog modela kontrolnog podsustava može već u ranoj fazi projektiranja koncepta proizvodnog sustava pružiti podatke o očekivanim potrebnim naporima za održavanje povoljne razine kvalitete u fazi proizvodnje te tako proširiti do sada poznate kriterije za odabir koncepta proizvodnog sustava.

1.6 Primjena rezultata istraživanja

Rezultati i spoznaje dobiveni ovim znanstvenim istraživanjem biti će praktično primjenjivi kod projektiranja novih proizvodnih sustava ali i rekonfiguraciji postojećih. Očekuje se da predložena metoda omogući optimalni izbor varijante proizvodnog sustava s mogućnošću usporedbe razine

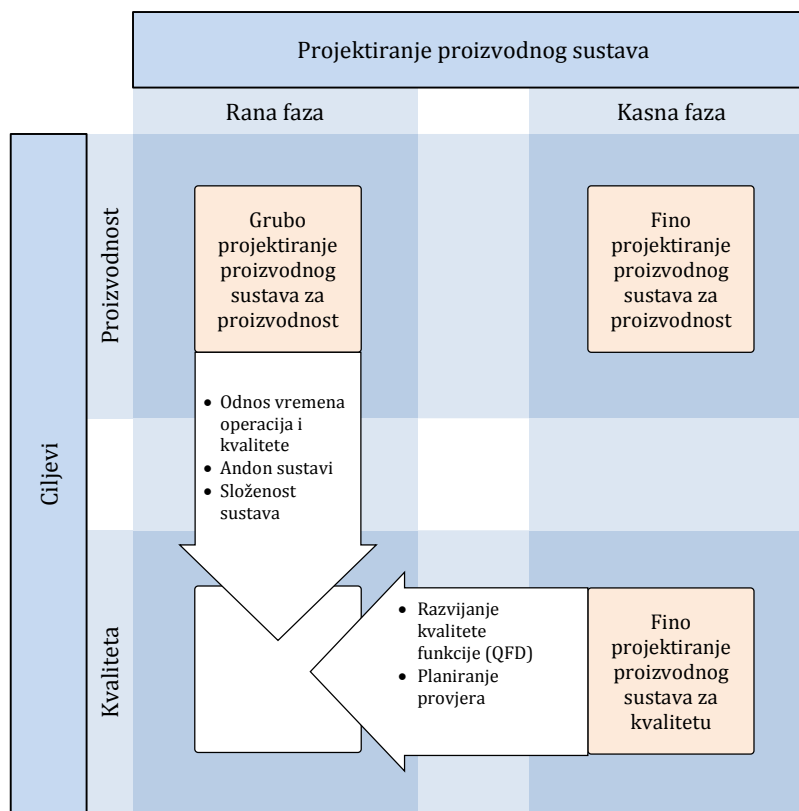
kvalitete za svaku varijantu proizvodnog sustava. Dok tradicionalni pristupi projektiranju proizvodnog sustava razmatraju kvalitetu kao posljedicu odluke o odabranoj varijanti proizvodnog sustava, metoda razmatrana u ovom radu promatra kvalitetu kao jednim od kriterija za odabir varijante proizvodnog sustava.

2 KVALITETA KAO CILJ PROJEKTIRANJA PROIZVODNIH SUSTAVA

Pregled područja dosadašnjih znanstvenih istraživanja projektiranja proizvodnih sustava koja za cilj imaju i kvalitetu, prikazan je u nastavku, slika 2.1. Slika prikazuje matricu dimenzija 2×2 kojom je prikazan kontekst područja istraživanja. Dva stupca matrice prikazuju dvije faze projektiranja proizvodnog sustava. U ranoj fazi vrši se grubo projektiranje kojim se definiraju proizvodni tokovi, razvija proizvodni sustav te vrednuju varijante proizvodnog sustava i izabire rješenje dok se u kasnijoj fazi vrši fino projektiranje kojim se detaljiziraju pojedine operacije u proizvodnom sustavu, planira radno osoblje te izrađuje plan realizacije. Dva reda matrice predstavljaju dva odvojena cilja projektiranja proizvodnih sustava: proizvodnost i kvalitetu. Značajan broj dosadašnjih istraživanja odnosi se na područja označena tamnijom nijansom: grubo projektiranje proizvodnog sustava za proizvodnost, fino projektiranje proizvodnog sustava za proizvodnost i fino projektiranje proizvodnog sustava za kvalitetu. Vertikalna strelica predstavlja potencijalne doprinose kojima se pri grubom projektiranju proizvodnog sustava može razmatrati i kvaliteta. Horizontalna strelica predstavlja doprinose kojima se usvojena znanja iz područja kontrole kvalitete usvojenih i implementiranih proizvodnih sustava mogu primijeniti pri donošenju odluka u ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava.

Ukoliko se postavi hipoteza da se kvaliteta može poboljšati ako ju se razmatra već pri izradi koncepta proizvodnog sustava, zanimljivo je promatrati odnose između aktivnosti koje se događaju unutar dvaju procesa projektiranja: projektiranja konceptualnog modela proizvodnog sustava i projektiranja konceptualnog modela kontrolnog podsustava, slika 2.2. Pri tome je zanimljivo pratiti utjecaj djelovanja pojedinog procesa projektiranja na dva različita cilja projektiranja: proizvodnost i kvalitetu. Pri tome je potrebno promatrati kakav je utjecaj

projektiranja proizvodnog sustava na kvalitetu s jedne strane te kakav je utjecaj projektiranja kontrolnog podsustava na proizvodnost s druge strane.



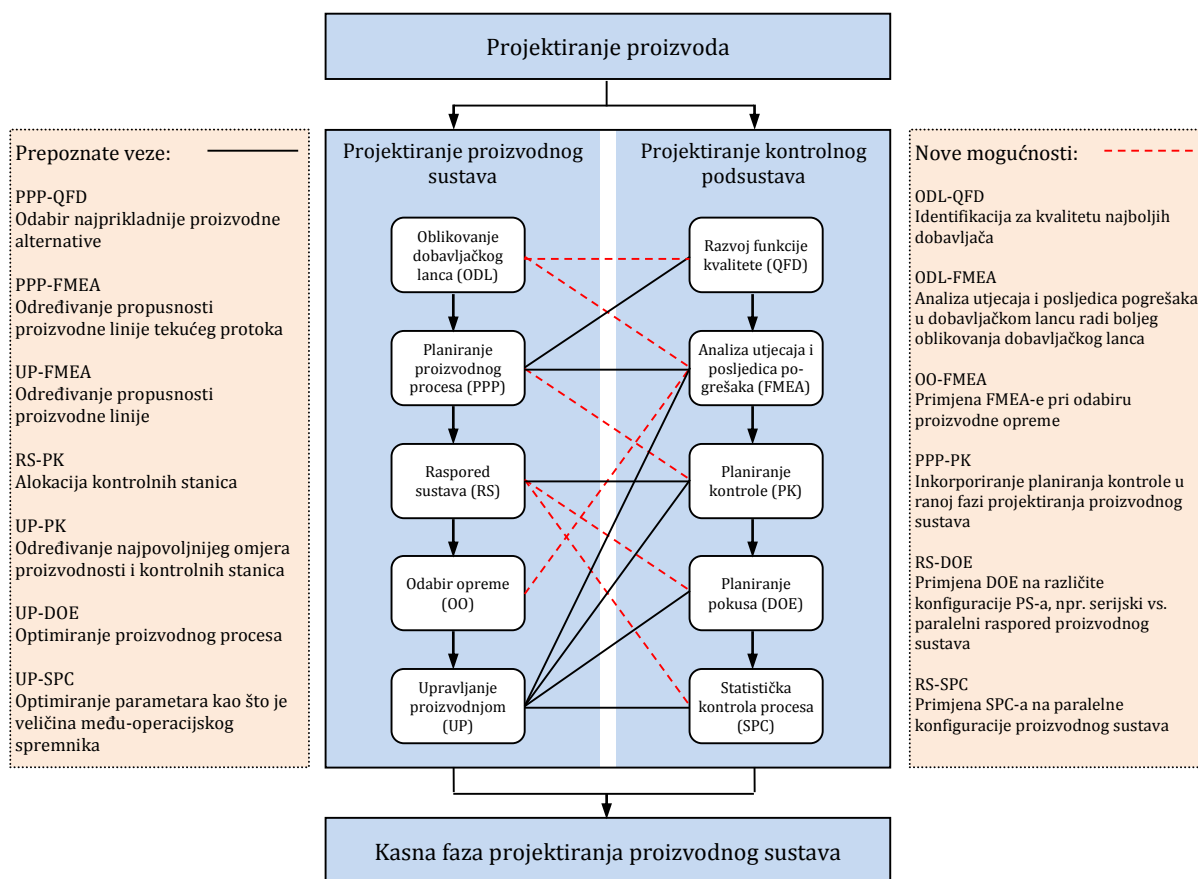
slika 2.1 Popunjavanje područja vrijednog istraživanja na diobi projektiranja proizvodnih sustava i kontrole kvalitete (Inman et al., 2013.)

2.1 Projektiranje proizvodnog sustava za kvalitetu

Ovaj naslov sadrži pregled znanstvenih istraživanja u području projektiranja proizvodnih sustava, u kojima je razmatrana kvaliteta kao jedan od ciljeva projektiranja. Inman et al. (2013.) su ovo područje istraživanja podijelili u pet kategorija: oblikovanje dobavljačkog lanca, planiranje proizvodnog procesa, raspored sustava, odabir opreme i upravljanje proizvodnjom.

2.1.1 Oblikovanje dobavljačkog lanca

Širi pogled na proces projektiranja proizvodnog sustava uključuje i oblikovanje dobavljačkog lanca koje počinje s odabirom dobavljača. Li i Warfield (2011.) su istražili pitanja koordinacije osiguranja kvalitete u dobavljačkim lancima. Kvaliteta je dugo vremena bitan kriterij kod odabira dobavljača te je kao takva dobro popraćena znanstvenim istraživanjima (Lo i Yeung, 2006.). Xu, (2011.) zaključuje da je kod projektiranja dobavljačkog lanca, a u cilju poboljšanja kvalitete, izrazito bitna implementacija naprednih informatičkih sustava.



slika 2.2 procesi rane faze projektiranja proizvodnog sustava i projektiranja kontrolnog podsustava (Inman et al., 2013.)

2.1.2 Planiranje proizvodnog procesa

Planiranje proizvodnog procesa je rani korak u projektiranju proizvodnog sustava. Detaljna razrada tehnoloških postupaka obrade za cjelokupni asortiman izradaka iziskuje uz neophodno iskustvo projektanata i veliki utrošak vremena, pa nije ni ekonomski ni funkcionalno pogodna u ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava (Mikac, 1994.). U ovoj se aktivnosti vrši planiranje tehnološkog procesa tj. sistematično određuje redoslijed operacija u kojima će se vršiti proizvodnja, a kojima se osiguravaju proizvodnost i kvaliteta (Huang i Liu, 2003.). Zhang et al. (1996.) su razmatrali važnost oblikovanja proizvodnog procesa za kontrolu tolerancija i predložili grafički pristup generiranja redoslijeda operacija s obzirom na zadane tolerancije. Mantripragada i Whitney (1998.) su predložili koncept „povezanog lanca bazi“ (eng. *datum flow chain*) kojima se pružaju podaci za analizu tolerancija u određenom redoslijedu operacija. Liu et al. (2009.) su predložili metodu za oblikovanje učinkovitog redoslijeda operacija koji u obzir uzima i kvalitetu dok su Nada et al. (2006.) razvili indeks sposobnosti konfiguracije proizvodnog sustava kao pokazatelj očekivane razine kvalitete proizvodnog sustava.

2.1.3 Raspored sustava

Područje koje je vrijedno razmatranja nakon oblikovanja proizvodnog procesa je raspored sustava. Pošto raspored sustava često utječe na njegovu fleksibilnost i robusnost, može se raspravljati o proizvodnoj fleksibilnosti, kompleksnosti te robusnosti.

2.1.3.1 Proizvodna fleksibilnost

Proizvodna fleksibilnost je sposobnost izrade nekoliko različitih proizvoda u jednom proizvodnom sustavu bez prekida u proizvodnji nastalih zbog različitosti proizvoda. Fleksibilnost omogućava visoku prilagođenost proizvodnog sustava uz visok stupanj njegove iskoristivosti. Većina proizvodnih tvrtki tretira kvalitetu kao konstantu i nastoji povećati fleksibilnost u slučajevima kada to ne utječe negativno na kvalitetu (Hallgren et al., 2011.). Nekoliko znanstvenih istraživanja indicira da fleksibilnost može poboljšati kvalitetu (Weber, 2004.) pa tako i Kochan (2005.) piše o tome kako je BMW investirao u dodatne robote kako bi poboljšao fleksibilnost i kvalitetu, istovremeno. Inman (2003.) je sugerirao kako fleksibilnost može utjecati na kvalitetu ali bez daljnje analize kakav je njihov međusobni utjecaj. Li i Huang (2007.) su koristili markovljeve¹ lance kako bi istražili odnos između fleksibilnosti i kvalitete proizvoda.

2.1.3.2 Proizvodna kompleksnost

Globalizacija i sve veća potražnja za velikom raznolikosti proizvoda i njihovom funkcionalnošću unosi sve veću kompleksnost u proizvodne sustave. Iako postoji više definicija proizvodne kompleksnosti ona obično uključuje više-proizvodne proizvodne sustave, velik broj različitih materijala na jednoj lokaciji i složenu mrežu dobave materijala. Pri istraživanju utjecaja kompleksnosti na kvalitetu značajna pozornost u literaturi je posvećena utjecaju operatera opreme. Studije pokazuju kako operateri imaju tendenciju više griješiti ukoliko rade u sustavu u kojem im njihov posao omogućava veći spektar odluka kao što su odluke povezane s alatima, izradcima, postupcima i sličnim aktivnostima (Wang et al., 2010., Abad et al., 2011.). Bozarth et al. (2009.) su zaključili kako unutarnja složenost proizvodnog sustava (uključujući broj proizvoda, vrste procesa, stabilnost vremenskog rasporeda aktivnosti) negativno utječu na svojstva proizvodnosti (konkurentnost i zadovoljstvo kupca/korisnika). Huang i Inman (2010.) su analizirali negativan utjecaj kompleksnosti automobilske tvornice na kvalitetu i istražili kako kompleksnost utječe na rad sustava za montažu automobila.

2.1.3.3 Robusnost

Robusnost je važna stavka istraživanja projektiranja proizvodnih sustava. Fluktuacije u

¹ Markovljevi procesi su oni stohastički procesi čije buduće stanje ovisi samo o trenutnom stanju. To svojstvo zove se svojstvom odsustva pamćenja (eng. *memoryless property*). U svakome trenutku sustav može preći u neko novo stanje ili može ostati u istome stanju. Promjene stanja nazivaju se tranzicije. Ako slijed stanja ima Markovljevo svojstvo to znači da je svako buduće stanje vremenski neovisno o svakome prijašnjem stanju.

operacijama mogu štetiti kvaliteti proizvoda, a robusno projektiran proizvodni sustav teži minimiziranju takve štete. U fazi projektiranja proizvodnog sustava, mnogi parametri su ili netočni ili nepoznati. Li et al. (2008.) su uveli pojam robusnosti kvalitete u proces projektiranja proizvodnih sustava i analizirali utjecaj slučajne varijable u popravku i reparaciji pojedinih operacija. Rezultate su koristili kako bi osigurali robusnost putem identifikacije parametara koji najviše utječu na kvalitetu.

2.1.4 Odabir opreme

Odabirom opreme proizvodnog sustava određuju se operativne karakteristike strojeva i njihova pouzdanost čime se može izvršiti i izravni utjecaj na kvalitetu. Različiti proizvodi u proizvodnom sustavu mogu imati različita vremena ciklusa izrade što rezultira različitim odnosima između proizvodnosti i kvalitete. Većina opreme je podložna nastanku pogreške što može dovesti do pojave defektivnih proizvoda, a time i proizvodnih gubitaka.

2.1.4.1 Ciklus izrade

Odnos između ciklusa izrade i kvalitete identificiran je kao važan parametar pri projektiranju proizvodnih sustava (Khouja et al., 1995., Mehrez et al., 1996.). U literaturi je prepoznat i utjecaj ciklusa izrade na proizvodnost te se navodi kako njegovo povećanje može povećati proizvodnost ali i naštetiti kvaliteti ukoliko je takvo povećanje preveliko (Dallery et al., 1992.).

2.1.4.2 Nedostaci u proizvodnim sustavima

U proizvodnim sustavima mogu se pojaviti dvije vrste nedostataka: nedostaci u operativnom izvođenju proizvodnih procesa i nedostaci u kvaliteti izradaka. Nedostaci u operativnom izvođenju procesa odnose se na ispađe ili nepravilnosti rada opreme sustava, dok se nedostaci u kvaliteti odnose na proizvodnju izradaka koji nisu sukladni sa zahtjevima propisanim tehničkom dokumentacijom. Te dvije vrste nedostataka imaju različite karakteristike i rezultiraju drugačijim ponašanjem sustava. Npr. povećanje proizvodnosti ili dodavanje među-operacijskih spremnika mogu pomoći da se prebrode nedostaci u operativnom izvođenju procesa ali time se mogu pogoršati nedostaci kvalitete. Nedostaci u kvaliteti izradaka mogu dovesti do kontinuirane proizvodnje defektivnih proizvoda prije otkrivanja nedostataka i uklanjanja uzroka pogreške. U tom slučaju, veća proizvodnost ili veći kapacitet među-operacijskih spremnika mogu biti štetni za ukupnu proizvodnju proizvoda zadovoljavajuće kvalitete. Kim (2005.) je proveo istraživanje i analizu međusobnog utjecaja projektiranja proizvodnog sustava, kvalitete i proizvodnosti. Kim i Gershwin (2005.) su razvili model markovljevih lanaca za dva stroja koji su kao jedan sustav pod utjecajem oba nedostatka: nedostatka u operativnom izvođenju procesa i nedostatka u kvaliteti izratka. Kim i Gershwin (2008.) su proširili takav model razvivši aproksimativnu metodu za

analizu većih proizvodnih sustava te analizirali smještaj kontrolnih stanica u proizvodnim sustavima.

2.1.5 Upravljanje proizvodnjom

Upravljanje proizvodnjom kroz proces stalnih poboljšanja može utjecati na kvalitetu proizvoda. Poboljšanja se mogu postići ublažavanjem uskih grla kvalitete. Primjeri poboljšanja su brojni: implementacija Andon sustava kojima je moguće ispravljati pogreške na proizvodnoj liniji, podjela proizvodnih količina na sekvence kako bi se izbjegli negativni efekti promjena (pripreme/raspreme) proizvodnog sustava, upravljanje radnim osobljem u cilju sprječavanja varijabilnosti uzrokovanih odsustvom radnika, planiranje učinkovitog preventivnog održavanja u cilju ublažavanja odstupanja opreme od njihove nominalne funkcije i režima rada (ublažavanja kvarenja opreme) i sl.

2.1.5.1 Uska grla kvalitete

Kao i uska grla proizvodnje, i uska grla kvalitete su područja vrijedna istraživanja. Sa stajališta proizvodnog procesa, usko grlo kvalitete je element procesa (operacija, odnos, zahvat, sekvenca, postupak provjere ili bilo koji drugi mjerljivi parametar) koji najviše utječe na kvalitetu proizvoda. Poboljšavanje elementa uskog grla vodi do najvećeg poboljšanja kvalitete proizvoda naspram poboljšavanja ostalih elemenata koji utječu na kvalitetu. Wang i Li (2009.) su istražili utjecaj cjelokupnog proizvodnog procesa na kvalitetu proizvoda podjelom proizvodnog procesa na sekvence i određivanjem sekvence uskog grla kvalitete koja predstavlja upravo onu sekvencu proizvodnog procesa koja najviše utječe na konačnu kvalitetu proizvoda.

2.1.5.2 Andon sustavi

Andon je japanska izvedenica riječi koja označava vizualnu kontrolnu napravu za praćenje kvalitete u proizvodnom sustavu. Andon signalna veza na radnom mjestu omogućava operaterima i ostalim radnicima da prijave zahtjev za pomoć u slučaju nastanka problema. U svojoj analizi, Li i Blumenfeld (2006.) su istražili koristi *Andon* sustava i definirali uvjete za njegovo uspješno korištenje te definiraju pravila za upravljanje operacijama u proizvodnim sustavima.

2.1.5.3 Podjela proizvodne količine na lotove

U literaturi se velik broj istraživanja fokusira na podjelu proizvodnih količina na lotove kako bi se povećala proizvodnost. Mnogi znanstveni radovi promatraju podjelu proizvodnih količina na lotove prvenstveno kako bi se minimizirala vremena i troškovi pripreme i raspreme opreme proizvodnog sustava. Tek poneki znanstveni rad se bavi tematikom podjele proizvodne količine na sekvence u cilju poboljšanja kvalitete. Cao et al. (2009.) su istražili utjecaj ukupnog ciklusa izrade u proizvodnim ćelijama na kvalitetu te zaključili kako dulji ukupni ciklus izrade pozitivno

utječe na kvalitetu, a spajanje manjih sekvenci u veće može produljiti ciklus izrade i tako pozitivno utjecati na kvalitetu.

2.1.5.4 *Planiranje preventivnog održavanja*

Planiranje održavanja može poboljšati proizvodnost i kvalitetu. Većina istraživanja vezana za preventivno održavanje fokusirana je na proizvodnost, dok se samo neka bave i pitanjem kvalitete (Radhoui et al., 2009., Dhouib et al., 2012.). Colledani i Tolio (2012.) su predložili teoriju koja obuhvaća preventivno održavanje kako bi se analizirao proizvodni sustav s progresivnim gubitkom kvalitete proizvodne opreme.

2.2 **Kontrola kvalitete proizvodnih sustava**

Istraživanja kontrole kvalitete mogu se generalno podijeliti u dva područja: istraživanja kontrole kvalitete proizvoda i istraživanja kontrole kvalitete proizvodnih sustava. Prvo područje je intenzivno pokriveno znanstvenim istraživanjima, za razliku od potonjeg. Istraživanja kontrole kvalitete proizvodnih sustava mogu se nadalje u grubo podijeliti u pet sekvenci: razvoj funkcije kvalitete, analiza utjecaja i posljedica pogrešaka, planiranje provjera, planiranje pokusa i statistička kontrola procesa (Inman et al., 2013.).

2.2.1 **Razvoj funkcije kvalitete (QFD)**

Razvoj funkcije kvalitete (eng. *Quality Function Deployment*, QFD) je metoda translacije korisničkih zahtjeva i potreba u funkciju proizvoda (pri projektiranju proizvoda) koju je moguće prenijeti u funkcije proizvodnog procesa pri projektiranju proizvodnog procesa. Chen et al. (2006.) su pristupom neizrazite logike primijenili QFD na projektiranje fleksibilnog proizvodnog sustava. Kako je prikazano (slika 2.2), QFD je primjenjiva u segmentu planiranja proizvodnog procesa (Lowe et al., 2000.). Hassan et al. (2010) su primijenili QFD kako bi odabrali alternativne varijante proizvodnog procesa te zatim primijenili analizu utjecaja i posljedica pogrešaka kako bi odredili proces s najvećim odnosom kvalitete i troškova.

2.2.2 **Analiza utjecaja i posljedica pogrešaka (FMEA)**

Često korišten korak u planiranju kvalitete proizvodnih procesa uz QFD je analiza utjecaja i posljedica pogrešaka (eng. *Failure Mode and Effects Analysis*, FMEA). Almannai et al. (2008.) su objedinili QFD (da bi identificirali najbolje varijante proizvodnog sustava) i FMEA-u (da bi procijenili rizik svake varijante) kao alat za donošenje odluka pri projektiranju proizvodnog sustava. Padiyar et al. (2006.) su opisali sustav kretanja informacija u lancima dobave koji se zasniva na FMEA-i, a cilj mu je smanjivanje količine nesukladnih proizvoda. Belmansour i Nourelfath (2010.) su predstavili metodu za određivanje propusnosti osnovnih proizvodnih

sustava. Autori pri tome tretiraju stanje u kojem se pojavljuje određeni nedostatak kvalitete izratka kao jedno posebno stanje stroja. Kako je prikazano na slici 4.2, FMEA može imati značajnu ulogu pri planiranju proizvodnog procesa (PPP) i upravljanju proizvodnjom (UP) te njena implementacija u tim segmentima može doprinijeti boljoj kvaliteti i proizvodnosti proizvodnog sustava.

2.2.3 Planiranje kontrole

Planiranje kontrole (PK) kvalitete je popularna tema istraživanja te postoji značajan broj istraživanja koji integriraju planiranje kontrole kvalitete s rasporedom sustava (RS-PK) i s upravljanjem proizvodnjom (UP-PK), slika 2.2. Mandroli et al. (2006.) su napravili pregled istraživanja koja se bave određivanjem broja i lokacija kontrolnih stanica. Autori su zaključili da se svi napori prethodnih istraživanja o osiguranju kvalitete svode na dvije strategije:

- strategiju osiguranja kvalitete orijentiranu prema provjerama kvalitete
- strategiju osiguranja kvalitete orijentiranu prema dijagnostici proizvodnog sustava.

Velik broj istraživanja ovih dvaju strategija proveden je neovisno, bez puno preklapanja između njih. Strategijom osiguranja kvalitete orijentiranom prema provjerama pokušava se odrediti ekonomski isplativa razina provjera balansirajući između različitih vrsta troškova aktivnosti koji su vezani za provjere (popravke, zamjene,...) te troškove reklamacija ukoliko je nesukladan proizvod isporučen korisniku. Ovakvom strategijom se zapravo pokušavaju minimizirati svi proizvodni troškovi koji su povezani s procjenom kvalitete i posljedicama nedostatka kvalitete. Iako strategija osiguranja kvalitete koja je orijentirana prema provjerama potencijalno poboljšava kvalitetu proizvoda koji se isporučuju korisniku, njome se zapravo ne poboljšava ukupna kvaliteta proizvoda tj. ničime se ne utječe na uzročne procese koji utječu na kvalitetu. Varijabilnosti u uzročnim procesima obično nisu izravno uočljive pa tako zaključivanje o njihovim veličinama mora biti bazirano na podacima koji se prikupljaju mjernim sensorima, a kako bi se odredile varijable koje uzrokuju nedostatak kvalitete (Mandroli et al., 2006.).

Umjesto takvog minimiziranja ukupnih troškova, strategijom osiguranja kvalitete orijentiranom prema dijagnostici sustava promatra se postavljanje točno određenog konstantnog broja senzora u proizvodni sustav te se vrši potraga optimalnog načina njihove distribucije u sustavu. Takva strategija se zato naziva još i strategijom osiguranja kvalitete orijentirana na distribuciju senzora. Praktičnu važnost određivanja broja i lokacija kontrolnih stanica kao aktivnosti koja se nalazi na presjeku projektiranja proizvodnog sustava i projektiranja kontrolnog sustava prikazao je Greimel (2011.) izvijestivši kako je Hyundai Motor Company povećao broj kontrolnih stanica na montažnim linijama kako bi poboljšao kvalitetu.

2.2.4 Planiranje pokusa (DOE)

Planiranje pokusa (eng. *Design Of Experiments*, DOE) je povezano s finim projektiranjem kontrolnog podsustava (kasnom fazom projektiranja kontrolnog podsustava). Pokusi u proizvodnom procesu se provode kako bi se analizom pokusnih podataka odredili ključni parametri procesa koji utječu na kvalitetu. Taguchi (1986.) je razvio robustan pristup planiranja pokusa s ciljem kontrole parametara pokusa kako bi se eliminirala osjetljivost sustava na nekontrolirane varijacije (šum). Wazed et al. (2011.) su primijenili Taguchijev pristup planiranja pokusa na proizvodni sustav s više operacija.

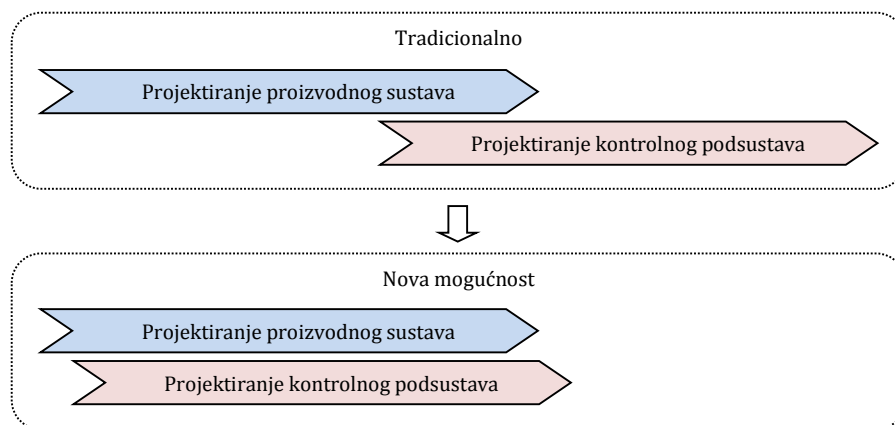
2.2.5 Statistička kontrola procesa (SPC)

S razvojem senzorske tehnike, automatsko prikupljanje podataka postalo je vrlo učestalo u proizvodnim sustavima. Automatskim prikupljanjem podataka je omogućena primjena statističkih metoda za praćenje kvalitete i detektiranje promjena. Statistička kontrola procesa (eng. *Statistical Process Control*, SPC) je vrlo dobro istraženo područje u kojem se različitim vrstama kontrolnih karti prati kvaliteta proizvoda i detektiraju promjene. Montgomery (2009.) je napravio opsežni pregled alata i tehnika statističke kontrole procesa. Projektiranje kontrolnih karti kao alata statističke kontrole procesa uključuje donošenje odluka o njihovim parametrima kao što su veličina uzorka, učestalost uzorkovanja i kontrolne granice. Kontrolne karte se mogu koristiti za praćenje pojedine karakteristike kao i više korelirajućih karakteristika, pomake srednjih vrijednosti kao i promjene varijanci i kovarijanci. Učinkovitost statističke kontrole procesa obično se određuje putem prosječne duljine protoka (eng. *Average Run Length*, ARL) kao pokazatelja vremena potrebnog kontrolnoj karti da detektira pomak u procesu nakon što se pomak dogodi.

Iako je za očekivati da SPC utječe osim na kvalitetu i na proizvodnost, to područje nije detaljno pokriveno u literaturi. Iako, posljednje studije analiziraju i utjecaj SPC-a na proizvodnost. Tako su Colledani i Tolio (2006., 2011.) predložili analitičke metode za određivanje performansi proizvodnih sustava praćenih statističkom kontrolom procesa. Isti autori, Colledani i Tolio (2009.) su se fokusirali na statističku kontrolu procesa s neizravnim (*offline*) uzorkovanjem i analizom podataka izvan proizvodnog sustava. Jedno od njihovih saznanja je da veći kapacitet među-operacijskih spremnika ne mora nužno dovesti do veće propusnosti izradaka zadovoljavajuće kvalitete što je suprotno prethodnom razumijevanju ove problematike koja je podrazumijevala veću propusnost izradaka zadovoljavajuće kvalitete s povećanjem veličine među-operacijskih spremnika. Takvi rezultati ostavljaju mogućnosti traženja optimalne veličine među-operacijskog spremnika kojim se postiže najveća moguća propusnost izradaka zadovoljavajuće kvalitete. Ova istraživanja mogu se pripisati vezi UP-SPC, slika 2.2.

2.3 Mogućnosti daljnje integracije projektiranja

Kako su zaključili Inman et al. (2013.), postoji širok spektar mogućnosti integracije elemenata koji čine projektiranje proizvodnog sustava i projektiranje kontrolnog podsustava, kako proširivanjem dosadašnjih istraživanja, tako i istraživanjem novih, dosad neistraženih veza. Autori predlažu da se istraže načini kako bi bilo moguće projektiranje kontrolnog podsustava vršiti simultano s projektiranjem proizvodnog sustava, umjesto nakon projektiranja proizvodnog sustava, slika 2.2. Kako je ranije navedeno, promjene u sustavu su uvijek jeftinije kada su one učinjene u ranim fazama projektiranja sustava, u usporedbi s promjenama tijekom faze proizvodnje. Time je značaj simultanog projektiranja kojim se može skratiti ukupno vrijeme projektiranja još veći. Pored navedenog, primjetno je da uz područja istraživanja kontrolnog podsustava još uvijek postoje elementi koje uopće nisu razmatrani: dijagnoza korijenskog uzroka pogreške, definiranje tolerancija, odabir i alokacija senzora te pouzdanost i vremenski raspored održavanja opreme. Integracijom dva procesa projektiranja, proizvodnog sustava i kontrolnog podsustava kao njegovog sastavnog elementa na taj se način mogu odvijati paralelno. slika 2.3.



slika 2.3 Istraživanja mogućnosti simultanog projektiranja

3 POLAZNE OSNOVE

3.1 Industrijska proizvodnja – stanje i trendovi

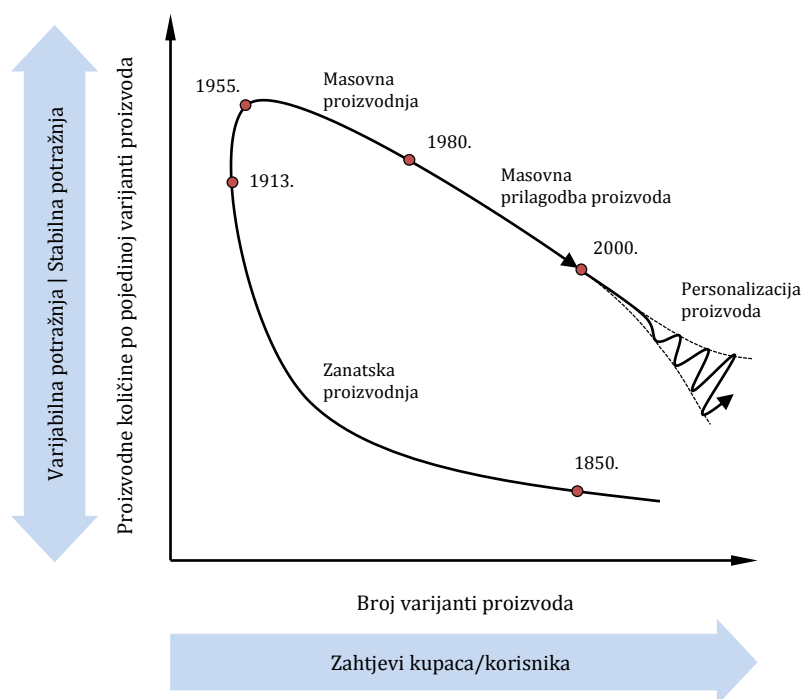
Društvene i tržišne promjene uvjetuju kreiranje novih poslovnih modela. Poslovni modeli mogu biti takvi da se oslanjaju na neke postojeće, poznate proizvodne paradigme ili se zbog uvjeta njihovog održanja oslanjaju na potpuno nove proizvodne paradigme, slika 3.1. Proizvodna paradigma predstavlja revolucionarni, novi i integrirani proizvodni model koji nastaje kao reakcija na promjene tržišnog i društvenog okruženja, a ostvaruje se kreiranjem novog tipa proizvodnog sustava (Koren, 2010.).

Kod zanatske, manufakturne proizvodnje, čovjek je bio ključni faktor i oblika proizvoda i načina njegove izrade. Proizvodi su bili izrađivani u malim količinama, ručno i prema narudžbi za točno određenog kupca. Kvalitetu i ostale karakteristike pojedinog proizvoda određivao je individualni zahtjev kupca. U vrijeme industrijske proizvodnje postepeno se razvijalo tržište, pa je postepeno bilo moguće proizvoditi veću količinu proizvoda za širu tržišnu upotrebu. Iako su se proizvodne količine povećavale, sama proizvodnja i je dalje ovisila o majstorima. No daljnjim povećanjem proizvodnih količina, pri proizvodnji kompleksnijih proizvoda, postali su evidentni problemi koordinacije i upravljanja različitim aktivnostima u okviru proizvodnog procesa te se razvija koncept pokretne linije u kojoj je svaki radnik odgovoran za pojedinačan posao ili operaciju pri izradi proizvoda, neovisno o ostalim radnicima u proizvodnoj liniji. Takav je koncept bio osnova masovne proizvodnje. Osamdesetih godina 20. stoljeća na razvoj proizvodnje ponovno je utjecao razvoj tržišta koje je postajalo sve osjetljivije te doživljavalo velike promjene. Tendencije promjena su se očitovala u povećanju kompleksnosti proizvoda i povećanju broja različitih varijanti proizvoda uz istovremeno skraćivanje njihovog životnog ciklusa.

U prošlosti se, odmah nakon plasiranja određenog proizvoda na tržište, promatrao stalan porast

proizvodnih količina tog proizvoda nakon kojeg je slijedilo dugo i stabilno razdoblje ujednačenih proizvodnih količina, a nakon kojeg je konačno slijedilo postupno smanjenje i konačno gašenje proizvodnje. Danas potrebne proizvodne količine rastu mnogo brže do svoje prve vršne vrijednosti, a tada padaju i nakon dodatnih promocijskih aktivnosti ili redizajna proizvoda dosežu svoju drugu vršnu vrijednost. Vrlo brzo, uglavnom zbog plasiranja nove generacije proizvoda, dolazi do naglog pada proizvodnih količina. Pored toga, u prošlosti je očekivani životni vijek proizvoda bio aproksimativno jednak radnom vijeku proizvodne opreme i tehnoloških procesa. Sa sve zahtjevnijim tržištem koje zahtjeva učestaliju promjenu proizvoda, od proizvodnih sustava se očekuje da proizvode trenutnu generaciju ali i nekoliko idućih generacija proizvoda.

Industrijsku proizvodnju početka 21. stoljeća karakterizira i rastuća personalizacija proizvoda pri čemu svaki kupac kreira proizvod po vlastitim željama što uvelike povećava broj varijanti pojedinog proizvoda i njihovu različitost u smislu potrebnih proizvodnih količina.

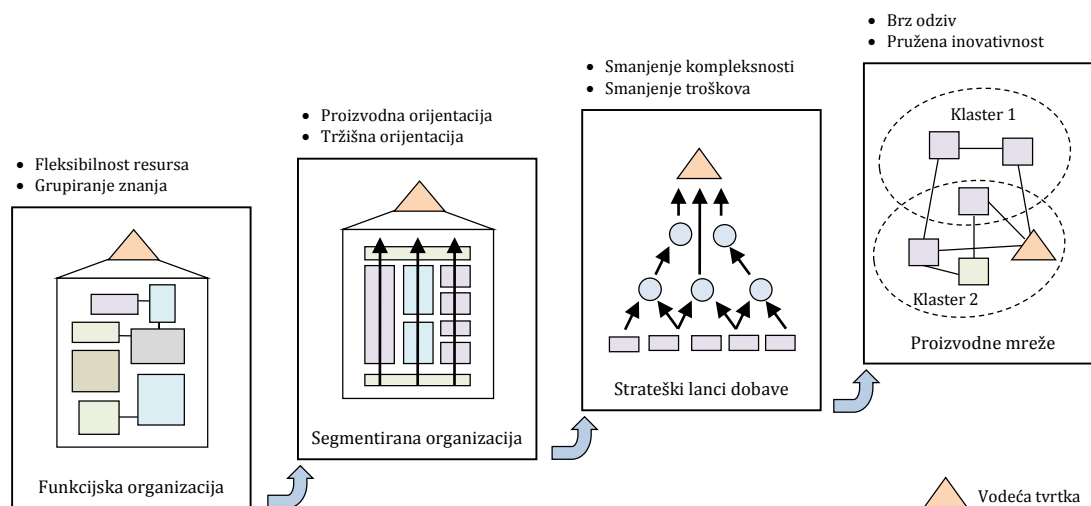


slika 3.1 Tržišne i društvene potrebe kao pokretači proizvodnih promjena (Koren, 2010.)

Povećano izdvajanje poslovnih procesa (eng. *outsourcing*) izvan postojećeg poslovnog sustava, proizvodnja na različitim lokacijama, različite vrste kooperacija na globalnoj razini, novi oblici životnih ciklusa proizvoda, sustava i tvornica, nagli porast broja različitih modela proizvoda i broja njihovih varijanti povećava i kompleksnost proizvodnih sustava. Takav razvoj je doveo do fundamentalne promjene uloge proizvodnih tvrtki. Preduvjet uspješne participacije u dinamičnim globalnim mrežama industrijskih proizvođača zahtjeva da proizvodni procesi, svi materijalni,

ljudski i financijski resursi organizacija koje se bave proizvodnjom, strukture tvornica, proizvodni sustavi kao i njihovi organizacijski i logistički koncepti imaju mogućnost brze adaptacije novim zahtjevima. Takva mogućnost proizvodnih organizacija je bitan preduvjet kako bi isti opstali u turbulentnom okruženju stalnih promjena (ElMaraghy i Wiendahl, 2009.). Kako bi se prilagodili takvim izazovima, proizvodni sustavi su prolazili nekoliko glavnih koraka evolucije, slika 3.2.

Model funkcijske organizacije s visoko fleksibilnim resursima i grupiranim specijalističkim znanjem specifičnih tehnologija bio je vrlo adaptivan za promjene u proizvodima ili količinama no rezultirao je dugim vremenom isporuke i velikom količinom inventara koja zbog neiskorištenosti investiranog kapitala zapravo stvara gubitke. Takav model je bio pogodan za stabilna i dobro predvidiva tržišta. Sustav upravljanja materijalom se odvijao po principu sustava guranja (eng. *push system*) materijala tj. narudžbe poluproizvoda i sirovine bile su planirane kako bi bile raspoložive u ulaznom skladištu na određeni datum i tada plasirane u proizvodnju na daljnju obradu.



slika 3.2 Evolucija proizvodnih sustava (ElMaraghy i Wiendahl, 2009.)

Promjenom tržišne orijentacije koja je sve više postajala okrenuta korisniku i potrebom za brzom isporukom, model segmentirane organizacije bio je idući korak evolucije. Takav model je pružio mogućnost strukturiranja i segmentiranja proizvodnje. Aktivnosti obrade i montaže organizirane su u segmente ili tzv. proizvodne ćelije. Spremnici poluproizvoda koji se nalaze između segmenata proizvodnog procesa (među-spremnici) pune se po principu sustava povlačenja (eng. *pull system*) materijala koji se ne zasniva na prognozi kao što je to slučaj u sustavu guranja, već se nalog za punjenje među-operacijskih spremnika ili skladišta poluproizvoda i sirovine aktivira tek nakon što količina zaliha u njemu padne ispod određene vrijednosti. Količina poluproizvoda potrebnih

za jedan period proizvodnje dostavlja se od dobavljača u malim košarama (što znači učestalo) u proizvodni sustav, radije nego da se dostavljaju za potrebe dužeg perioda proizvodnje i na taj način zapravo skladište u dužem vremenskom periodu. Prednost ovog principa je minimiziranje inventara i smanjenje gubitaka koji su posljedica toga.

U međuvremenu, zbog tendencija tvrtki za zadržavanjem fokusa na svojim glavnim kompetencijama i izdvajanju određenih poslovnih procesa (projektiranje proizvoda, projektiranje proizvodnih sustava, proizvodnja i distribucija) s jedne strane te smanjenju poduzetničke složenosti s druge, razvijen je model strateški razvijenih lanaca dobave čiji je cilj ponovo bilo smanjenje troškova. Takvi su se modeli posebno istaknuli u automobilskoj industriji.

Promatranje današnjih trendova u organizaciji proizvodnih sustava pokazuje kako proizvodni sustavi evoluiraju u proizvodne mreže s privremenom suradnjom tvrtki ili proizvodnih jedinica koja uglavnom traje dok traje i sam proizvod, odnosno obitelj proizvoda koja se proizvodi. Promjenjivi i rekonfigurabilni proizvodni procesi, resursi, strukture, raspoređeni ali i organizacijski oblici postaju preduvjet uspješnog sudjelovanja tvrtke u proizvodnoj mreži (ElMaraghy i Wiendahl, 2009.). Sljedeća generacija tvornica danas se opisuje kao: adaptivna, promjenjiva i inteligentna. Proizvodna strategija Europske unije naglašava ovakvu viziju kroz svoj program *The Seventh Framework* (www.manufuture.org).

3.2 Proizvodne inovacije u automobilskoj industriji

Razmatranje procesa projektiranja proizvodnog sustava ne bi bilo potpuno bez prethodne analize proizvodnih inovacija koji su svoje korijene uvelike imali u automobilskoj industriji. Uspjeh automobila kao proizvoda i preferiranog motornog vozila širom svijeta ovisan je, između ostalog, i o procesima u kojima su automobili proizvedeni. Bez stalnih napredaka u poboljšanju učinkovitosti, smanjivanju troškova, poboljšavanju kvalitete i povećanju proizvodnosti – automobili bi, ako bi uopće postojali, i dalje bili rijetki proizvodi koje bi uživalo vrlo mali broj bogatih pojedinaca. Evolucija proizvodnih metoda u automobilskoj industriji bila je jednako kulturološki kao i zajednički proces.

Inovacije su se pojavile prvo u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD), zatim u Europi da bi nakon toga primat preuzeo Japan u drugoj polovini 20. stoljeća. Još 1908. godine Cadillac je koristio standardizirane i zamjenjive dijelove bez kojih bi moderan tvornički sustav danas bio nemoguć. Bez mogućnosti proizvodnje višestrukih izradaka istih specifikacija koji se mogu montirati na velik broj vozila, proizvođači bi bili ograničeni na vještine i sposobnosti pojedinaca, majstora koji bi stvarali automobil na pojedinačnoj osnovi.

Pokretna montažna linija, zajedno s konceptom masovne proizvodnje (montaža automobila s minimalnim mogućim brojem ponavljajućih koraka) bila je ideja Henrija Forda (r. 1863. – u. 1947. god.) i Fredericka Taylora (r. 1856. – u. 1915. god.). Taj je proces imao dvije odvojene prednosti. Prvo, proizvodnost procesa montaže se znatno poboljšala dok su gubici u nepotrebnim pokretima iščezavali. Drugo, prosječno sposobni radnici bez posebnih vještina mogli su dostići maksimalnu proizvodnost uz vrlo malo uvježbavanja.

Nakon nekoliko godina taj je princip postao prihvaćen u Europi i Japanu te su dotadašnje radione bivale zamijenjene velikim automobilskim tvornicama. Sva eventualna pitanja kvalitete rješavana su postavljanjem jedne kontrolne stanice na kraju proizvodne linije. Neprihvatljivi proizvodi popravljani su najbrže što je moguće ili pak rastavljeni i škartirani. Pojednostavljeno rečeno, sve kontrole vršile su se na izlaznoj točki proizvodne linije, radije nego da remete proizvodni tok kontrolama kvalitete na samoj liniji. Specijalisti za pitanja kvalitete prepoznali su tada da obuka i trening radnika, kao i njihova motivacija mogu reducirati količinu naknadnih popravaka pa se pozornost počela pridavati i tim pitanjima.

U godinama koje su slijedile, sa svojim tradicionalno dobrim obrazovanim sustavom, sustavom pripravnštva i tradicionalnog poslovnog ponosa, Njemačka je postala lider u kvaliteti procesa montaže te istovremeno naglo prihvatila automatizaciju s robotima, visokotehnološkim načinima kontrole i metodama kalibracije što je bilo moguće zbog visoke sposobnosti i spremnosti vlastite radne snage da prihvati sofisticirane proizvodne metode. Globalno tržište vrlo je brzo počelo percipirati njemačke proizvođače kao one koji proizvode najkvalitetnije automobile (Warner i Anderson, 2013.).

3.2.1 Toyotin proizvodni sustav, TPS

Toyotin proizvodni sustav (TPS) je integrirani sociološko-tehnički sustav, razvijen u Toyoti u razdoblju od 1948. do 1975. godine. TPS je postao sinonim za japansku proizvodnu filozofiju, a obuhvaća filozofiju organiziranja i upravljanja proizvodnjom i logistikom automobilskih proizvođača, uključujući suradnju s kupcima i dobavljačima. Najznačajniji učinak TPS-a je projektiranje proizvodnog sustava koji je sposoban glatko izvoditi i ostvarivati ciljeve koji su pred njega postavljeni. Glavni ciljevi TPS-a su:

- smanjenje preopterećenja (jap. *muri*)
- smanjenje neujednačenosti (jap. *mura*) te
- eliminiranje gubitaka (jap. *muda*) u proizvodnji.

Povećanje preopterećenja i nekonzistentnost utječe na pojavu gubitaka u proizvodnom sustavu. Postoji nekoliko vrsta gubitaka koje ovakav sustav nastoji eliminirati: gubici zbog proizvodnje

nepotrebno velikih količina materijala (prekomjerna proizvodnja), gubici uslijed čekanja (prazan hod), gubici uslijed nepotrebnog transporta i nepotrebnih pokreta te gubici uslijed same proizvodnje (nesukladni proizvodi). Tri su smjera kojima se ostvaruju ciljevi filozofije TPS-a: racionalizacija proizvodnje, proizvodnja bez pogreške i proizvodnja bez zaliha. Proizvodnju čine četiri istovremena procesa: tehnološki proces, kontrola, transport i uskladištenje pa se i racionalizacija provodi u istima.

Kaizen je japanski izraz za metodu stalnih poboljšanja proizvodnog procesa u kojoj je svaki sudionik ohrabrivan da istražuje mogućnosti poboljšanja kvalitete i učinkovitosti. Takve ideje, koje vrlo često dolaze od samih operativnih izvršitelja, potrebno je u čim kraćem roku inkorporirati u proizvodni sustav. Važni elementi japanske proizvodne filozofije pobuđeni su radom William Edwards Deminga, Amerikanca koji je razvio sustav statističke kontrole za potporu američkim snagama tijekom Drugog svjetskog rata. Nakon rata, u sklopu svog rada u Japanu, njegova stručnost u tehnikama kontrole kvalitete osigurala mu je pozivnicu u Japansku udrugu znanstvenika i inženjera čiji su članovi između ostalog istraživali Shewhartove tehnike statističke kontrole procesa. Njegov je rad u to vrijeme bio ignoriran u SAD-u te prihvaćen tek nakon 1981. Koncept koji je integriran u japansku proizvodnu filozofiju zasnivao se na kontroli ulaznih parametra putem mjerenja izlaznih parametara te eliminiranju samih izvora problema koji uzrokuju lošu kvalitetu.

Kanban je japanski izraz za reduciranje inventara koji je razvijen u Toyoti, često nazivan i "Točno-na-vrijeme" koji se zasniva na sustavu povlačenja materijala. Kartice (jap. *kanban*) pričvršćene za manje košare s poluproizvodima označavale su naziv dobavljača materijala i količinu komponenti koja se nalazi u košari. U izvornom obliku Kanban sustava, nakon pražnjenja košare, ona bi bila vraćena dobavljaču čime bi se generirao signal za narudžbom dodatne košare jednakog broja poluproizvoda. Takvom metodom je postignuta mehanička kontrola inventara i bolja proizvodna učinkovitost. Isti principi su zadržani i danas, te su uglavnom implementirani u proizvodni proces putem različitih računalnih sustava.

Heijunka ili ujednačavanje proizvodnje (eng. *production levelling*) je japanski izraz za tehniku smanjivanja gubitaka koji su posljedica fluktuacija u njenom izvođenju. Cilj tehnike je proizvodnja koja se izvodi u ujednačenom ritmu kako bi se i obrada na operacijama koje slijede također mogle izvesti u ujednačenom, predvidljivom ritmu. Ujednačavanje proizvodnje proizvodnih sustava za obradu više proizvoda odnosi se i na napore za smanjivanjem pripremno-završnog vremena kako bi se omogućila proizvodnja sve manjih grupa izradaka. Jednominutna promjena alata (eng. *Single-Minute Exchange of Die*, SMED) je tehnika za smanjenje gubitaka koja pruža brz i učinkovit način promjene sposobnosti proizvodnog procesa da bude spreman proizvoditi drugi proizvod.

Time se smanjuje pripremno-završno vrijeme i omogućuju manji paketi izradaka u procesu čime se poboljšava ujednačenost toka materijala.

Jidoka ili autonomizacija (eng. *autonomation*) predstavlja sposobnost proizvodne opreme da osim svojih proizvodnih funkcija ima i funkciju nadziranja svog rada. TPS kombinira proizvodne operacije s kontrolnim operacijama, kao i korištenje opreme koja ima svojstvo detektirati abnormalnost u proizvodnom procesu i automatski zaustaviti proizvodnju kad se abnormalnost pojavi. Time se sprječava nastanak dodatnih gubitaka koji bi nastali kao rezultat proizvodnje cijele serije proizvoda nezadovoljavajuće kvalitete nakon pojave abnormalnosti u proizvodnom procesu (Kim i Gershwin, 2005.). Kako bi Jidoka bila potpuna, nije dovoljno samo otkriti pogrešku i pronaći njen uzrok, već je potrebno ugradnjom elemenata za sprječavanje nastanka njenog uzroka osigurati kako se ta pogreška ne bi ponovila. Elementi za sprječavanje pogrešaka nazivaju se još i Poka-yoka.

Rezultat TPS-a bio je najočitiji s Toyotinim predstavljanjem marke Lexus 1989. godine u SAD-u pri čemu su američki automobilske kritičari zaključili da su Lexusovi automobili kvalitetom ekvivalentni najboljim njemačkim ili američkim automobilima. No, zbog veće učinkovitosti Toyotinog proizvodnog sustava, Lexus se mogao prodavati po znatno nižim cijenama od svoje konkurencije u klasi luksuznih automobila.

3.2.2 Vitka proizvodnja

Dva navedena procesa, Kaizen i Kanban, postali su jezgra zavidne japanske kvalitete i učinkovitosti te postali ključni principi proizvodne filozofije zvane vitka proizvodnja (eng. *lean manufacturing*). Organizacijski koncept vitke proizvodnje bio je rezultat istraživačkog rada (Krafcik, 1988.) na *Massachusetts Institute of Technology* za potrebe automobilske industrije SAD-a 90-tih godina 20. stoljeća, a u cilju pronalaženja odgovora na uspjeh japanskih proizvođača (njihove primjene tzv. japanske proizvodne filozofije).

Vitka proizvodnja se može prikazati kao skup pojedinačnih cjelina, načela i mjera koje objedinjene daju djelotvoran oblik neprekinutog lanca u stvaranju nove vrijednosti. Ukupan koncept postizanja Vitke proizvodnje je planiran i upravljan po etapama. Iako naziv "Vitka proizvodnja" tako ne implicira, koncept se odnosi i na ostale funkcije u poslovnom sustavu, a ne samo na proizvodnu funkciju. Vitka proizvodnja vodi većoj decentralizaciji organizacije poslovnog sustava kako bi organizacijske jedinice imale što veću slobodu u primjeni raznih tehnoloških, upravljačkih modela te kako bi se omogućilo lakše postizanje poboljšanja u proizvodnim procesima. Ipak, u svemu tome postoji jedan segment organizacijske strukture koji te relativno samostalne organizacijske jedinice drži zajedno, a kako bi mogle međusobno surađivati i u slučaju potrebe

zajednički i efikasno odgovoriti promjenama u okruženju.

3.2.3 Mercedes-Benzov proizvodni sustav, MPS

Početak 90-ih godina 20. stoljeća, Mercedes-Benz je iz ekonomskih i marketinških razloga donio odluku o širenju proizvodnje u državu Alabamu, SAD. Mercedes-Benz je odlučio proizvoditi automobil koji nikad prije nije bio proizveden, u tvornici koja nije postojala, u regiji bez ikakve tradicije proizvodnje automobila, s radnom snagom koja nikad nije radila u tvornici automobila. Takve okolnosti su za njemačke inženjere značile da pred sobom imaju „bijeli list papira“ na kojem će projektirati novu tvornicu, sa svim prednostima koje im se time pružaju. Rezultat tog projektiranja je danas poznat kao Mercedes-Benzov proizvodni sustav (eng. *Mercedes-Benz Production System*, MPS) koji se temelji na istim principima koji su ranije postignuti u automobilskoj industriji: standardiziranim dijelovima, sustavima linija za montažu, treningu i motivaciji radnika, pravovremenosti inventara i stalnim poboljšanjima. U isto vrijeme, sva dostupna tehnologija koja uključuje robote, senzorske sustave, automatizaciju, računalnu kontrolu i ostalo, implementirana je u novu tvornicu i njene proizvodne sustave. Inženjeri i projektanti tada nisu željeli napraviti samo jednu u nizu novih tvornica nego ići korak dalje i stvoriti vrhunski proizvodni sustav.

Uz zadržavanje osnovnih principa koji se preklapaju s japanskom proizvodnom filozofijom, naglasak na kvaliteti u Mercedesovom proizvodnom sustavu ima za cilj provjeru kvalitete u četiri petlje, kontrolirajući kvalitetu čim bliže izvoru ili potencijalnom mjestu nastanka problema kvalitete (www.mbca.org):

- U prvoj petlji kvalitete, članovi tima zaduženog za određeni zadatak odgovorni su za kvalitetu u svojoj domeni, što znači da zadatke odrađuju prema standardnim obrascima i postupcima te pri tome sami kontroliraju vlastiti rad. Na taj način se osigurava kvaliteta koja je ugrađena u svaki ciklus procesa. Ovakav princip je opisan jednostavnom rečenicom: „Komponenta posla ne smije prijeći na idućeg člana tima dok proces nije u potpunosti ispravan.“
- U drugoj petlji kvalitete, ukoliko član tima naiđe na poteškoću koju ne može savladati, signalizira potrebu za pomoć svog nadređenog te s njim rješava problem i odlučuje radi li se o pojedinačnoj anomaliji ili problemu koji je trebao biti riješen ranije na liniji.
- Na kraju svake faze proizvodnog procesa, uzorci izradaka se povlače s proizvodne linije u karakterističnim intervalima i pažljivo kontroliraju u trećoj petlji kvalitete kako bi se provjerilo da se parametri procesa i izratka nalaze unutar određenih vrijednosti. Problemi se rješavaju prije nego drugi problemi nastanu.
- U četvrtoj petlji kvalitete, gotovi proizvodi (automobili) se izuzimaju s proizvodne linije i

podvrgavaju rigoroznoj vizualnoj i mehaničkoj kontroli kao i testu na pisti izvan tvornice. Ukoliko se primijete nedostaci, oni se uklanjaju i provodi se istraga kojoj je cilj utvrđivanje postoji li specifični uzorak koji može indicirati izvor problema kvalitete u određenom dijelu proizvodnog procesa.

Tvornica u Alabami je dodatno usvojila velik broj novih pravila ponašanja među zaposlenima koja su do tad bila neuobičajena za automobilske tvornice, a posebno za one njemačke. Uklonjene su barijere između radnika i rukovoditelja kako članovi tima ne bi bili obeshrabreni pri identifikaciji problema i predlaganju poboljšanja. Svi članovi tima odjeveni su u identične uniforme te uz poticanje radne atmosfere otvorenog ureda koja potiče komunikaciju unutar ali i između timova i odjeljenja (www.mbca.org).

3.3 Osnovni pojmovi

Proizvodnja je prostorno i vremenski određen proces svjesnog djelovanja čovjeka temeljen na znanstvenim zakonitostima pri čemu dolazi do svrsishodne korelacije više čimbenika među kojim su elementarni: ljudska aktivnost, sredstva rada i predmet rada. Rezultat proizvodnje je proizvod ili usluga. Proizvodni proces je osnova svake industrijske proizvodnje, a podrazumijeva sve aktivnosti i djelovanja koja rezultiraju pretvaranjem ulaznih materijala (sirovina, poluproizvoda) u gotov proizvod. Proizvodni proces obuhvaća sredstva i osoblje koji sudjeluju u aktivnostima od skladišta ulaznog materijala do skladišta gotovih proizvoda. Tehnološki proces je bitan sastavni dio proizvodnog procesa i to onaj dio koji se odnosi na promjenu izgleda, oblika, dimenzija i svojstava materijala (sve kvalitetne promjene fizikalnih i kemijskih svojstava, kvalitete površine, relativan položaj ili vrstu spajanja u cjeline) od sirovog stanja do gotovog proizvoda.

3.3.1 Proizvodni sustav

Proizvodni sustav je organizacijski oblik koji integrira grupu različitih funkcija kao podsustava neophodnih za realizaciju industrijske proizvodnje predstavljenu skupom aktivnosti koje su usmjerene na fizičke i kemijske promjene ulaznih repromaterijala u finalne proizvode. Konkretnije, proizvodni sustav je namijenjen obradi (izradi) proizvoda, u okviru kojeg se vrši pretvorba informacija, materijala i energije u gotov proizvod (izradak) posredstvom radnog osoblja i radnih sredstava, a sastoji se od niza temeljnih modula – osnovnih proizvodnih sustava, OPS-a. Proizvodni sustav je ujedno i dio šireg poslovnog sustava i to onaj dio u kome nastaje proizvod (Mikac, 1994.). Proizvodni sustavi se mogu identificirati na četiri različite razine (Rooda i Vervoort, 2007.):

1. Na razini tvornice sustav je tvornica, a elementi sustava su područja ili grupe opreme.

2. Na razini područja ili grupe opreme sustav je područje s nekoliko strojeva ili grupa strojeva (proizvodna ćelija).
3. Na razini ćelije, sustav je grupa strojeva koji se tipično promatraju kao jedan entitet.
4. Na razini strojeva, proizvodni sustav je individualni stroj pri čemu su elementi sustava komponente stroja.

Mikac (1994.) navodi kako je proizvodni sustav strukturiran od više podsustava koji su aktivni tijekom funkcioniranja proizvodnog sustava kao cjeline te identificira sljedeće podsustave proizvodnog sustava:

1. obradni podsustav (izratci, oprema, alati)
2. transportni podsustav (transportna oprema, manipulacija, skladištenje)
3. sustav prostora (proizvodni, pomoćni, skladišni, prometni)
4. energetska podsustav (izvori, energetske mreže)
5. informacijski podsustav (računalne mreže, oprema, podrška)
6. podsustav radnog osoblja (proizvodni i pomoćni radnici, operateri, poslovođe)
7. podsustav organizacije (makro i mikro organizacija, metode upravljanja).

Ukoliko se kao jedan od ciljeva projektiranja proizvodnog sustava razmatra i kvaliteta, potrebno je od rane faze projektiranja proizvodnog sustava promatrati i 8. podsustav proizvodnog sustava – kontrolni podsustav. Kontrolni podsustav je organizacijski oblik namijenjen osiguranju povoljne razine kvalitete proizvoda ili proizvodnog procesa, posredstvom radnog osoblja, kontrolne opreme i postupaka kontrole.

3.3.2 Prostorna struktura

Proizvodni proces podrazumijeva sve aktivnosti i djelovanja koja rezultiraju pretvaranjem ulaznih materijala (sirovina, poluproizvoda) u gotov proizvod. Proizvodni proces je znatno širi pojam od tehnološkog procesa koji je samo njegov temeljni dio, a obuhvaća sve aktivnosti i događaje u toku izrade nekog proizvoda: operacije, provjeru kvalitete, transport materijala, čekanja, zastoje i uskladištenja. Proizvodna struktura odvijanja procesa određena je prostornim rasporedom (eng. *layout*) što podrazumijeva razmještaj proizvodne opreme u prostoru. pri tome se u okviru radnog mjesta osim prostora za proizvodnu opremu određuje i prostor za osoblje (neto površine) kao i prostor za odlaganje, rukovanje i među-operacijski transport izradaka (uz neto površinu formira bruto površinu). Prostornim rasporedom radnih mjesta prilagođenih toku odvijanja procesa određuje se prostorna struktura osnovnog proizvodnog sustava (OPS).

Upravo prostorna i vremenska struktura odvijanja procesa predstavljaju osnovne značajke pojedinog osnovnog proizvodnog sustava jer određuju tok materijala kroz proizvodni sustav za

vrijeme odvijanja proizvodnog procesa, pa uz ostale značajke sustava presudno utječu i na njegovo funkcioniranje i efikasnost (Mikac, 1994.). Način na koji materijal izrade prolazi kroz proizvodni sustav tijekom obrade definiran je modelom toka materijala pri čemu se razlikuju tekući i valoviti model protoka. U tekućem modelu protoka u pravilu nema među-operacijskih čekanja i po završetku prethodne operacije materijal bez zastoja (čekanja) ide na narednu operaciju. Kod valovitog modela protoka materijala postoji značajno vrijeme među-operacijskog čekanja prije početka naredne operacije.

3.3.3 Hodogram obrade

Hodogram obrade podrazumijeva grafički ili numerički prikaz protoka (hoda) materijala (izradaka) kroz proizvodni sustav tijekom proizvodnog procesa. Redoslijedu događaja u proizvodnom procesu time se uz vremensku dodaje i prostorna dimenzija. Razlikuju se jednosmjerni i dvosmjerni hod izradaka u proizvodnom sustavu. Jednosmjerni hod izradaka karakterizira istovjetan redoslijed operacija (r) s redoslijedom korištene proizvodne opreme (i). Kod dvosmjernog hoda izradaka, osim prethodno navedenog slučaja, hod materijala može biti i prema unatrag što znači da se naredna operacija ($r+1$) izvodi na proizvodnoj opremi čiji je položaj u prostoru određen s položajem ($i-1$) ili manje.

U kontekstu novih proizvodnih paradigmi, važan element hodograma obrade postaje i broj putanji hodograma. Jedna putanja hodograma obrade predstavlja svaku pojedinu, moguću varijantu kretanja jednog izratka kroz proizvodni sustav, od prve do posljednje operacije.

3.3.4 Ciklus izrade

Vremenska komponenta proizvodnog procesa predstavljena je brzinom protoka materijala i jedna je od najbitnijih značajki procesa. Ciklus proizvodnje podrazumijeva odsječak kalendarskog vremena koje protekne od ulaska izratka u proizvodni proces pa do njegovog izlaska u vidu gotovog proizvoda što uključuje i prekide (neradne dane, zastoje zbog kvarova i sl.) koji nisu uvjetovani tehnološkim i organizacijskim postavkama procesa (Ljubetić, 1991.). Ciklus izrade podrazumijeva ukupno vrijeme izvođenja svih operacija te svih tehnički i organizacijski uvjetovanih prekida pri proizvodnji jednog izratka u toku efektivnog radnog vremena.

3.4 Projektiranje složenih proizvodnih sustava

Proces projektiranja proizvodnog sustava, koji u sebi sadrži velik broj interakcija tehnologije, organizacije i ljudi, vrlo je složen posao koji objedinjuje aktivnosti organizacije i formiranja različitih tehnika u svrhu stvaranja podloge za sistematičan i po mogućnosti automatiziran redoslijed projektiranja proizvodnog sustava. Pri tome su intenzivan tehnološki razvoj, nove

proizvodne strukture s povećanim eksploatacijskim karakteristikama dodatno povećali složenost postupka projektiranja. Kako bi zadovoljile složene tržišne uvjete, proizvodne organizacije moraju ostvariti razvoj proizvoda koji ima tražene značajke, pa time i određenu vrijednost, ali i formirati adekvatne proizvodne kapacitete koji će na efikasan način osigurati njegovu izradu. Proizvodni sustavi moraju udovoljavati određenim zahtjevima kako bi se ostvarila racionalna proizvodnja dovoljnih količina izradaka tražene kvalitete uz povoljne troškove proizvodnje.

Projektiranje proizvodnog sustava je složen proces u kojem se nastoje što egzaktnije obuhvatiti svi utjecajni čimbenici i problemi koji se pri projektiranju javljaju. Takav proces predstavlja predmet neprestanih i široko obuhvatnih znanstvenih i praktičnih istraživanja. Pri tome, temeljni zadatak projektiranja je definicija osnovnih proizvodnih sustava traženih karakteristika za ostvarivanje sklada između konstrukcijsko-tehnoloških značajki izradaka, primijenjenih tehnoloških postupaka i proizvodne opreme, te načina odvijanja proizvodnje i njenih troškova izraženih kroz zadatak projekta, utjecajne čimbenike na projekt i projektne rezultate (Mikac, 1994.). Istraživanja upravljanja operacijama potvrdila su da se najveći iskoraci u unaprjeđenju mogućnosti proizvodnih sustava postižu kad se proizvodni sustav projektira od vrha prema dnu i od dobavljača prema korisniku. Projektiranje proizvodnog sustava je najučinkovitije kad se projektira ili doraduje cijeli vrijednosni tok proizvoda (ne samo radiona, odjeljenje ili segment tvornice).

Vaughn et al. (2002.) su razvili tzv. radni okvir projektiranja proizvodnih sustava koji predstavlja koristan pregled dostupnih alata i metoda projektiranja. Radni okvir sadrži dva zasebna elementa projektiranja: element infrastrukturnog projektiranja i element strukturnog projektiranja proizvodnog sustava. Infrastrukturno projektiranje sadrži sve aktivnosti povezane s okruženjem proizvodnog sustava te se u njemu formulira proizvodna strategija, organizacijske strukture i specifični ciljevi projektiranja proizvodnog sustava. Strukturno projektiranje pak sadrži konceptualno i detaljno projektiranje proizvodnog sustava, probnu proizvodnju i modifikacije proizvodnog sustava. Infrastrukturno i strukturno projektiranje su u okviru projektiranja proizvodnog sustava međusobno povezani strategijom proizvoda.

3.4.1 Infrastrukturno projektiranje proizvodnih sustava

Infrastrukturno projektiranje provodi se u tri razine (ulagači, korporativna razina i poslovna jedinica) koje zajednički sudjeluju u formuliranju strategije. Strateški upravljana organizacija ima veće šanse za postizanjem dugoročnog porasta profita od organizacije koja je upravljana isključivo intuicijom i iskustvom. Definirana proizvodna strategija pruža viziju proizvodnoj funkciji kako bi se zadržala u skladu s ukupnom poslovnom strategijom korporacije ili poduzeća. Ona sadrži

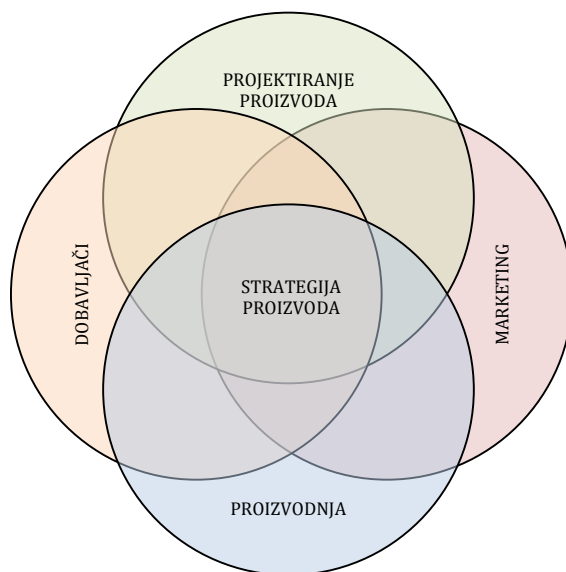
dugoročne ciljeve, programe i inicijative. Proizvodni sustav koji je strateški projektiran i kao takav dobro integriran u ostale funkcije organizacije, igra važnu ulogu u postizanju njenih poslovnih ciljeva. Ključ dugoročnog uspjeha organizacije je u mogućnosti da ona bude u određenim segmentima bolja od svojih konkurenata. Strategija korporativne razine transferira se do različitih poslovnih jedinica ili profitnih centara kroz cijelu korporaciju ili poduzeće što pomaže u održanju zajedničkih veza kroz sve dijelove korporacije ili poduzeća. No ta veza nije jednosmjerna. Poslovna jedinica je odgovorna za predstavljanje svih funkcija organizacije prema korporativnoj razini te ju informira o svojim sposobnostima, potencijalnim smjerovima i mogućim strategijama u budućnosti. Korporativna razina je odgovorna za usklađivanje mogućnosti poslovnih jedinica s potrebama ulagača kako bi se kreiralo ukupno strateško usmjerenje. Da bi se proizvodnja koristila kao konkurentna prednost, proizvodna organizacija mora biti svjesna tržišnog okruženja te svojeg i položaja konkurenata na tržištu. Vrijednost strategije je u odabiru onih elemenata koje je konkurentima teško postići (Hayes i Pisano, 1994.). Jednom definirana, strategija pruža smjernice odgovornima kako bi postavili prioritete kroz svakodnevne aktivnosti i time ostvarili dugoročne ciljeve korporacije ili poduzeća. Prema Miltenburgu (2005.), kad postoji formalna strategija, odluke se donose po glatkom, logičkom obrascu. S druge strane, pri nepostojanju strategije, odluke su nepovezane i često zasnovane na intuiciji. Upravljanje proizvodnjom bez proizvodne strategije bi samo dovodilo do pogrešnih zaključaka i odluka. Strategija je ujedno i snažan alat za komunikaciju između različitih razina uprave u korporaciji ili poduzeću.

3.4.2 Strategija proizvoda

Strategija proizvoda predstavlja instrument za usklađivanje proizvodne funkcije i ostalih funkcija organizacije s ukupnom strategijom korporacije. Vaughn et al. (2002.) su prikazali strategiju proizvoda kao nastavak modela trodimenzionalnog simultanog inženjerstva (eng. *3-Dimensional Concurrent Engineering*, 3DCE, Fine, 1998.). Tradicionalni pogled na 3DCE uključuje dobavljače, projektiranje proizvoda i proizvodnju, dok je u nekim industrijama kao što su aeronautička i automobilska, korisno uključiti i funkciju marketinga kao dodatnog područja. Ilustrirana grafika prikazuje strategiju proizvoda kao područje preklapanja četiriju različitih funkcija organizacije: dobavljača, projektiranja proizvoda, proizvodnje i marketinga, slika 3.3. To ujedno znači da je projektiranje proizvodnog sustava (proizvodnje) podržano i ostalim funkcijama: projektiranja proizvoda, integracije dobavljača i marketinga te da formulacija strategije proizvoda zahtjeva suradnju upravo tih funkcijskih odjela organizacije koja projektira proizvodni sustav.

Odluke o tome hoće li se pod-sklopovi proizvoditi ili kupovati, odluke o načinu suradnje s dobavljačima te način međusobne podjele odgovornosti s dobavljačima mogu biti formulirane između funkcija projektiranja proizvoda, proizvodnje i dobavljača. Veza između funkcija

marketinga, proizvodnje i projektiranja proizvoda dovodi do jasnijeg razumijevanja korisničkih potreba te tehničke izvedivosti zadovoljenja tih potreba. Konačno, dobro formulirana strategija proizvoda pruža orijentaciju za reguliranje proizvodne strategije (ali i za ostale funkcijske strategije) koja treba biti usklađena sa poslovnom strategijom organizacije te pomagati u osiguravanju da odluke donesene unutar funkcije budu zasnovane na dugoročnim ciljevima korporacije ili poduzeća.

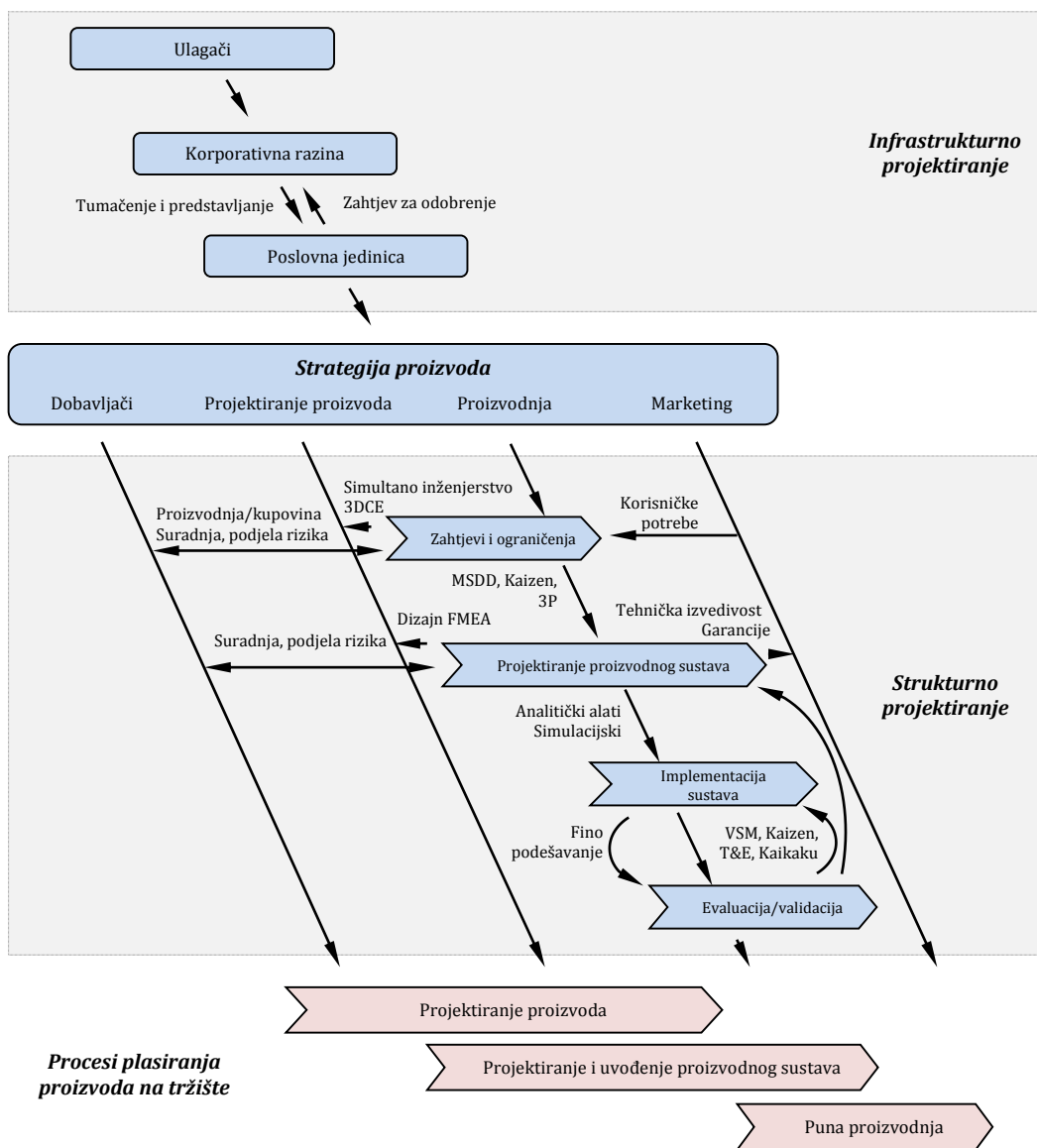


slika 3.3 Strategija proizvoda kao instrument za usklađivanje četiriju funkcija organizacije (Vaughn et al., 2002.)

3.4.3 Strukturno projektiranje proizvodnih sustava

Pošto je okvir projektiranja primarno orijentiran ka samoj proizvodnoj funkciji, slika 3.4 detaljno prikazuje samo faze vezane za taj dio okvira projektiranja. No, prati li se formulacija strategije proizvoda, aktivnosti projektiranja svih funkcija (dobavljači, projektiranje proizvoda, proizvodnja i marketing) odvijaju se paralelno. Proizvodni sustav objedinjuje sve aktivnosti koje se neposredno bave proizvodnjom. Nakon definiranja strategije proizvoda nalazi se fizička manifestacija koncepta, implementacija i dorada projektiranja proizvodnog sustava. Svaki od tih elemenata je namijenjen odvojenoj fazi s određenim karakterističnim događajima i skupom alata koji su primjenjivi u određenim fazama. Svaka faza predstavlja određeno razgraničenje u okviru projektiranja, a započinje s fazom „Zahtjevi/ograničenja“. Paralelne aktivnosti projektiranja različitih funkcija predstavljene su vertikalno orijentiranim strelicama između strategije proizvoda i razine spremnosti proizvodnje. Takav prikaz indicira kako se različite aktivnosti projektiranja odvijaju paralelno. Za primjer, projektiranje proizvoda se provodi istovremeno kao i projektiranje proizvodnog sustava, a u isto vrijeme i dobavljači projektiraju svoje proizvodne

sustave kako bi se pravovremeno ukomponirali dijelovi koji se dobavljaju. Drugi aspekt radnog okvira projektiranja je područje između paralelnih aktivnosti koji predstavlja odnose između funkcija koje definiraju strategiju proizvoda. Ti su odnosi prikazani horizontalnim strelicama u radnom okviru projektiranja. Cilj ovakvog pogleda na radni okvir projektiranja je prikazivanje napretka u projektiranju proizvodnog sustava kroz suradnju funkcija koje sudjeluju u oblikovanju strategije proizvoda.



slika 3.4 Radni okvir projektiranja proizvodnog sustava (Vaughn et al., 2002.)

Prethodna istraživanja ukazuju da je teško promatrati proizvodni sustav u izolaciji od projektiranja proizvoda. Uzrok tome može biti što projektiranje proizvoda u većini određuje troškove proizvoda (do 80%) i izravno ili neizravno određuju troškove izrade alata i tehnologije

obrade. Troškovi i ostale posljedice toga, što je često pripisivano izravno proizvodnoj domeni, pod jakim su utjecajem projektiranja proizvoda te se projektiranje proizvoda ne bi trebalo promatrati u izolaciji od projektiranja proizvodnog sustava. Uključivanjem više podataka o projektiranju proizvodnog sustava u proces projektiranja proizvoda može se usporiti sam proces projektiranja proizvoda ali se ukupno vrijeme projektiranja može skratiti zbog manjih (i kraćih) potreba za iterativnim projektiranjem proizvodnog sustava.

3.4.3.1 Zahtjevi i ograničenja

Prva faza strukturnog projektiranja proizvodnog ustava predstavlja razmatranja zahtjeva i ograničenja koje je potrebno zadovoljiti i poštovati pri projektiranju proizvodnog sustava. Ti zahtjevi i ograničenja mogu biti rezultat unutarnjih i/ili vanjskih utjecaja, ali mogu biti i obavezni ili proizvoljni, no njihovo zadovoljavanje je obavezno da bi proizvodni sustav bio uspješno projektiran. Zahtjevi djelomično proizlaze iz cjelokupne strategije proizvoda kao i iz različitih funkcijskih odjela. Pri tome su moguće okolnosti gdje su zahtjevi različitih funkcija ili vanjskih čimbenika međusobno u konfliktu te je cilj radnog okvira projektiranja uklanjanje takvih konflikata. Radni okvir projektiranja proizvodnog sustava obuhvaća više funkcija kroz cijeli proces projektiranja s čime se stvara prostor za povratne informacije između različitih funkcija organizacije i potiče suradnja unutar korporacije ili poduzeća u cilju postizanja strateških poslovnih ciljeva, a ne pojedinačnih ciljeva individualne funkcije ili grupe.

Istraživanjima i anketiranjem projektanata koji su uključeni u procese projektiranja proizvodnih sustava u aeronautičkoj industriji došlo se do saznanja da se najučestalija razmatranja o zahtjevima i ograničenjima pri projektiranju mogu svesti na nekoliko kategorija:

- Potrebe, ciljevi i strategija poduzeća. Ova kategorija uključuje razmatranja koja potječu sa razine Uprave poduzeća. Kako je proizvodni sustav zapravo podsustav cijelog poduzeća potrebno je postaviti ciljeve koji su u skladu s odnosima sustav/podsustav. Zadovoljstvo dioničara je, na primjer, korporativni cilj koji postaje i cilj proizvodnog sustava te ciljevi poduzeća na taj način imaju velik utjecaj na projektiranje proizvodnog sustava, tablica 3.1.
- Kontrolirajući čimbenici. Upravno tijelo korporacije ili poduzeća ima dovoljno kontrole nad ovim čimbenicima kako bi njima donosilo strateške odluke. Primjer čimbenika kojeg poduzeće može kontrolirati je količina različitih proizvoda koji će se proizvoditi i ponuditi na tržištu, tablica 3.1. Poduzeće može ponuditi na tržište manji broj različitih proizvoda nego što ih tržište traži, a ukoliko je to u skladu sa strategijom poduzeća. Učinci donošenja pogrešnih odluka kod formiranja ovih čimbenika obično mogu biti relativno neznčajni u usporedbi s donošenjem pogrešnih odluka koje nisu sukladne s nekim od vanjskih čimbenika.
- Vanjski čimbenici. U ovu kategoriju spadaju čimbenici koji nisu pod kontrolom korporacije ili

poduzeća ali se moraju razmotriti kako bi se postigli ciljevi poduzeća. Tržišne nesigurnosti i državne regulative su primjeri vanjskih čimbenika koji utječu na projektiranje proizvodnog sustava. Vanjski čimbenici obično utječu na određivanje zemljopisne lokacije tvornice te način ugovaranja radnog odnosa zaposlenika, tablica 3.2.

- Ograničenja/ciljevi. Ograničenja i ciljeve postavlja upravno tijelo poduzeća kako bi osiguralo da proizvodni sustav ostane unutar utvrđenih granica koje propisuje korporacija ili poduzeće. Ograničenja uobičajeno ograničavaju mogućnosti projektiranja ostavljajući ipak mogućnost zadovoljenja ciljeva korporacije ili poduzeća.

tablica 3.1 Razmatranja potreba/ciljeva/strategije poduzeća pri projektiranju proizvodnog sustava

Potrebe/ciljevi/strategija poduzeća	Kontrolirajući čimbenici
Zadovoljstvo ulagača	Količine proizvoda
Korporativna strategija	Različitost proizvoda
Proizvoditi/kupiti strategija	Projektiranje proizvoda
Strategija predstavljanja novog proizvoda	Učestalost promjena proizvoda
	Složenost proizvoda
	Sposobnost procesa
	Vrsta organizacije
	Znanje/vještina zaposlenika
	Mogućnosti/troškovi
	Sposobnost odgovora na promjene

tablica 3.2 Razmatranja vanjskih čimbenika pri projektiranju proizvodnog sustava

Vanjski čimbenici	Ograničenja
Tržišne nesigurnosti	Investicije
Geopolitička razmatranja	Vrijeme do prvog proizvoda
Državni propisi i odnos prema okolišu	Vrijeme amortizacije opreme
Priroda proizvoda	Ciljana cijena proizvoda
	Ciljevi mogućnosti
	Postojeći resursi

3.4.3.2 Projektiranje proizvodnog sustava i odabir varijante

Ova faza u radnom okviru projektiranja proizvodnog sustava eksplicitno ističe važnost donošenja svjesnog odabira varijante proizvodnog sustava. Proizvodni sustavi koji su često korišteni u praksi, uglavnom su oblika proizvodnih ćelija, fleksibilnih proizvodnih kapaciteta, proizvodnih ili pokretnih linija za proizvodnju i/ili montažu. Formulirana strategija proizvoda postaje potpuno beznačajna ako je pripadajući proizvodni sustav odabran proizvoljno ili je to jednostavno napravljeno korištenjem predložka nekog već postojećeg proizvodnog sustava. Ova faza u radnom okviru nije trivijalna niti predvidiva. No, dostupnim je alatima strukturnog projektiranja moguće

voditi selektivni proces projektiranja proizvodnog sustava i odabira varijante. U cilju što potpunijeg istraživanja različitih mogućnosti povoljno je izraditi veći broj alternativnih rješenja koncepta složenog proizvodnog sustava. Kod pojedinih varijanti može doći do različite veličine investicijskih ulaganja kao i potrebnog prostora (Mikac, 1994.) ali i različitih očekivanih razina kvalitete proizvoda. Različitosti značajki pojedinih varijanti proizvodnog sustava pružaju bolji pregled i proširuju mogućnosti kvalitetnog odabira konačne varijante proizvodnog sustava.

3.4.3.3 Petlja implementacije, evaluacije i validacije sustava

Kako je ranije prikazano, u sklopu strukturnog projektiranja nalaze se dvije petlje. Manja petlja predstavlja proces implementacije i validacije proizvodnog sustava. To omogućava da proizvodni sustav bude provjeren, fino podešen i doveden do stanja spremnosti za redovnu proizvodnju u punom planiranom obimu. Smisao ovog koraka jest da se neovisno o korištenim alatima, projektirani proizvodni sustav podvrgne praktičnim ispitivanjima u cilju otkivanja i najmanjih problema. Čak i u savršeno detaljno planiranom i projektiranom proizvodnom sustavu moguće je da se stvari odvijaju na način kako to nije planirano. Smisao pilot proizvodnje je otvaranje prostora za mogućnosti implementacije novih kreativnih ideja koja mogu biti implementirana u sustav. Kroz povijest, pilot proizvodnja (ponegdje u literaturi nazvana i eksperimentalna tvornica) igrala je važnu ulogu u razvijanju radikalnih promjena (jap. *kaikaku*), novih ideja proizvodnih koncepta čime se pomoglo stvaranju kreativne atmosfere pri projektiranju proizvodnih sustava.

3.4.3.4 Petlja modifikacije sustava

Posljednja faza u radnom okviru projektiranja proizvodnog sustava je petlja modifikacije sustava. Ta petlja predstavlja ciklus stalnih poboljšanja i pokazuje kako proces projektiranja proizvodnog sustava zapravo nikad ne prestaje. Ova je petlja aktivna dok god je proizvodni sustav aktivan, čak i nakon početka proizvodnje u punom obimu. U ovoj su petlji inkorporirane eventualne promjene u procesu ili moguće tehnološke promjene u proizvodu ili proizvodnom sustavu. Ova petlja predstavlja suštinu Toyotinog proizvodnog sustava gdje potreba za savršenstvom i stalnim poboljšanjima nikad ne prestaje. Kako primjeri Toyote ilustriraju, stalna poboljšanja zahtijevaju stalne promjene proizvodnog sustava te to postaje filozofija svih kompanija koje teže k vitkoj proizvodnji. I ova petlja, kao i ostatak radnog okvira projektiranja, zahtjeva međusobnu povezanost različitih funkcija proizvodne organizacije. Uspješnost stalnih poboljšanja zahtjeva jednak naglasak na projektiranjima proizvoda i proizvodnog procesa te njihovu integraciju. To znači i da se promjene ne moraju nužno odnositi na sam proizvodni proces već postoji potencijal promjena u drugim funkcijskim grupama poduzeća. Svaka promjena u sustavu zahtjeva i ponovno revidiranje sukladnosti sa strategijom poduzeća.

Promatranjem, proučavanjem literature i istraživanjem povijesti proizvodnih sustava i

razgovorima s praktičarima, Vaughn et al. (2002.) su zaključili kako se pri projektiranju proizvodnih sustava koristi kombinacija tehnika i metoda koje se mogu sažeti u četiri skupine:

1. metode pokušaja i pogreške
2. zajedničko odlučivanje
3. standardni proizvodni sustavi i
4. sistematike projektiranja.

3.4.4 Metode pokušaja i pogreške

Proizvodni sustavi su se u povijesti uvelike razvijali eksperimentalnim putem i metodom pokušaja i pogreške (eng. *Trial & Error*, T&E). Sve velike kategorije proizvodnih sustava kao što su masovna proizvodnja ili proizvodne ćelije postignuti su eksperimentalnim putem tehnikama pokušaja i pogreške. U nedostatku jasne znanosti o projektiranju to je vrlo često korišten način projektiranja proizvodnog sustava. Tri najčešće korištene metode pri tome su:

- Simulacije u proporcionalnim modelima. Ideja pri tome je da se prikupe podaci o izvodivosti i mogućnostima sustava, obično izvan proizvodnog pogona, koristeći pri tome škart proizvode ili ostale slične jeftine materijale i jednostavne alate kako bi se provjerilo funkcioniranje sustava.
- Metodom pokušaja i pogreške u punoj veličini proizvodnje uspostavlja se pilot (probna) proizvodnja koristeći svu raspoloživu opremu. Ova metoda obično slijedi nakon metode simuliranja u proporcionalnom modelu te se pri tome proizvode izratci i sustav fino podešavaju. Proizvodni sustav tako može biti potpuno iznova projektiran ukoliko ne funkcionira na prihvatljiv način.
- Iako se navedene dvije tehnike i dalje često koriste, sve češće ih zamjenjuju računalne simulacije kako bi se skratilo vrijeme eksperimenta i smanjili troškovi. Računalnim simulacijama se zapravo potvrđuje rad projekatata proizvodnih sustava. Ova tehnika može ponekad biti nedovoljno točna iz razloga što je teško matematički modelirati sva ponašanja i međudjelovanja u proizvodnom sustavu.

3.4.5 Zajedničko odlučivanje

Tvrtke često između ostalih koriste i metodu projektiranja proizvodnog sustava koja se zasniva na zajedničkom odlučivanju eksperata iz svih područja i disciplina (projektanti proizvoda, inženjeri proizvodnje, komercijalisti i sl.) okupljenih u cilju pronalaženja rješenja kako proizvesti neki proizvod. To je strukturirana vježba stvaranja ideja (eng. *brainstorming*) u cilju pronalaženja proizvodnog procesa za proizvodnju nekog proizvoda s optimalno potrebnom količinom resursa.

Jedna od najčešće korištenih metoda koja se koristi ovom tehnikom je jedna od metodi Vitke

proizvodnje – tzv. proces pripreme proizvodnje (eng. *Production Preparation Process*, 3P). Eksperti Vitke proizvodnje gledaju na 3P kao na jedno od najsnažnijih i najnaprednijih alata koji uglavnom koriste organizacije koje već imaju iskustva u implementiranju ostalih metoda Vitke proizvodnje. Dok Kaizen i ostale metode vitke proizvodnje uzimaju proizvodni proces kao gotov rezultat i traže kako ga poboljšati, 3P metoda je usmjerena prema eliminiraju gubitaka kroz proces projektiranja proizvodnog procesa (<http://www.epa.gov>). 3P obično uključuje široku grupu individualnih projektanata različitih specijalizacija u višednevnom kreativnom procesu identifikacije nekoliko alternativnih varijanti proizvodnog sustava koji će zadovoljiti postavljene zahtjeve.

3.4.6 Standardni proizvodni sustavi

Neke kompanije i poduzeća su razvile određene proizvodne sustave kao standardne unutar svoje organizacije. Kod predstavljanja novog proizvoda, proizvodni sustav se duplicira i podešava kako bi zadovoljio potrebe trenutne proizvodne potrebe. Jedan takav primjer su u aeronautičkoj industriji proizvodni sustavi za montažu bombardera B-24 i B-17 30-tih godina 20. stoljeća koji su i danas fundamentalno isti s promjenama u opremi, ljudima i sirovom materijalu (Vaughn et al., 2002.). Takav osnovni ili standardni proizvodni sustav se implementira koristeći tehnike pokušaja i pogreške te fino podešava na zadovoljavajuću razinu.

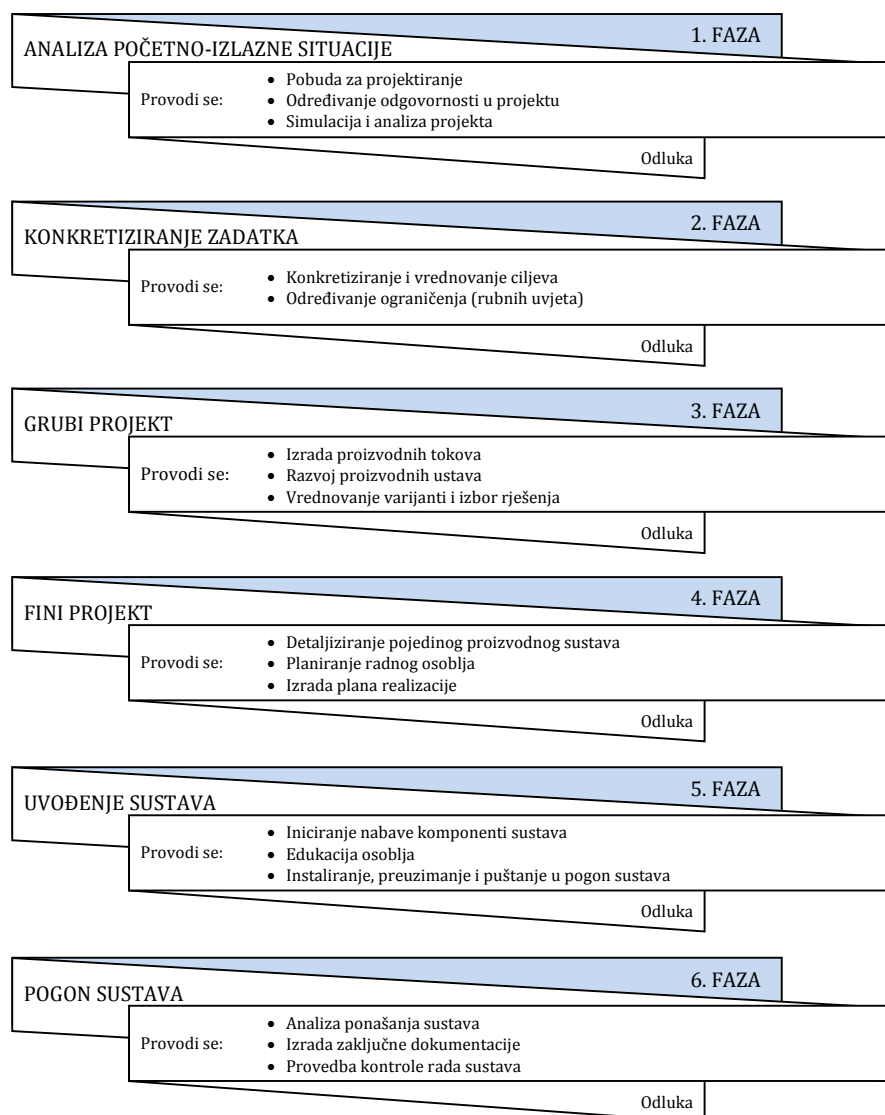
3.4.7 Sistematičke projektiranja

Već vrlo rano formirale su se metode sa sistematskim pristupom projektiranju proizvodnog sustava određivanjem redoslijeda pojedinih poslova kroz veći broj stupnjeva ili faza u okviru ukupnih projektnih aktivnosti. Jedna od poznatijih klasičnih metoda je Metoda 6 stupnjeva – REFA koja podrazumijevajući postupak rada u šest faza (postavljanje ciljeva, određivanje granica zadatka, traženje idealnih rješenja, prikupljanja podataka i traženje praktičnih rješenja, izbor optimalnog rješenja te uvođenje rješenja i kontrola ispunjenja ciljeva) osigurava neophodan sustavni pristup, ali unatoč poboljšanjima nedorečeno argumentira odabir optimalnog rješenja (Mikac, 1994.). Potreba za skraćivanjem vremena projektiranja nametnula je nužnost vrlo ranog vrednovanja i optimizacije rješenja proizvodnog sustava.

Mikac (1994.) je predstavio metodu baziranu na REFA metodi koja osigurava preglednost cijelog procesa projektiranja, slika 3.5. Posebnu kvalitetu metode predstavlja mogućnost da se podjelom sadržaja poslova na izradu grubog koncepta projekta, a zatim njegovim daljnjim detaljiziranjem, već u ranoj fazi omogući određeno vrednovanje i optimiranje koncepta proizvodnog sustava.

Cochran i Dobbs (2001.) su predstavili Dekompoziciju projektiranja proizvodnog sustava (eng. *Manufacturing System Design Decomposition*, MSDD), metodu kojom se u procesu dekompozicije

jasno identificiraju zahtjevi postavljeni pred proizvodni sustav i definiraju načini za postizanje tih zahtjeva. MSDD je zapravo primjena metodologije aksiomatskog projektiranja (eng. *axiomatic design*) kojom se predviđa jedan cilj najviše razine označen kao funkcijski zahtjev (FZ#) koji se sistematski dekomponira u načine za ostvarivanje tih zahtjeva tj. parametre projektiranja (PP#), slika 3.6.



slika 3.5 Sistematika projektiranja i uvođenja kompleksnih proizvodnih sustava (Mikac, 1994.)

Aksiomatsko projektiranje definira projektiranje kao stvaranje sintetiziranih rješenja u obliku proizvoda, procesa ili sustava koji zadovoljavaju korisničke potrebe kroz povezivanje funkcijskih zahtjeva i parametara projektiranja. Ako bi se postigao uvjet neovisnosti funkcijskih zahtjeva, potrebna je definicija načina za njihovo ostvarivanje tj. parametara projektiranja na način da oni

4 PROJEKTIRANJE PROIZVODNIH SUSTAVA

Pod modelom proizvodnog sustava podrazumijeva se takav proizvodni sustav na kojem se na optimalan način može proizvoditi određeni asortiman izradaka pri stalnim proizvodnim uvjetima. Modeli proizvodnih sustava mogu biti vrlo različiti, određujući prostornu i vremensku značajku odvijanja proizvodnog procesa kroz prostornu strukturu povezivanja proizvodne opreme u jednu zaokruženu cjelinu, te način njene informacijske povezanosti (Mikac. 1994.).

4.1 Dominantni modeli osnovnih proizvodnih sustava

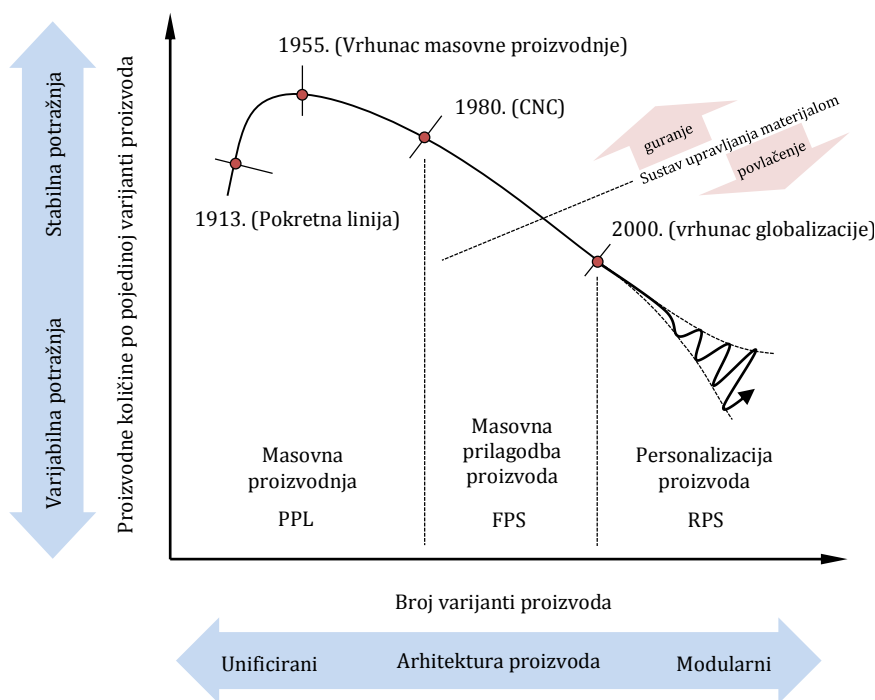
Dominantne modele proizvodnih sustava moguće je podijeliti s obzirom na vremenski period dominacije uzrokovane promjenama tržišnih i društvenih potreba na, slika 4.1 (Koren, 2010.):

- posvećene proizvodne linije, PPL (eng. *dedicated manufacturing lines*),
- fleksibilne proizvodne sustave, FPS (eng. *flexible manufacturing systems*) i
- rekonfigurabilne proizvodne sustave, RPS (eng. *reconfigurable manufacturing systems*).

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

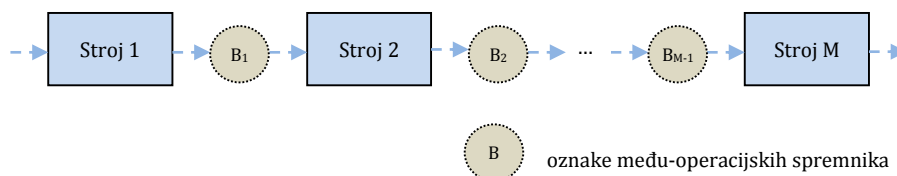
4.1.1 Posvećene proizvodne linije

Posvećena proizvodna linija (ponekad nazvana i transfer linijom) je model proizvodnog sustava dominantan u periodu masovne proizvodnje. Proizvodni sustav je sastavljen od određenog broja strojeva, odvojenih među-operacijskim spremnicima obradaka u kojima se obratci kreću u jednosmjernom prolaznom hodu od prvog do zadnjeg stroja.



slika 4.1 Proizvodne paradigme i njihove karakteristike (Koren, 2010.)

Posvećene proizvodne linije su prikladni oblik proizvodnog sustava za obradu velikih količina samo jednog proizvoda ili jedne manje obitelji međusobno vrlo sličnih proizvoda. Posvećene proizvodne linije mogu biti: sinkrone (vremena svih operacija su identična) ili asinkrone (vremena operacija se razlikuju), (Kim, 2005.). Promjena posvećene proizvodne linije kako bi se prilagodila za obradu bitno drugačijeg izratka često zahtjeva vrlo velike modifikacije na samoj opremi tj. linije su "posvećene" obradi jednog proizvoda ili jedne manje obitelji proizvoda. S druge strane, posvećene proizvodne linije su ekonomičan i visoko produktivan način proizvodnje velike količine proizvoda koji ima stabilne konstrukcijske značajke i oblik tijekom dužeg perioda vremena. No, ukoliko se potreba za proizvodnom na tržištu smanji, ovakav sustav nema potrebu raditi u svom punom kapacitetu i na taj način stvara gubitke što mu je i glavni nedostatak.

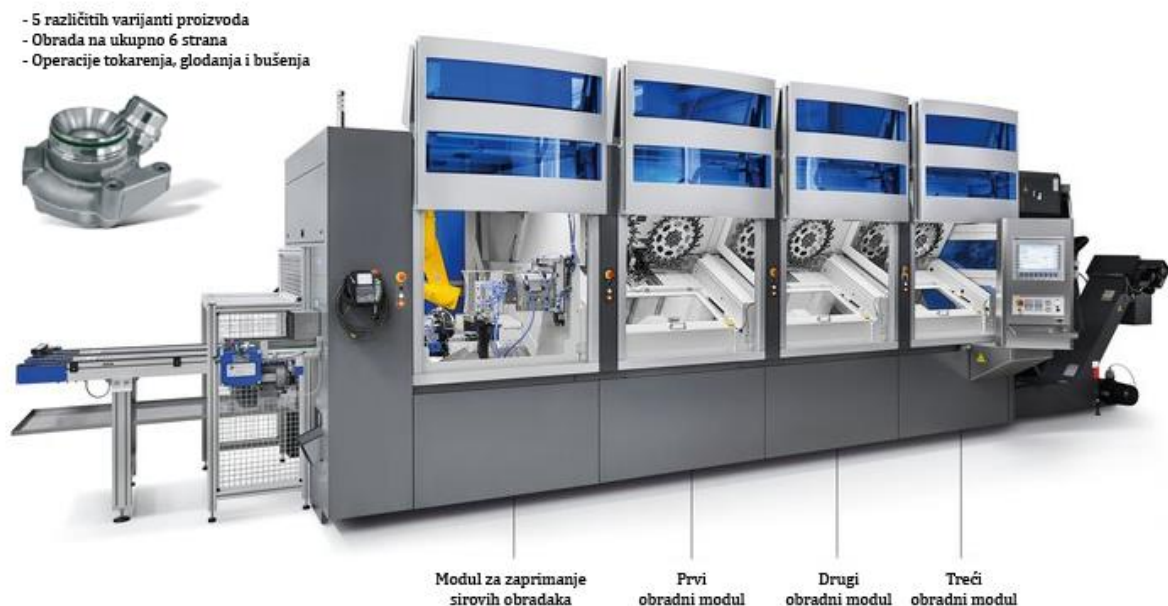


slika 4.2 Hodogram obrade u tipičnoj posvećenoj proizvodnoj liniji (PPL)

Jedan poseban oblik posvećenih proizvodnih linija odnosi se na sustav tekućeg protoka materijala (eng. *continuous flow system*) gdje materijal obrade fizički putuje (teče) kroz sustav kojeg sačinjava oprema različitih vrsta. U takvim se sustavima najčešće proizvode razni proizvodi u

obliku tekućina, plinova ili rasutog materijala. Rafinerije, tvornice za kemijsku preradu i tvornice za proizvodnju hrane najčešće koriste ovakve proizvodne sustave za preradu svojih proizvoda. Iako je tekući protok nefleksibilan i zahtjeva stabilan dizajn proizvoda, vrlo je učinkovit, može biti visoko automatiziran te ima najmanje poluproizvoda u procesu (ako ih ima uopće).

Drugi poseban oblik posvećenih proizvodnih linija čine tzv. fleksibilne posvećene proizvodne linije koju čine obradni centri s više-vretenastim glavama koje mogu biti relativno brzo zamijenjene. Pri tome ne postoji zapravo nikakvo pripremno-završno vrijeme kod prelaska s jednog na drugi proizvod. Takve transfer linije su po svom konceptu bliže fleksibilnom proizvodnom sustavu ali ipak ograničene na manju grupu sličnih proizvoda ili obitelj proizvoda. Izratci različitih tipova proizvoda se kreću u grupama kako bi se reduciralo ukupno pripremno-završno vrijeme opreme. Neki proizvođači opreme poput švicarske tvrtke Mikron proizvode modularne fleksibilne transfer proizvodne linije koji su visoko-produktivno rješenje za obradu manje obitelji sličnih proizvoda, poput više varijanti kućišta turbokompresora prikazanih u nastavku, slika 4.3. Modul za zaprimanje sirovih obradaka i otpremanje gotovih izradaka može imati mogućnosti kontrole pojedinih karakteristika kvalitete dok su obradni moduli izmjenjivi i imaju mogućnost nadogradnje čime se osigurava svojstvo modularnosti sustava. Pripremno-završno vrijeme prema deklaraciji proizvođača za stroj Mikron Multistep XT-200 iznosi do 20 minuta.



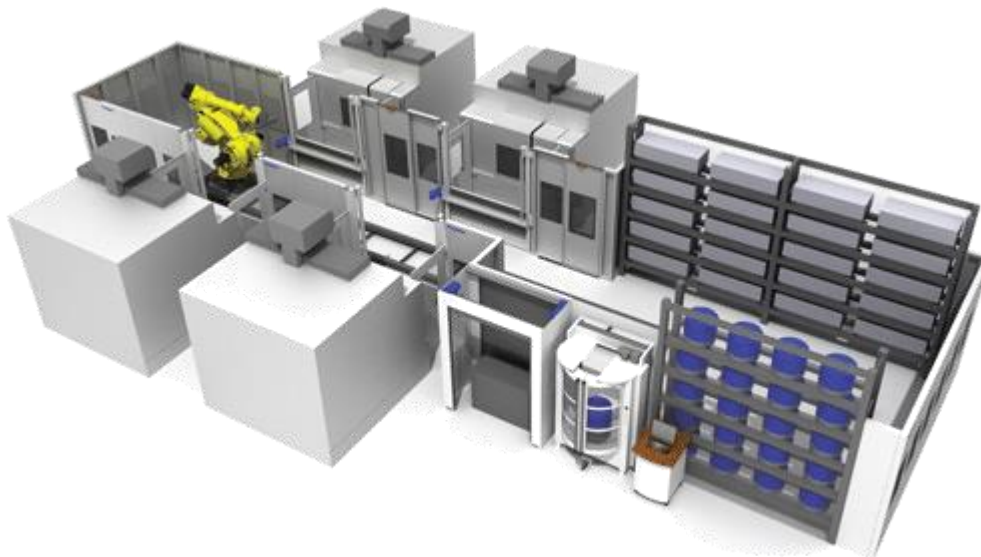
slika 4.3 Fleksibilna posvećena proizvodna linija Mikron Multistep XT-200 (www.mikron.com)

Izazovi suočavanja s velikim tržišnim fluktuacijama u potrebnoj količini proizvoda ne mogu biti riješena s posvećenim proizvodnim linijama jer one nisu skalabilne u smislu proizvodnog

kapaciteta. Istraživanje Tolia i Matte (1998.) pokazuje kako proizvođači u automobilskoj industriji imaju nisku prosječnu iskorištenost posvećenih proizvodnih linija od samo 53%. Razlog tako slaboj iskorištenosti je u tome što se nekim proizvodima u kasnijoj fazi njihovog životnog vijeka smanjuju potrebne tržišne količine. I obrnuto, posvećene proizvodne linije posustaju odgovoriti zahtjevima kad proizvodne količine porastu iznad količina prema kojima je proizvodni sustav projektiran. Ukoliko popularnost proizvoda na tržištu nadmaši očekivanja ili kad se pronađu novi oblici primjene proizvoda ili otvore nova tržišta, posvećene proizvodne linije ne mogu adekvatno odgovoriti na tržišne potrebe.

4.1.2 Fleksibilni proizvodni sustavi

Na navedene nedostatke PPL-a teoretski je moguće odgovoriti fleksibilnim proizvodnim sustavima. Fleksibilne proizvodne sustave ili "fleksibilne proizvodne ćelije", čine računalno numerički upravljani (eng. *Computer Numerically Controlled, CNC*) strojevi, slika 4.4.



slika 4.4 Fleksibilni proizvodni sustav, FPS (www.fastems.com)

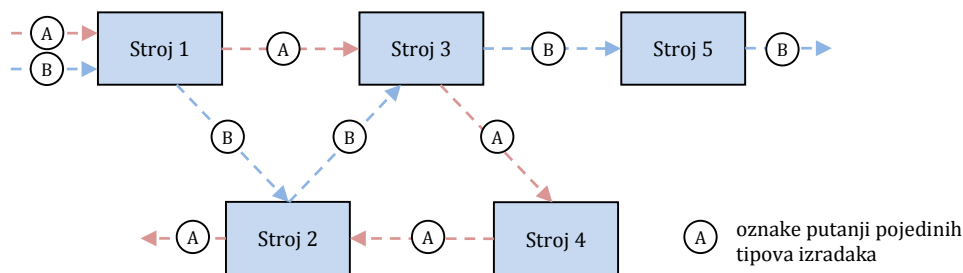
Proizvodna ćelija je skup različite opreme, alata i procesa smještene u jedan prostor radi proizvodnje jedne skupine proizvoda. Proizvodnja u ćelijama (eng. *cellular manufacturing*) se zasniva na principima grupne tehnologije u kojoj se izradci grupiraju u obitelji proizvoda na način da se povezuju oni sličnog oblika ili veličine koji se obrađuju sličnim proizvodnim procesima i alatima. Obitelj proizvoda pri tome čine proizvodi tehnoloških sličnosti, a ne tržišnih. Pripremno-završna vremena opreme su značajnija i minimiziranje pojave tih vremena i njihovog skraćivanja su tema velikog broja znanstvenih istraživanja proizvodnih ćelija (Ruben i Mahmoodi, 1999.). Za razliku od opreme PPL-a, CNC strojevi nisu projektirani oko određene obitelji 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 ih na način kako bi imale što je moguće više ugrađenih funkcionalnosti. No, sve su takve implementirane funkcionalnosti u praksi često nedovoljno iskorištene i doprinose ukopnim gubicima u investiranom kapitalu. Koren (2006.) navodi i da je učestala pretpostavka kako bi FPS trebali imati mogućnosti proizvoditi bilo kakav izradak unutar deklariranih dimenzija prihvatna stroja kao i proizvoditi bilo kakvu obitelj proizvoda u bilo kakvom redoslijedu obrade. Takva pretpostavka povećava ukupne troškove ovakvog sustava jer zahtjeva strukturu FPS-a koja koristi 5-osne CNC strojeve s velikim magazinima alata što predstavlja vrlo skupo rješenje.

Izraz ćelija se vrlo često koristi u terminologiji proizvodnih sustava te se generalno istražuju dvije vrste konfiguracija proizvodnih ćelija: jednostavne ćelije i ćelije jednosmjernog kretanja izradaka. U jednostavnim proizvodnim ćelijama karakterističan je različit i ispremiješan tok materijala pojedinih tipova izradaka po različitim putanjama unutar ćelije tj. upravo onakav tok materijala kakav je karakterističan za radionice pa se ovakve ćelije nazivaju i radioničkim ćelijama. Proizvodne ćelije jednosmjernog kretanja izradaka karakterizira zajednička putanja svih tipova izradaka iz iste obitelji izradaka kroz sustav.

4.1.2.1 Jednostavna (radionička) ćelija

Radionička ili jednostavna ćelija je skup cjelokupne opreme, alata i procesa potrebnih za obradu jedne obitelji proizvoda. Ovakve ćelije obično nisu računalno upravljane, no mogu sadržavati računalno upravljani manipulator materijalom. Putanje kretanja materijala kroz sustav mogu se potpuno razlikovati za svaku tip izradaka, a hod materijala kroz sustav može biti jednosmjernan ili dvosmjernan, prolazni ili povratni, slika 4.5.

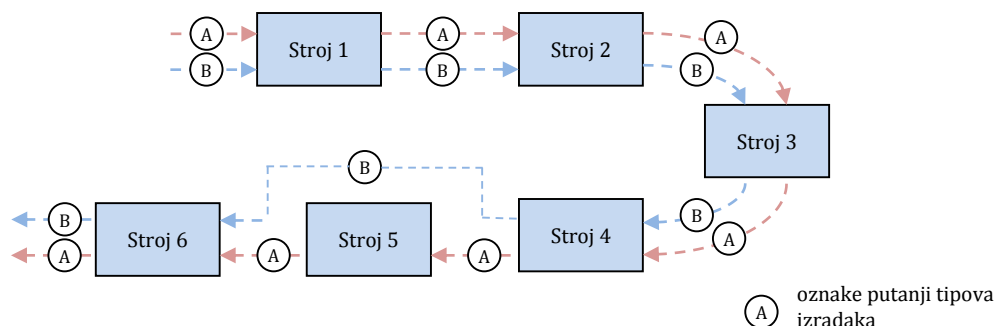


slika 4.5 Hodogram obrade u tipičnoj radioničkoj ćeliji

4.1.2.2 Ćelija jednosmjernog kretanja izradaka

Ćelija jednosmjernog kretanja izradaka je proizvodni sustav koji se sastoji od proizvodnih i montažnih strojeva povezanih sustavom povlačenja materijala. Operacije i procesi su grupirani prema proizvodnom redoslijedu koji je potreban za proizvodnju grupe proizvoda. Proizvodna

oprema je uglavnom automatska i često se postavlja u „U“ oblik prostornog rasporeda kako bi se omogućilo jednostavnije kretanje radnika između strojeva i obavljanje ulaganja i skidanja izradaka sa strojeva, slika 4.6.



slika 4.6 Hodogram obrade u ćeliji jednosmjernog kretanja izradaka

Usprkos prednosti proizvodnje širokog spektra proizvoda u istom proizvodnom sustavu, istraživanja pokazuju kako FPS nisu široko prihvaćeni i mnoge proizvodne organizacije koje su ih implementirale nisu potpuno zadovoljne s njihovim mogućnostima (Koren, 2006.). Njihov nedostatak je taj da iziskuju skuplju opremu od posvećenih proizvodnih linija, a zbog karakteristike CNC strojeva da u jednom trenutku koriste samo jedan alat, proizvodnost fleksibilnih proizvodnih sustava je vrlo mala naspram posvećenih proizvodnih linija, tablica 4.1.

tablica 4.1 Usporedba trenutno dominantnih modela proizvodnih sustava (Koren, 2006.)

Posvećena proizvodna linija (PPL)	Fleksibilni proizvodni sustav (FPS)
Ograničenja:	Ograničenja:
<ul style="list-style-type: none"> – Nefleksibilnost – samo za obradu jedne manje obitelji sličnih proizvoda – Fiksna kapacitet proizvodnje 	<ul style="list-style-type: none"> – Skup – Sporost – operacija sa samo jednim alatom u istoj jedinici vremena
Prednosti:	Prednosti:
<ul style="list-style-type: none"> – Jeftino rješenje za obradu velike količine proizvoda – Brzina – operacije s više alata odjednom 	<ul style="list-style-type: none"> – Mogućnosti obrade veće obitelji različitijih proizvoda – Promjenjiv kapacitet proizvodnje

4.1.3 Rekonfigurabilni proizvodni sustavi

Od sredine 1990-tih godina, rastuća globalizacija i nagli porast konkurencije među proizvođačima na svjetskom tržištu, učinili su fleksibilne proizvodne sustave samo djelomično dobrim rješenjem proizvodnog sustava koji može biti konkurentan u takvim okolnostima. Tipični fleksibilni proizvodni sustav ima relativno lošu proizvodnost (kom./d) te slabu mogućnost odgovora na promjene potrebnih proizvodnih količina. Pošto proizvodni sustav mora biti sposoban zadovoljiti

strateške ciljeve poslovnog sustava (Cochran, 2002.), kad se zahtjevi s tržišta neprestano mijenjaju, strateški cilj tvrtki je pratiti te zahtjeve brzim i troškovno učinkovitim promjenama mogućnosti svojih proizvodnih sustava. To je moguće postići jedino povećanjem ili smanjenjem fizičke strukture sustava što je nemoguće postići tradicionalnim modelima proizvodnih sustava kao što su PPL i FPS (Koren i Shiptalni, 2010.). Proizvodne tvrtke u 21. stoljeću moraju, kako bi zadržale svoju konkurentnost, projektirati proizvodne sustave koji imaju sposobnost proizvoditi visoko kvalitetne proizvode po niskoj cijeni ali i brzo odgovoriti na promjene zahtjeva tržišta. Sama fleksibilnost više nije konkurentska prednost, već u prvi plan dolazi brzina reakcije na promjene. U literaturi se tako pojavljuje pojam odziva proizvodnog sustava na potrebu promjene. Proizvodni sustav s dobrim odzivom na potrebu promjene ima mogućnost brze i troškovno učinkovite prilagodbe na:

1. tržišne promjene, uključujući promjene potrebnih količina proizvoda
2. konstrukcijske promjene proizvoda ili uvođenje potpuno novih proizvoda
3. pojave kvara u sustavu.

Navedene promjene su uzrokovane agresivnim konkurentnim tržišnim okruženjem, sve zahtjevnijim kupcima i korisnicima te naglom dinamikom promjena u tehnologiji proizvodnje. Brzina odziva tako postaje novi strateški cilj proizvodnih tvrtki te postaje konkurentska prednost. Niti jedan od tradicionalnih modela proizvodnih sustava poput posvećenih proizvodnih linija ili fleksibilnih proizvodnih sustava nemaju dobar odziv na takve vrste promjena. Iako fleksibilni proizvodni sustavi 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 pojave kvara u sustavu. Troškovno učinkovit odgovor na tržišne promjene zahtijevao je novi proizvodni pristup koji kombinira prednosti posvećenih proizvodnih linija s fleksibilnošću fleksibilnih proizvodnih sustava, a koji je istovremeno sposoban reagirati na promjene brzo i učinkovito.

Rekonfigurabilni proizvodni sustav je sustav iz početka projektiran na način kako bi bio sposoban naglo promijeniti strukturu, kako mehanički tako i računalno, a u cilju brze promjene proizvodnih kapaciteta i funkcionalnosti unutar jedne obitelji proizvoda (Koren, 2006.). Ukoliko sustav iz početka nije projektiran na takav način, proces rekonfiguracije može biti dugotrajan i skup. RPS obuhvaća najbolje kvalitete PPL i FPS sustava. Troškovi životnog ciklusa sustava posvećene proizvodne linije su niski u uvjetima pune količine proizvodnje, dok se prilikom smanjenja proizvodnih količina povećavaju zbog manje iskorištenosti sustava. Troškovi životnog ciklusa fleksibilnih proizvodnih sustava su razumni u uvjetima proizvodnje različitih proizvoda u niskim količinama, dok su u svim ostalim slučajevima visoki. Troškovi RPS-a su srednji za proizvodnju

srednje-velikih do velikih količina novih proizvoda i u uvjetima promjenjivih količina tijekom životnog ciklusa sustava, tablica 4.2. RPS objedinjuje najbolje kvalitete PPL i FPS proizvodnih sustava. Primjerice, RPS se kao i PPL bazira oko jedne obitelji proizvoda, primjerice kućišta turbokompresora. Između svakog pojedinog modela kućišta turbokompresora postoje razlike, no između njih je i puno konstrukcijskih i tehnoloških sličnosti. Projektantima se tako omogućuje projektiranje tehnoloških procesa na način da se uključe različite izvedbe proizvoda jedne obitelji s minimalnim odstupanjima od zajedničkog obrasca. Na taj način je obuhvaćena kvaliteta visoke proizvodnosti posvećenih proizvodnih linija.

tablica 4.2 Usporedba mogućnosti i svojstava PPL, RPS i FPS sustava (Koren, 2006.)

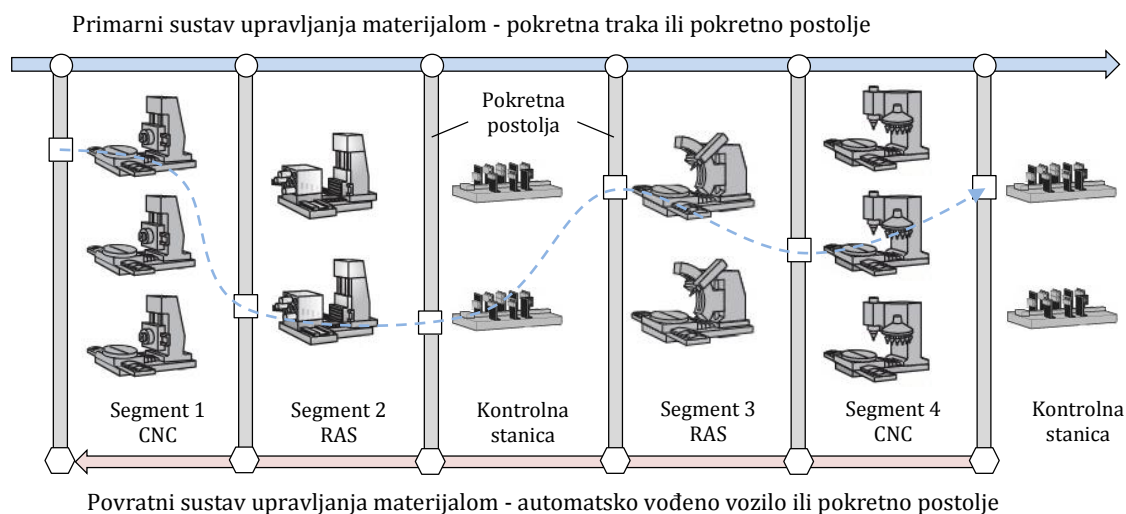
	Posvećena proizvodna linija	Rekonfigurabilni proizvodni sustavi	Fleksibilni proizvodni sustavi
Struktura sustava	Fiksna	Promjenjiva	Promjenjiva
Struktura strojeva	Fiksna	Promjenjiva	Fiksna
Usmjerenost sustava na	Proizvod	Obitelj proizvoda	Stroj
Mogućnost nadogradnje	Ne	Da	Da
Fleksibilnost	Ne	Prilagodljiva	Općenita
Skalabilnost	Ne	Da	Da
Simultanost operacija	Da	Da	Ne
Proizvodnost	Visoka	Visoka	Niska
Trošak	Nizak	Srednji	Razuman do visok

Idealan rekonfigurabilni proizvodni sustav ima šest osnovnih značajki: modularnost, integrabilnost, prilagodljivost, skalabilnost, konvertibilnost i dijagnostibilnost (mogućnost detektiranja pomaka karakteristika sustava i karakteristika proizvoda). Tipični rekonfigurabilni sustav ima nekoliko od navedenih značajki ali ne nužno sve njih (Koren i Ulsoy, 2002.). RPS sačinjavaju CNC strojevi i rekonfigurabilni alatni strojevi (RAS) povezani sustavom transporta materijala, slika 4.7.

Fizičku implementaciju kontrolnog podsustava čini kontrolna oprema raspoređena u kontrolne stanice. Iako unutar jedne obitelji proizvoda postaje razlike u karakteristikama proizvoda, njihova osnovna konfiguracija može biti vrlo slična. To omogućuje da se rekonfigurabilni proizvodni strojevi projektiraju oko sličnosti koje su karakteristične za određenu obitelj proizvoda te da se lakom i troškovno učinkovitom rekonfiguracijom sustava mogu obraditi svi proizvodi iz iste obitelji proizvoda. Dva su osnovna cilja projektiranja rekonfigurabilne proizvodne opreme:

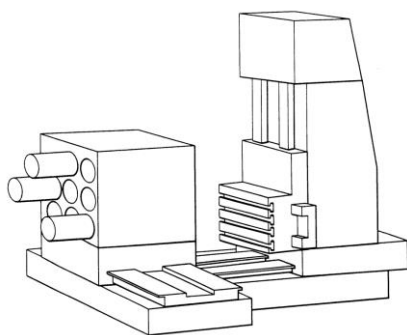
1. projektiranje proizvodne opreme kojoj je dodavanjem odgovarajućih modula moguće povećati proizvodnost [kom./d] i

2. projektiranje proizvodne opreme koja ima mogućnost adaptacije svoje funkcionalnosti kako bi bila sposobna obrađivati sve postojeće i nove proizvode iz obitelji proizvoda.

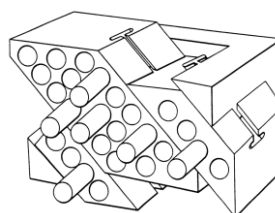


slika 4.7 Tipična arhitektura rekonfigurabilnog proizvodnog sustava

Rekonfigurabilni alatni stroj baziran na CNC stroju s promjenjivim alatnim modulom kojim je osigurana rekonfigurabilnost dovoljnu za jednu obitelj proizvoda prikazan je u nastavku, slika 4.8, slika 4.9 (Koren i Ulsoy, 2002.).



slika 4.8 Rekonfigurabilni alatni stroj (RAS)



slika 4.9 Promjenjivi alatni modul

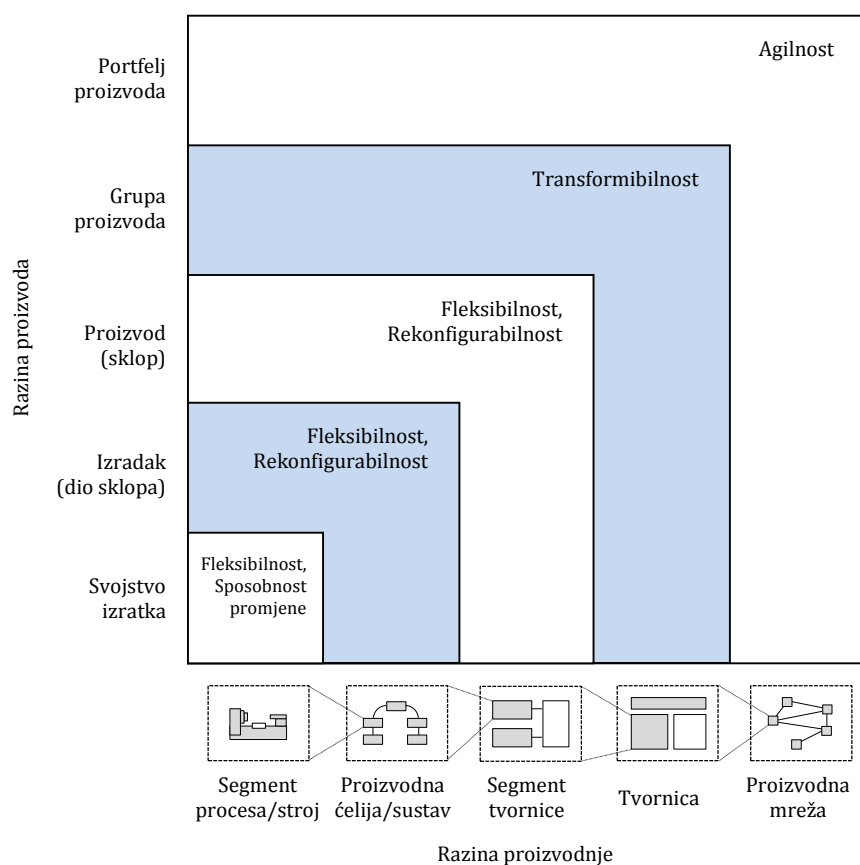
Osim na razini proizvodne opreme, rekonfigurabilni proizvodni sustav je skalabilan i na razini cijelog sustava. Različiti rasporedi i postavke navedenih elemenata RPS-a utječu na proizvodnost ovakvog sustava. Skalabilnost proizvodnosti omogućena je dodavanjem strojeva u postojeću konfiguraciju sustava bez promjene osnovne strukture sustava. Promjena konfiguracije sustava odnosi se na mogućnost brze i troškovno učinkovite promjene, npr. dodavanja dodatnog CNC stroja ili pokretne trake.

4.2 Izlazne značajke rješenja proizvodnih sustava

Postizanje optimalnog rješenja proizvodnog sustava ne podrazumijeva apsolutno najbolje vrijednosti svih izlaznih značajki koje predstavljaju važne kriterije formiranja i eksploatacije proizvodnog sustava. Izlazne značajke je potrebno poznavati prije početka projektiranja proizvodnog sustava kako bi se osigurao njihov utjecaj na postupak projektiranja (Mikac, 1994.). Izlazne značajke se najčešće definiraju kao: promjenjivost, proizvodnost, potrebna investicijska ulaganja, upravljivost, pouzdanost, sposobnost, potrebne efektivne površine, troškovi, socijalni aspekt i utjecaj na okolinu.

4.2.1 Promjenjivost na razini tvornice

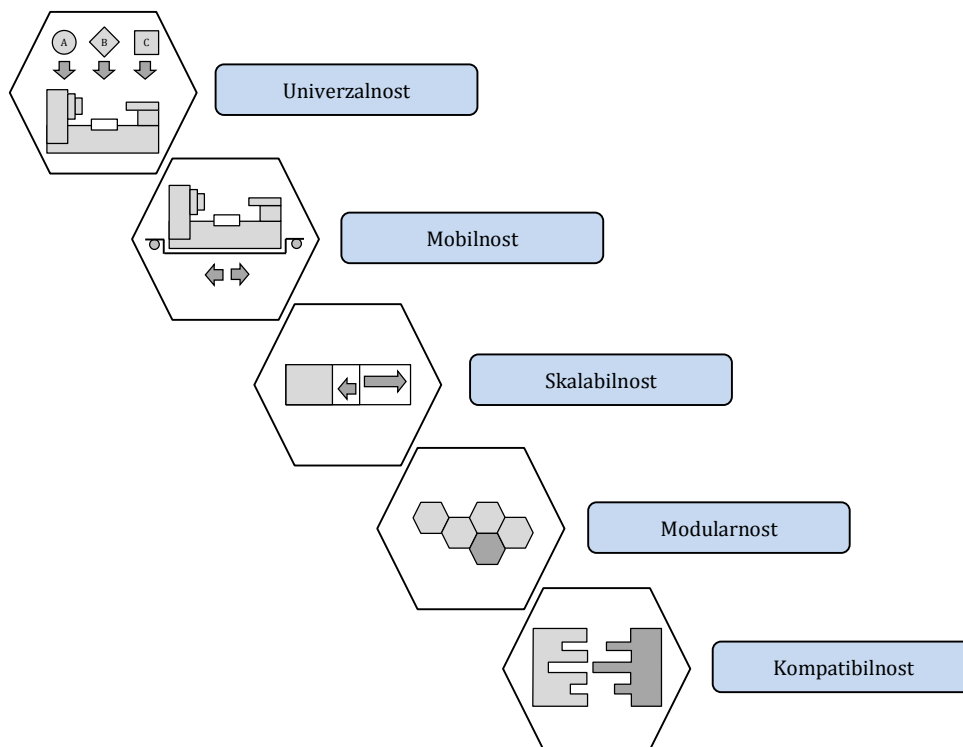
Koncept fleksibilne, rekonfigurabilne i promjenjive tvorničke infrastrukture koja ima mogućnost promjene proizvodne opreme i rekonfiguracije sustava rezonira s jednim općim pojmom - pojmom promjenjivosti. Wiendahl i Heger (2003.) su zaključili da tradicionalno korišten pojam fleksibilnosti nije preporučljivo primjenjivati na cijelu tvornicu pa su klasificirali pojmove promjenjivosti na hijerarhijskoj skali. Različitim definicijama pojma promjenjivosti prikazanim u nastavku, slika 4.10, moguće je raščlaniti ukupno pet vrsta promjenjivosti:



slika 4.10 Vrste promjenjivosti

1. Sposobnost promjene označava operativnu mogućnost pojedine proizvodne opreme ili radne stanice da izvodi drugačije operacije na poznatom izratku uz minimalan napor i minimalni vremenski odmak među drugačijim operacijama.
2. Rekonfigurabilnost predstavlja operativne mogućnosti proizvodnog sustava ili sustava za montažu da, kroz dodavanje ili oduzimanje svojih funkcionalnih elemenata uz minimalni napor i vremenski odmak, obrađuje različite izratke iz poznate grupe proizvoda.
3. Fleksibilnost se odnosi na taktičku sposobnost cjelokupnog proizvodnog ili logističkog područja tvornice da se u razumno malo vremena i napora prenamijeni za proizvodnju druge, makar slične, grupe ili obitelji proizvoda.
4. Transformibilnost označava taktičku mogućnost cijele tvorničke strukture da se prenamijeni za obradu druge obitelji proizvoda.
5. Agilnost označava stratešku mogućnost cjelokupne tvrtke da si otvara nova tržišta, da za u tu svrhu razvija neophodne proizvode i proizvodne kapacitete.

ElMaraghy (2006. i 2009.) navodi pet osnovnih svojstava svih tvorničkih struktura koja omogućuju promjenjivost na razini tvornice, slika 4.11. Ta se svojstva promatraju uglavnom na razini segmenta tvornice ili cijele tvornice, a tiču se tvorničkih struktura, rasporeda i konfiguracije tvorničkih sustava.



slika 4.11 Svojstva koja omogućavaju promjenjivost proizvodnih sustava (ElMaraghy, 2006.)

4.2.1.1 Univerzalnost

Univerzalnost predstavlja svojstvo pojedinih dijelova tvorničkog sustava kojom im se omogućava da prihvate i uspješno izvrše različite zadatke, zadovolje različite zahtjeve te da imaju različitu namjenu. To svojstvo im je omogućeno kroz njihovo projektiranje i dimenzioniranje te često uključuje predimenzioniranje objekata kako bi se osigurala neovisnost funkcije i korištenja pojedinog dijela tvorničkog sustava.

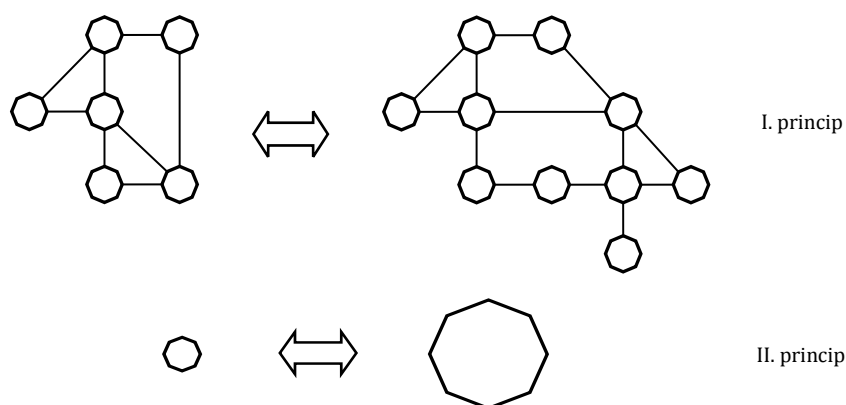
4.2.1.2 Mobilnost

Svojstvo mobilnosti omogućava neometano kretanje objekata u tvorničkom sustavu. Ono pokriva sve proizvodne sustave kao i prateće sustave, uključujući i građevinske objekte i njihove dijelove, koji mogu biti pomaknuti na različite lokacije s minimalnim uloženim naporom.

4.2.1.3 Skalabilnost

Skalabilnost je izvedenica glagola skalirati, a koji je izvedenica od imenice skala (lat. *scala*). U terminologiji proizvodnih sustava, skaliranje znači stvaranje novog modela proizvodnog sustava proporcionalno većeg za određenu veličinu. Skalabilan proizvodni sustav je onaj koji ima sposobnost jednostavnog proširenja ili nadogradnje kada se za to javi potreba (Putnik et al., 2013.). 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.
- II. princip: Jedan element konfiguracije može povećati ili smanjiti svoje parametre kako bi pružio skalabilnost, slika 4.12.



slika 4.12 Prvi i drugi princip skalabilnosti (Fricke i Schulz, 2005.)

4.2.1.4 Modularnost

Svojstvo modularnosti zasnovano je na ideji standardnih, unaprijed provjerenih jedinica sustava koji predstavljaju elemente sustava povezane standardiziranim sučeljem. Ovo svojstvo primjenjivo je na tehničke dijelove tvornice (proizvodne sustave, građevinske objekte, instalacije

i informatičke sustave) kao i na organizacijske strukture (funkcijske organizacijske jedinice). Moduli su autonomni elementi tvornice projektirani (oblikovani) u cilju osiguravanja njihove visoke izmjenjivosti uz minimalno uloženi napor i troška.

4.2.1.5 Kompatibilnost

Svojstvo kompatibilnosti omogućava različite interakcije unutar tvornice kao i interakciju s elementima izvan tvornice. Ovo svojstvo se primarno odnosi na sve vrste sustava dobava materijala i informacija. Njime je omogućeno uključivanje ili isključivanje određenog proizvoda ili grupe proizvoda (elemenata, komponenti), proizvodnih struktura i proizvodnih procesa uz minimalan napor i trošak.

4.2.2 Promjenjivost na razini proizvodnog sustava

Na razini proizvodnog sustava ili sustava za montažu, promjenjivost se osigurava ključnim svojstvima rekonfigurabilnih proizvodnih sustava. Prilagodljivost, skalabilnost i konvertibilnost su ključna svojstva rekonfigurabilnosti. Modularnost, integrabilnost i dijagnostibilnost su dodatna svojstva rekonfigurabilnih proizvodnih sustava koja omogućuju brzu rekonfiguraciju sustava ali ne garantiraju promjene u kapacitetu proizvodnje i funkcionalnost sustava, tablica 4.3.

tablica 4.3 Klasifikacija svojstava koji omogućuju promjenjivost na razini proizvodnog sustava

Ključna svojstva promjenjivosti	Dodatna svojstva promjenjivosti
Prilagodljivost	Modularnost
Skalabilnost	Integrabilnost
Konvertibilnost	Dijagnostibilnost

4.2.2.1 Prilagodljivost

Svojstvo prilagodljivosti predstavlja sposobnost proizvodnog sustava da proizvodi određen broj različitih izradaka. Takvo svojstvo se proizvodnom sustavu dodjeljuje pri njegovom projektiranju, a ovisi o veličini planirane obitelji (grupe) proizvoda. Obitelj proizvoda predstavlja skup proizvoda, npr. nekoliko tipova blokova motora ili nekoliko tipova mikroprocesora ili svi tipovi Boeinga 747 (Koren, 2006.). U kontekstu rekonfigurabilnih proizvodnih sustava, obitelj proizvoda predstavljaju svi proizvodi koji imaju slična geometrijska svojstva i oblik, istu razinu tolerancija, koja zahtijevaju isti proces i u istom su rasponu cijena koštanja. Prilagođena fleksibilnost u RPS terminologiji znači kako dominantno svojstvo ili karakteristika jedne grupe proizvoda određuje ukupnu sposobnost konfiguracije sustava.

4.2.2.2 Skalabilnost

Skalabilnost kapaciteta proizvodnog sustava predstavlja sposobnost promjene kapaciteta

sustava. U literaturi posljednjih godina postoji velik broj definicija i istraživanja koja se bave istraživanjem skalabilnosti u proizvodnim sustavima (Spicer et al., 2005., Koren, 2010., itd.). Dodavanjem jednog stroja na jedan od segmenata proizvodnog sustava omogućuje se povećanje proizvodnog kapaciteta cijelog sustava za određeni inkrement. Rekonfigurabilne konfiguracije proizvodnih sustava imaju daleko veću skalabilnost od konfiguracija proizvodnih ćelija jer kod ćelijskih oblika konfiguracija treba biti dodana cijela jedna linija 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 dugi vremenski period. Skaliranje pojedine konfiguracije proizvodnog sustava 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.

4.2.2.3 *Konvertibilnost*

Svojstvo konvertibilnosti predstavlja sposobnost lake i brze adaptacije proizvodnog sustava za proizvodnju nekog drugog proizvoda iz postojeće obitelji proizvoda. Konvertibilnost se može promatrati u nekoliko razina. Na razini strojeva, konverzija može biti potrebna prilikom završetka perioda proizvodnje jednog izratka iz obitelji proizvoda i početka perioda proizvodnje drugog izratka iz iste obitelji. Takva konverzija može zahtijevati promjenu alata ili promjenu određenog parametra procesa. Konverzija na razini strojeva koja se izvodi na dnevnoj bazi mora biti brza i učinkovita. 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 strojeva u cilju povećanja raspona funkcionalnosti proizvodnog sustava.

4.2.2.4 *Modularnost*

U rekonfigurabilnom proizvodnom sustavu, sve glavne komponente sustava (strukturalne komponente, kontrolne komponente, softver, alati) su modularne. Takvo svojstvo sustava omogućuje zamjenu ili nadogradnju komponenti kad je to potrebno. Pojedine module je lakše održavati nego stroj ili sustav u cjelini.

4.2.2.5 *Integrabilnost*

Svojstvo integrabilnosti sustava predstavlja sposobnost lakog i brzog integriranja (trenutnih i budućih) komponenti i podsustava u ostatak sustava. Iako u svijetu postoji na stotine proizvođača alata, samo mali dio ih je sposoban opskrbljivati potpuno integrirane fleksibilne sustave za visoko-serijsku proizvodnju. Razlog tome je nedostatak metodologije integracije u sustav (Koren, 2006.). Kako bi se pomoglo boljoj integraciji komponenti u sustav potrebno je ustanoviti skup pravila za

njihovu integraciju. Takva bi pravila u domeni proizvodne opreme trebala dozvoliti projektantima proizvodnih sustava da povežu grupe svojstava proizvoda s njima pripadajućim operacijama strojne obrade u strojne module, time omogućujući integraciju proizvoda i proizvodnog procesa.

4.2.2.6 Dijagnostibilnost

Svojstvo dijagnostibilnosti predstavlja brzinu identifikacije problema kvalitete i pouzdanosti proizvodnog sustava. Dijagnostibilnost ima dva aspekta: detektiranje ispada komponente s ustava i identifikaciju korijenskog uzroka pogreške. Identifikacija korijenskog uzroka pogreške je posebno važna iz razloga u rekonfigurabilnim proizvodnim sustavima iz razloga što oni po svojoj prirodi često mijenjaju svoju konfiguraciju.

4.2.3 Upravlјivost odvijanja procesa

Operativna upravljivost procesa važan je element optimiranja proizvodnog sustava, a izražava se preciznošću terminiranja svih događaja unutar proizvodnog procesa što utječe na brzinu protoka materijala kroz proizvodni proces. Bolju upravljivost osiguravaju sustavi s kraćim vremenima obrade, jednostavnijim tokom materijala, minimalnim gubicima vremena sa stajališta tehničko-organizacijskih zastoja. Smanjenje potrebnih transportnih putanji materijala kroz sustav i smanjenje veličina među-operacijskih spremnika materijala bitno pridonose povećanju upravljivosti i smanjenje troškova.

4.2.4 Proizvodnost

Proizvodnost je jedna od najčešće korištenih pokazatelja efikasnosti proizvodnog sustava. U kontekstu razvoja novih promjenjivih fleksibilnih struktura proizvodnost je pogodno izraziti kao mjeru tehničke sposobnosti opreme na osnovu zbira vremenskog opterećenja svih radnih mjesta u okviru modela osnovnog proizvodnog sustava po jedinici proizvoda. Pretpostavke visoke proizvodnosti su kratka vremena operacija (strojna i pomoćna) te kraća pripremno-završna vremena po jedinici proizvoda što podrazumijeva upotrebu što produktivnije i promjenjivije opreme i alata (Mikac, 1994.).

4.2.5 Pouzdanost

Pouzdanost tehnološkog i proizvodnog procesa važan je element proizvodnosti i dosegnute razine kvalitete konačnog proizvoda, a prvenstveno ovisi o pouzdanosti proizvodnog sustava koja se iskazuje otpornošću na učestalost pojava tehnički uvjetovanih zastoja kao posljedica izravnih kvarova proizvodne opreme ili neizravnih kvarova komponenti sustava kao i mogućnošću njihovog brzog otklanjanja (Budenbender i Scheller, 1987.). Analiza utjecaja i posljedica pogrešaka FMEA kao sistematska tehnika analize pogrešaka koja je često korišten alat za analizu

pouzdanosti proizvodnog sustava i analizu posljedica nastanka kvara u sustavu. Uspješno provedena analiza utjecaja i posljedica pogrešaka pomaže projektantima da identificiraju moguće kvarove koristeći ranija iskustva sa sličnim proizvodima i procesima. Na taj način sustavno vođenje zapisa o učestalosti pojavljivanja određene vrste pogreške, zapažanja uvjeta njihovog nastanka i njihove posljedice mogu pomoći u boljem predviđanju i pravovremenom sprječavanju nastanka istih ili sličnih pogrešaka u sustavima koji se tek projektiraju.

4.2.6 Raspoloživost

Raspoloživost sustava je iskazana stupnjem vremenskog iskorištenja sustava. Neiskorištena vremena osim zastoja zbog izravnih kvarova opreme i neizravnih kvarova ostale opreme u sustavu uključuju i tehnički uvjetovane zastoje sustava koji su uvjetovani karakteristikama sustava. Osim takvih tehnički uvjetovanih zastoja, ukupno bruto vrijeme raspoloživosti sustava umanjeno je i za organizacijski uvjetovane zastoje (korekcije programa, nepravovremeno dostavljen materijal i sl.).

4.2.6.1 Raspoloživost proizvodne opreme

Raspoloživ dnevni kapacitet i -te proizvodne opreme formulira se kao vremenska raspoloživost prema izrazu

$$K_{i,dn} = 60 \cdot h \cdot s_{dn} \cdot \eta_{bt} \text{ [minuta]} \quad (4.1)$$

pri čemu je h vremenski interval trajanja smjene, s_{dn} broj radnih smjena na dan, a η_{bt} stupanj iskoristivosti bruto raspoloživog vremena, ovisan o modelu proizvodnog sustava i udjelu pripremno-završnog vremena. Raspoloživ vremenski kapacitet sustava može primjenom različite proizvodne opreme poprimiti različite veličine. Samo odvijanje proizvodnje izražava se opterećenjem kapaciteta koje podrazumijeva ukupno vrijeme obrade na jednom proizvodnom kapacitetu u određenom vremenskom razdoblju. Tako je vremensko opterećenje i -te opreme jednako (Mikac, 1994.)

$$t_i = \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^{z_{ij}} t_{rij} \cdot q_j \text{ [minuta]} \quad (4.2)$$

pri čemu je

- j redni broj proizvoda od ukupno N proizvoda koliko se obrađuje na i -toj opremi,
- t_{rij} vrijeme trajanja r -te od ukupno z_{ij} operacija koje se izvode na i -toj opremi pri obradi j -tog proizvoda,
- q_j količina izradaka j -tog proizvoda koja se obrađuje na i -toj opremi u promatranom vremenskom razdoblju.

Tako se ukupno vremensko opterećenje sustava iskazuje izrazom

$$t_{\text{sus}} = \sum_{i=1}^M t_i \text{ [minuta]} \quad (4.3)$$

pri čemu je i redni broj opreme od ukupno M opreme koliko je u sustavu.

4.2.6.2 Stupanj iskoristivosti

Stupanj iskoristivosti proizvodnog sustava u znatnoj mjeri utječe na ekonomičnost kao jednog od osnovnih ciljeva projektiranja. Osnova za njegovo izražavanje je vremenska raspoloživost koja u usporedbi sa stvarnim opterećenjem sustava ukazuje na različite stupnjeve iskoristivosti pojedinih modela sustava. Ukoliko se na osnovi opterećenja opreme odredi teoretski potrebna količina opreme putem izraza

$$S_i = \frac{t_i}{K_i} \quad (4.4)$$

pri čemu je

t_i vremensko opterećenje i -te opreme,

K_i raspoloživ vremenski kapacitet i -te proizvodne opreme

i usporedi sa stvarnom količinom potrebne opreme $S_{i,\text{int}}$ koja u pravilu predstavlja prvi veći cijeli broj, takav izraz predstavlja tehnički stupanj iskoristivosti pojedinačnog proizvodnog kapaciteta

$$\eta_{\text{teh},i} = \frac{S_i}{S_{i,\text{int}}}. \quad (4.5)$$

Za cijeli proizvodni sustav tada vrijedi izraz

$$\eta_{\text{teh},\text{sus}} = \frac{\sum_{i=1}^M \eta_{\text{teh},i} \cdot S_{i,\text{int}}}{\sum_{i=1}^M S_{i,\text{int}}} \quad (4.6)$$

pri čemu je

$\eta_{\text{teh},\text{sus}}$ tehnički stupanj iskoristivosti proizvodnog sustava,

$S_{i,\text{int}}$ količina (broj) istovjetne proizvodne opreme na i -toj poziciji u proizvodnom sustavu.

Osim tehničkog stupnja iskoristivosti još kvalitetniju sliku o iskoristivosti sustava moguće je dobiti ukoliko se u obzir uzmu i vrijednosti pojedinačnih radnih mjesta prikazane u vidu amortizacije prema izrazu

$$\eta_{\text{ek},\text{sus}} = \frac{\sum_{i=1}^M \eta_{\text{teh},i} \cdot S_{i,\text{int}} \cdot a_i}{\sum_{i=1}^M S_{i,\text{int}} \cdot a_i} \quad (4.7)$$

pri čemu je

$\eta_{\text{ek},\text{sus}}$ ekonomski stupanj iskoristivosti proizvodnog sustava,

a_i amortizacijski iznos i -tog kapaciteta.

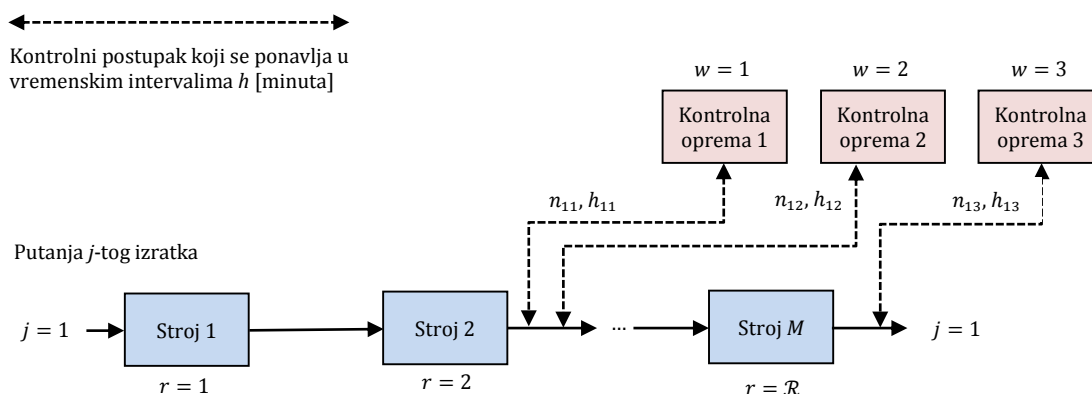
Visoku vrijednost ekonomskog stupnja iskoristivosti proizvodnog sustava moguće je postići

dobrom iskoristivosti skupljih proizvodnih kapaciteta pa se toj činjenici pri projektiranju treba pridonijeti posebna važnost.

4.2.7 Opterećenje kontrolnog podsustava

Visoko opterećen kontrolni podsustav zahtjeva veći broj kontrolne opreme, veći broj angažiranih kontrolora te može imati utjecaj na veličinu potrebnih investicijskih ulaganja, upravljivost sustava i potrebne prostorne površine. Opterećenje kontrolnog podsustava očituje se kroz parametre definirane planovima kontrole te kroz potrebno vrijeme izvođenja kontrolnih postupaka. Planovi kontrole su dokumenti koji se formiraju u procesu projektiranja kontrolnih podsustava te se njima između ostalog definiraju, slika 4.13:

- veličine uzoraka (n) izradaka potrebnih za provođenje periodičnih kontrolnih postupka na osnovu kojih se vrši statistička procjena sukladnosti karakteristika proizvoda s definiranim specifikacijama
- učestalost potreba izvođenja kontrolnih postupaka (h) i
- kontrolna oprema potrebna za izvođenje kontrolnih postupaka.



slika 4.13 Parametri plana kontrole

Veličina uzorka je u korelaciji s veličinom pomaka karakteristike koju je potrebno detektirati. Ukoliko su ti pomaci relativno mali, odabiru se veće veličine uzoraka nego onda kada je potrebno detektirati relativno velike pomake. Učestalost provjera procjenjuje se uglavnom na osnovi iskustvenih, povijesnih podataka dobivenih analizom utjecaja i posljedica pogreški, a najmanja je učestalost definirana učestalošću prekidanja kontinuiteta izvođenja proizvodnog procesa (izmjene operatera, organizacijski uvjetovani zastoji, izmjene alata ili parametara procesa). Složeni oblici strujanja varijabilnosti karakteristika koje opisuju kvalitetu kroz proizvodni sustav mogu uvjetovati dodatno povećanje opterećenosti kontrolnog podsustava kad je primarni cilj kontrolnog podsustava ne samo praćenje proizvodnog sustava već i detektiranje korijenskog uzroka pogreške. Vremensko opterećenje w -te opreme kontrolnog podsustava je jednako

$$t_w = \sum_{j=1}^N \sum_{u=1}^{z_{jw}} t_{juw} \cdot q_{juw} \quad [\text{minuta}] \quad (4.8)$$

pri čemu je

- j redni broj proizvoda od ukupno N proizvoda koliko ih se kontrolira na w -toj kontrolnoj opremi,
- t_{juw} vrijeme trajanja mjerenja jednog izratka j -tog proizvoda pri u -tom kontrolnom postupku od ukupno z_{jw} kontrolnih postupaka j -tog proizvoda koji se izvode na w -toj kontrolnoj opremi [minuta],
- q_{juw} zbirna količina izradaka j -tog proizvoda koja se mjeri u ponavljajućem, u -tom kontrolnom postupku na w -toj kontrolnoj opremi u promatranom vremenskom razdoblju (slika 4.13).

Zbirna količina izradaka j -tog proizvoda koju je potrebno kontrolirati u ponavljajućem u -tom kontrolnom postupku kontrole neprekidnog perioda izvođenja r -te operacije na w -toj kontrolnoj opremi tada se može odrediti izrazom

$$q_{juw} = n_{ju} \cdot \left(\frac{t_{r,\text{per}}}{h_{ju}} + 1 \right)_{\text{int}} \quad [\text{komada}] \quad (4.9)$$

pri čemu je

- n_{ju} veličina pojedinačnog uzorka j -tog proizvoda pri u -tom kontrolnom postupku kontrole r -te operacije,
- h_{ju} vremenski interval između dva uzastopna izvođenja u -tog kontrolnog postupka kontrole r -te operacije [minuta],
- $t_{r,\text{per}}$ vrijeme trajanja neprekidnog perioda izvođenja r -te operacije [minuta].

Vrijednost jednadžbe (4.9) u zagradi predstavlja broj uzorkovanja za vrijeme izvođenja r -te operacije. Kako ta vrijednost predstavlja cjelobrojni izraz, vrijednost je potrebno zaokružiti na prvi manji cijeli broj. Potrebno je napomenuti kako jednadžba (4.9) predstavlja zbirnu količinu izradaka koju je potrebno kontrolirati u uvjetima izvođenja proizvodnog procesa koji je pod kontrolom. Količinu izradaka koju je potrebno kontrolirati u fazama probne proizvodnje, tijekom homologacije proizvodnog procesa ili nakon detektiranja da je proces izvan kontrole može biti znatno veća. Teoretski potreban broj w -te kontrolne opreme može se odrediti putem izraza

$$S_w = \frac{t_w}{K_w} \quad (4.10)$$

pri čemu je K_w raspoloživ vremenski kapacitet w -te kontrolne opreme. Slično kao za proizvodnu opremu, ovakav raspoloživ vremenski kapacitet umanjen je od bruto raspoloživog vremena za

stupanj njegove iskoristivosti putem izraza, pa je tako dnevno raspoloživ vremenski kapacitet

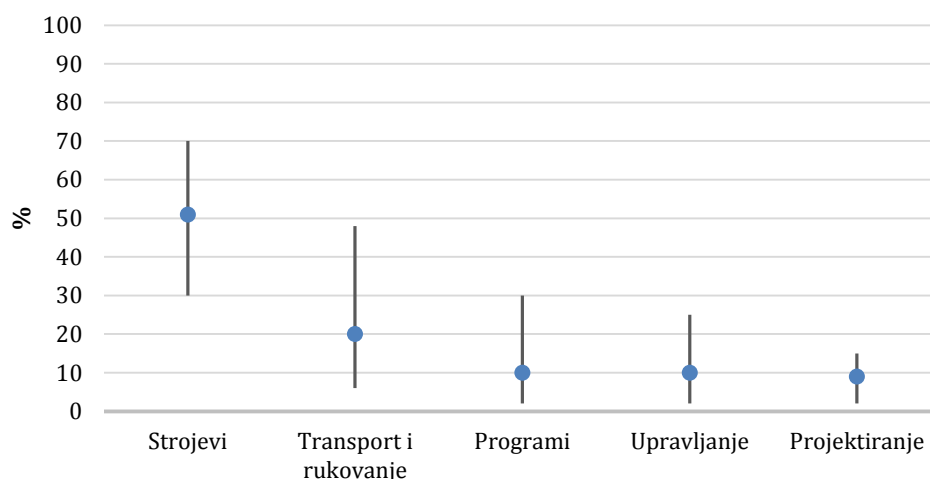
$$K_{w,dn} = 60 \cdot h \cdot s_{dn} \cdot \eta_{bt} \text{ [minuta]} \quad (4.11)$$

pri čemu je η_{bt} stupanj iskoristivosti vremena, ovisan o vrsti kontrolne opreme. Univerzalna kontrolna oprema ima nešto manji stupanj iskoristivosti bruto raspoloživog vremena od posvećene (specijalne) kontrolne opreme iz razloga što zahtjeva češće kalibriranje ali i većeg potrebnog broja programiranja. Stvaran broj potrebne opreme $S_{w,int}$ predstavlja vrijednost zaokruženu na prvi veći broj.

4.2.8 Investicijska ulaganja

Vrlo važan mjerljiv kriterij ocjene pojedinog rješenja proizvodnog sustava predstavlja veličina investicijskih ulaganja u sustav. Shah (1991.) je istražio strukturu investicijskih ulaganja u fleksibilne proizvodne sustave, slika 4.14. Takva struktura može biti vrlo složena kod složenih proizvodnih sustava te obuhvaća ulaganja u:

- obradni sustav (proizvodna i pomoćna oprema, alati i pribor)
- sustav tokova materijala (transportni sustav, sustavi manipulacije i među-skladištenja)
- informatički sustav (hardverska i softverska podrška)
- instaliranje sustava (temelji, radni i manipulacijski prostor, energetske priključke, montaža i povezivanje sustava)
- priprema i uvođenje sustava (projektiranje sustava, obuka radnog osoblja i probni rad)
- kontrolni podsustav (kontrolna oprema, sustavi arhiviranja i obrade podataka, laboratorijski prostori).



slika 4.14 Struktura investicijskih ulaganja u FPS (Shah, 1991.)

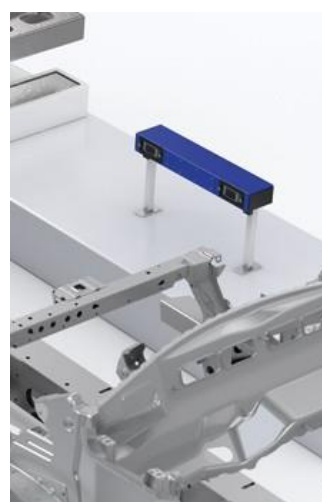
Veličinu ulaganja je u fazi ranog projektiranja važno što preciznije odrediti radi donošenja odluke o konačnoj varijanti proizvodnog sustava. Transfer proizvodne linije se baziraju na fiksnoj

automatizaciji kojom se na relativno jeftin način osigurava proizvodnja u dugom vremenskom periodu i u velikoj količini. Fleksibilni proizvodni sustavi obično sadrže skupu CNC opremu i programibilne oblike automatizacije, no zbog ograničenja obrade samo jednim alatom na opremi u jednoj vremenskoj jedinici, proizvodnost FPS-a je niža nego kod PPL-a uz veću cijenu opreme (Koren i Shiptalni, 2010.). Lee i Stecke (1996.) navode kako FPS zahtijevaju veliku kapitalnu investiciju, pri čemu je veliki dio kapitalne investicije namijenjen ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava.

Oprema kontrolnog podsustava kao pomoćna oprema proizvodnog sustava može uvelike doprinijeti ukupnoj veličini investicijskih ulaganja. Cijene univerzalnih koordinatnih mjernih strojeva (eng. *Coordinate Measuring Machine, CMM*, slika 4.15) kreću se, ovisno o najvećoj veličini izratka, mogućnostima mjerenja i arhiviranja podataka u cjenovnom razredu 4-osnih i 5-osnih glodalica i to bez troškova pripreme (troškova prostornih laboratorijskih kapaciteta, programiranja stroja, izrade naprava za pozicioniranje i sl.). Korištenje posvećene kontrolne opreme (eng. *dedicated control equipment*) koja može biti implementirana u samom proizvodnom procesu putem senzora (slika 4.16) ili izvan linije putem specijalnih kontrolnih strojeva, predstavlja brži način provjere karakteristika kvalitete izratka, a cijena takve opreme ovisi o nekoliko parametara: broju karakteristika koje treba provjeriti, mogućnostima mjerenja, arhiviranja podataka ali i promjenjivosti takve opreme. Promjenjivost kontrolne opreme podrazumijeva mogućnost brze i troškovno učinkovite prilagodbe mjerne opreme da izmjeri drugi proizvod iz iste obitelji proizvoda.



slika 4.15 Univerzalni koordinatni mjerni stroj
(www.hexagonmetrology.com)



slika 4.16 Posvećena kontrolna oprema
(www.zeiss.com)

Ukupnu veličinu investicijskih ulaganja moguće je prikazati kao

$$C_{\text{inv,uk}} = \sum_{i=1}^z C_{\text{inv},i} \text{ [novčana jedinica]} \quad (4.12)$$

pri čemu je $C_{\text{inv},i}$ vrijednost i -tog parcijalnog (pojedinačnog) investicijskog ulaganja uz $i = 1, 2, \dots, z$ ukupnih parcijalnih elemenata (investicijskih ulaganja).

4.2.9 Indeks sposobnosti konfiguracije

Indeks sposobnosti konfiguracije (ISK) proizvodnog sustava predstavlja indikator očekivane razine kvalitete proizvoda (Nada et al. 2006.). Sposobnost konfiguracije proizvodnog sustava odnosi se na dvije elementarne sposobnosti sustava:

- sposobnost sustava da prevenira nastanak pogreške u sustavu i
- sposobnost sustava da detektira nastanak pogreške u sustavu.

Varijabla sposobnosti prevencije pogreške je funkcija parametara koji se određuju u procesu projektiranja proizvodnog sustava: razine kompleksnosti morfološke strukture sustava, razine implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka (poka-yoka) i ukupne sposobnosti proizvodnog procesa. Varijabla sposobnosti detekcije pogreške je funkcija parametara koji se određuju pri projektiranju proizvodnog sustava i kontrolnog podsustava: brzine odziva sustava na pojavu pogreške i točnosti kontrolnog podsustava.

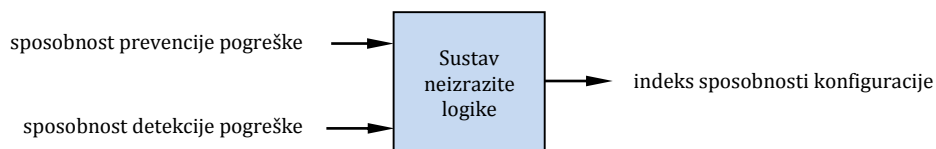
Kako bi se takvi, po prirodi potpuno različiti parametri rane faze projektiranja proizvodnog sustava i kontrolnog podsustava mogli sumirati u samo jednu varijablu, autori su koristili sustav neizrazite logike (eng. *fuzzy logic*), slika 4.17. Neizrazita logika je snažna metodologija rješavanja problema s vrlo širokom primjenom u raznim područjima znanosti. Njome se pruža jednostavan način donošenja definitivnih odluka na osnovi neizrazitih i ne potpuno preciznih podataka. Neizrazita logika na neki način sličij ljudskoj logici tj. preciznom odlučivanju na osnovi aproksimativnih podataka.

Za razliku od tradicionalnog pristupa tj. teoriji skupova koji predstavljaju objekte koji dijele neko zajedničko svojstvo, teorija neizrazitih skupova omogućava stupnjevitost pripadnosti elementa nekom skupu. Neizrazitom logikom je omogućeno određivanje indeksa sposobnosti tj. izlazne varijable na osnovi stupnjevitog vrednovanja ulaznih varijabli definiranjem pravila, primjerice:

"Ako je sposobnost prevencije pogreške *visoko srednja*, a sposobnost detekcije pogreške *nisko srednja*, tada je indeks sposobnosti konfiguracije *doobar*."

Pošto se u ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava još uvijek ne radi detaljna razrada tehnoloških procesa i proizvodnog sustava u cjelini, značajke koje određuju sposobnost

proizvodnog sustava poput kvalitete morfološke strukture sustava, razine implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka i sl. nemaju izrazite vrijednosti pa se korištenje neizrazite logike pokazuje kao primjenjiv način donošenja preciznih odluka.



slika 4.17 Sustav neizrazite logike za određivanje indeksa sposobnosti konfiguracije proizvodnog sustava (Nada et al., 2006.)

Neke značajke proizvodnog sustava poput promjenjivosti i fleksibilnosti nisu mjerljive pa ih se iskazuje jednom globalnom ocjenom razine ispunjenja bez detaljnijih istraživanja (Mikac, 1994.) Različite varijante proizvodnih sustava očekivano mogu imati različite vrijednosti sposobnosti sustava, što je uvjetovano svim navedenim veličinama. Preferirana mogućnost sustava je mogućnost prevencije pogreške, dok mogućnost detekcije pogreške ima ulogu korektora ukupnog indeksa sposobnosti sustava.

4.2.10 Troškovi

Osim investicijskih ulaganja, jedna od ekonomskih značajki proizvodnih sustava su troškovi njihove pripreme i eksploatacije. Svi troškovi vođenja proizvodnog procesa pri obradi asortimana izradaka bez obzira jesu li nastali u okviru proizvodnog sustava ili u njegovom okruženju, u konačnici terete jedinicu proizvoda. Formiranjem različitih konfiguracija proizvodnih sustava utječe se i na različitost strukture troškova vođenja proizvodnje koje je moguće izraziti kao

$$C_{\text{spec}} = \sum_{i=1}^z C_{\text{spec},i} \text{ [novčana jedinica]} \quad (4.13)$$

pri čemu je $C_{\text{spec},i}$ specifični trošak i -te vrste uz $i = 1, 2, \dots, z$ (Mikac, 1994.). Kao i kod investicijskih ulaganja, troškove je potrebno vrlo precizno odrediti. Jedan od ciljeva projektiranja je ostvariti optimalne troškove kao izlaznu značajku rješenja proizvodnog sustava, pri čemu poseban problem predstavljaju troškovi za koje je teško izraziti njihovu veličinu i vremensku dinamiku tijekom eksploatacije, pogotovo u kasnijim fazama rekonfiguracije sustava. Troškovi se načelno mogu identificirati kao (Ljubetić, 1991.):

- jednokratni troškovi pripreme proizvodnje (izrada tehnološkog procesa, programiranje opreme, konstrukcija specijalnih alata, kolaudacija procesa)
- jednokratni troškovi ponavljanja svakog radnog naloga (poslovi izdavanja operativne

- dokumentacije, terminiranje i praćenje proizvodnje, priprema i raspreda radnog mjesta)
- troškovi izrade po jediničnom proizvodu (troškovi nabave, instaliranje i amortizacija radnih mjesta, troškovi radne snage i ostali zajednički troškovi osoblja i materijala)
 - dodatni troškovi po jediničnom proizvodu (troškovi uzrokovani neprihvatljivom kvalitetom, čekanjima, fluktuacijom radne snage i sl.).

4.2.11 Efektivne površine

Podaci o ukupnim radnim i manipulacijskim površinama jedan su od osnovnih kriterija ocjene rješenja proizvodnog sustava, neovisno radi li se o korištenju postojećih ili gradnji novih površina. Efektivne potrebne površine obuhvaćaju sve prostore u funkciji proizvodnog sustava.

4.2.12 Utjecaj na okolinu

Primijenjeni tehnološki postupci te proizvodna i pomoćna oprema proizvodnog sustava očituju se djelovanjem na okolinu u tijeku eksploatacije emitiranjem buke, prašine, isparavanja i topline te otpadom materijala, a njihov intenzitet i veličina ovise o rješenju proizvodnog sustava.

4.3 Značajke dominantnih modela proizvodnih sustava

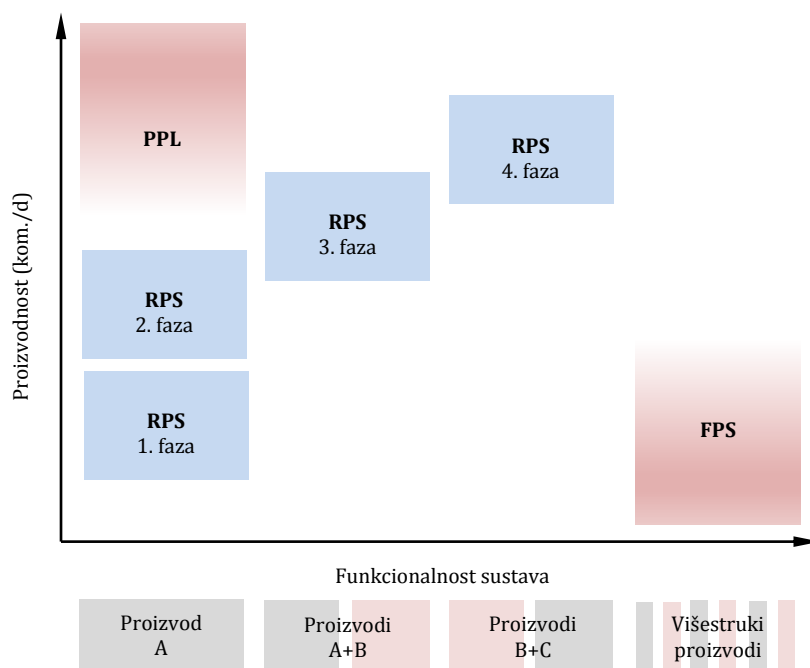
Modeli proizvodnih sustava mogu biti vrlo različiti određujući prostornu i vremensku značajku odvijanja proizvodnog procesa kroz prostornu strukturu povezivanja proizvodne opreme u jednu zaokruženu cjelinu, te način njene informacijske povezanosti. Značajke modela proizvodnih sustava mogu se izraziti kroz:

- broj izradaka u okviru određenih homogenih grupa segmentiranih iz ukupnog asortimana proizvodnog programa, a namijenjenih obradi na proizvodnom sustavu
- broj vrsta i prostornog rasporeda (eng. *layout*) proizvodne opreme korištene za formiranje proizvodnog sustava
- oblik protoka izradaka kroz sustav
- način vođenja proizvodnje
- način povezivanja komponenti unutar strukture sustava čime se određuje upravljanje proizvodnim sustavom.

Sve te značajke utječu i na efekte primjene određenih modela iskazane kroz proizvodnost, opću fleksibilnost i upravljivost, stupanj automatizacije te u konačnosti i ekonomičnost. Vrlo važnu značajku pojedinog modela predstavlja i površina radnog prostora potrebnog za formiranje OPS-a jer ona ima direktan utjecaj na visinu investicijskih ulaganja. Financijska sredstva su jedna od bitnijih utjecajnih značajki na projekt proizvodnog sustava. U tom se slučaju veličina ulaganja u osnovna i obrtna sredstva moraju svesti u okvire raspoloživih mogućnosti što ponekad znači i

odstupanje od najpovoljnijih rješenja. Ulaganja u osnovna sredstva kroz primijenjenu proizvodnu opremu utječe se na izbor modela proizvodnog sustava odgovarajućom organizacijom vođenja procesa, a na visoka ulaganja u obrtna sredstva pokušava se djelovati malom količinom zaliha materijala u proizvodnom procesu. U pravilu se na oba slučaja ostvaruje veća brzina protoka materijala, a time i kraći ciklus izrade.

Jedan od načina karakteriziranja pojedinih modela proizvodnih sustava je karakterizacija putem dvo-parametarskog vrednovanja. Tipični odabir parametara proizvodnog sustava često su proizvodnost [kom./d] s jedne strane i funkcionalnost odnosno različitost proizvoda koje je u takvom proizvodnom sustavu moguće proizvoditi s druge strane (Black, 1991.). Iako ovakav prikaz ima svoja ograničenja, sam koncept pruža koristan smjer projektiranja proizvodnog sustava. Koren i Shiptalni (2010.) navode kapacitet proizvodnje, funkcionalnost i veličinu kapitalne investicije kao parametre koji razlikuju dominantne modele proizvodnih sustava. Posvećene proizvodne linije i fleksibilni proizvodni sustavi po svojoj prirodi imaju statični položaj u prikazu dvo-parametarskog vrednovanja proizvodnosti i funkcionalnosti sustava, slika 4.18.



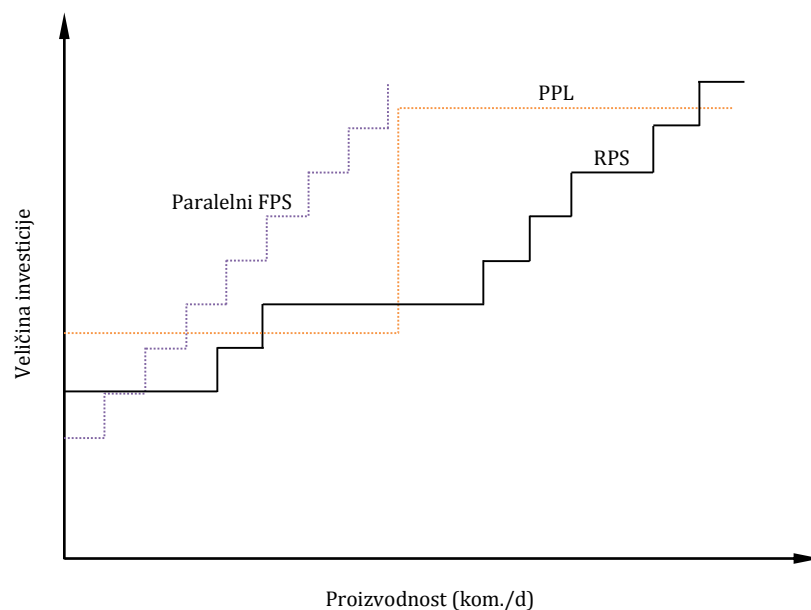
slika 4.18 Dinamika odziva RPS-a (Koren i Shiptalni, 2010.)

Rekonfigurabilni proizvodni sustavi pak zbog svojih svojstava nemaju statičan položaj u ovakvom vrednovanju i nisu ograničeni po pitanju proizvodnosti i funkcionalnosti sustava te time imaju mogućnost ostvarenja dobrog odziva na promjene. Ako se promatra odnos veličine kapitalne investicije i proizvodnosti proizvodnog sustava, posvećene proizvodne linije ne iziskuju nikakvu dodatnu investiciju dok god je potrebna proizvodnost u granicama veličine prema kojoj su takvi

sustavi projektirani, slika 4.19. Ako se potrebne količine povećaju iznad vrijednosti projektirane proizvodnosti, potrebno je investirati u potpuno drugu liniju i tada se veličina investicije naglo udvostručuje. Fleksibilni proizvodni sustav u kojem su strojevi paralelno povezani je po pitanju kapaciteta proizvodnje skalabilan u jednakim inkrementima (dodavanje dodatnog stroja u postojeći paralelni sustav). Lee i Stecke, (1996.) navode kako FPS iziskuju veliku kapitalnu investiciju čiji veliki dio pripada ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava. Rekonfigurabilni proizvodni sustav je također skalabilan ali u nekonstantnim koracima čija veličina ovisi o početnom obliku konfiguracije sustava kao i o veličinama potrebnih promjena.

4.4 Principi projektiranja rekonfigurabilnih proizvodnih sustava

Projektiranje rekonfigurabilnih proizvodnih sustava vrši se po principima kojima je moguće osigurati šest osnovnih svojstava promjenjivosti takvih proizvodnih sustava, a kojima se povećava brzina rekonfiguracije takvog sustava i poboljšava odziv na nepredvidive promjene na tržištu, na promjenu karakteristika proizvoda i na pojavu neplaniranih događaja poput kvarova opreme. Što su ti principi pri projektiranju više implementirani to će rekonfigurabilnost takvog sustava biti bolja.



slika 4.19 Investicije modela proizvodnih sustava prema kapacitetu proizvodnje (Koren i Shiptalni, 2010.)

Principi kojima se treba voditi pri projektiranju rekonfigurabilnog proizvodnog sustava su:

- I. princip: Rekonfigurabilni proizvodni sustav čini rekonfigurabilna proizvodna oprema (rekonfigurabilni alatni strojevi i računalno upravljani strojevi) koja ima mogućnost brzog i troškovno učinkovitog odziva na nepredvidive zahtjeve tržišta

ili okoline, i to na način da:

- je ukupnu proizvodnost sustava [kom./d] moguće brzo i troškovno učinkovito mijenjati u malim inkrementima
- sustav ima mogućnost brze prilagodbe proizvodnje bilo kojeg drugog proizvoda iz iste obitelji proizvoda
- je konfiguracija sustava postavljena na način da ima mogućnost brzog odgovora na neplanirane događaje u sustavu kao što je kvar stroja.

II. princip: Rekonfigurabilni proizvodni sustav se projektira kako bi bio sposoban proizvoditi jednu obitelj proizvoda te je upravo onoliko fleksibilan koliko je potrebno za proizvodnju svih izradaka iz te obitelji proizvoda.

III. princip: Sve značajke rekonfigurabilnih proizvodnih sustava primijenjene su na sustav u cjelini ali i na sve sastavne dijelove sustava.

Konačno, proizvodni sustav ima značajku rekonfigurabilnosti ukoliko su odgovori na sljedeća pitanja potvrdni:

1. Da li je proizvodni sustav ili oprema koja ga čini projektirana na način da im se može promijeniti fizička struktura?
2. Da li je proizvodni sustav ili oprema koja ga čini projektirana na način da se njome proizvodi ili provjerava određena obitelj proizvoda?

Koren i Shiptalni (2010.) navode kako implementacija svojstava RPS-a putem navedenih principa projektiranja proizvodnog sustava pomaže ostvarivanju najvišeg cilja projektiranja - stvaranja "žive" tvornice koja može naglo promijeniti kapacitet proizvodnje dok u isto vrijeme zadržava visoku razinu kvalitete svojih proizvoda. Takva prilagodljivost garantira visok dugoročni omjer ostvarenog profita i troškova te brz povrat investicije.

4.5 Proizvodni procesi rekonfigurabilnih proizvodnih sustava

Operacija u proizvodnom procesu podrazumijeva sve aktivnosti potrebne za promjenu oblika, dimenzija, položaja ili svojstava pri proizvodnji nekog izratka koje se na jednom radnom mjestu (proizvodnom kapacitetu) odvijaju u kontinuitetu, najčešće u jednom stezanju izratka na stroj. Diferencijacija operacije predstavlja sve aktivnosti unutar jedne operacije koje su potrebne za promjenu određenog oblika ili svojstava proizvoda, isključivo u jednom stezanju izratka na stroj. Kako bi se zadovoljili uvjeti proizvodnosti i vremenske ujednačenosti proizvodnje te kako bi se postigla svojstava modularnosti, fleksibilnosti i rekonfigurabilnosti, proizvodni sustavi mogu sadržavati više potpuno identičnih, paralelno povezanih proizvodnih kapaciteta (PK) na istoj operaciji proizvodnog procesa. Svi takvi proizvodni sustavi se zbog oblika putanji kretanja

materijala kroz sustav zajednički nazivaju serijsko-paralelni višesegmentni proizvodni sustavi (SP-VPS). Pri tome, svi paralelno povezani proizvodni kapaciteti na kojima se izvodi identična r -ta operacija zajednički čine r -ti segment proizvodnog procesa j -tog proizvoda. Korelacije izradaka, opreme i (diferencijacija) operacija u proizvodnom sustavu moguće je formulirati cijelim nizom korelacijskih matrica. Skup podataka izražen matricom veza pojedinih događaja pokazuje postoji li povezanost pojedinih izradaka i proizvodne opreme, a informacije o svakom takvom događaju prikladno je izraziti vremenom trajanja operacije proizvodnog procesa t_{rij} na način (Mikac, 1994.):

$$M_{t,rij} = \begin{matrix} & & 1 & \dots & j & \dots & N \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ M \end{matrix} & \begin{bmatrix} t_{r11} & & t_{r1j} & & & & t_{r1N} \\ & t_{ri1} & & t_{rij} & & & t_{riN} \\ & & t_{rM1} & & t_{rMj} & & t_{rMN} \end{bmatrix} & & & & & \end{matrix} \quad (4.14)$$

pri čemu je:

$M_{t,rij}$ matrica veze opreme i proizvoda koja pokazuje vremensko opterećenje i -te opreme pri obradi r -te operacije j -tog proizvoda [min],

t_{rij} vrijeme trajanja r -te operacije koja se izvodi na i -toj opremi pri obradi j -tog proizvoda [min],

r redni broj operacije u redosljedu obrade j -tog proizvoda, od ukupno \mathcal{R} operacija,

i redni broj vrste opreme u matrici od ukupno M opreme koliko ih je u sustavu,

j redni broj proizvoda u matrici od ukupno N proizvoda koliko ih ima u obitelji proizvoda.

Analogno tome, moguće je formulirati korelacijsku matricu vremena trajanja svih operacija obrade/montaže j -tog proizvoda od ukupno \mathcal{R}_j operacija koliko ih se izvodi na j -tom proizvodu

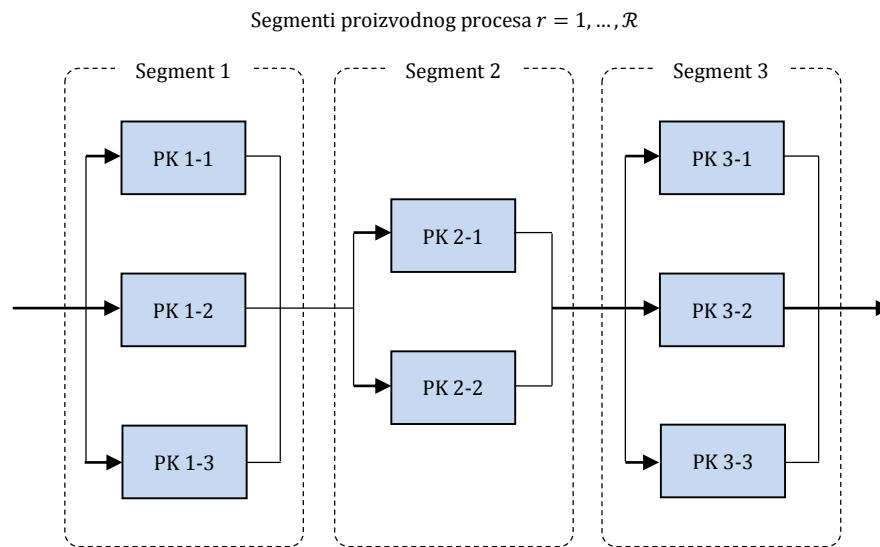
$$M_{t,rj} = \begin{matrix} & & & & j \\ & & & & 1 \\ & & & & \vdots \\ & & & & r \\ & & & & \vdots \\ & & & & \mathcal{R}_j \end{matrix} \begin{bmatrix} t_{1j} \\ \vdots \\ t_{rj} \\ \vdots \\ t_{\mathcal{R}_j} \end{bmatrix}. \quad (4.15)$$

Redosljed obrade jednog proizvoda očitao iz hodograma serijsko-paralelnog višesegmentnog proizvodnog sustava od ukupno tri segmenata prikazan je u nastavku, slika 4.20. Svi izratci jednog proizvoda obrađuju se u ovakvom sustavu prema jednakom, unaprijed definiranom proizvodnom procesu. No, putanje po kojima obratci jednog proizvoda mogu prolaziti od prvog do posljednjeg segmenta proizvodnog procesa se razlikuju, slika 4.21. Najveći mogući broj putanji kretanja obradaka kroz proizvodni sustav određen je brojem paralelnih obrada na segmentima

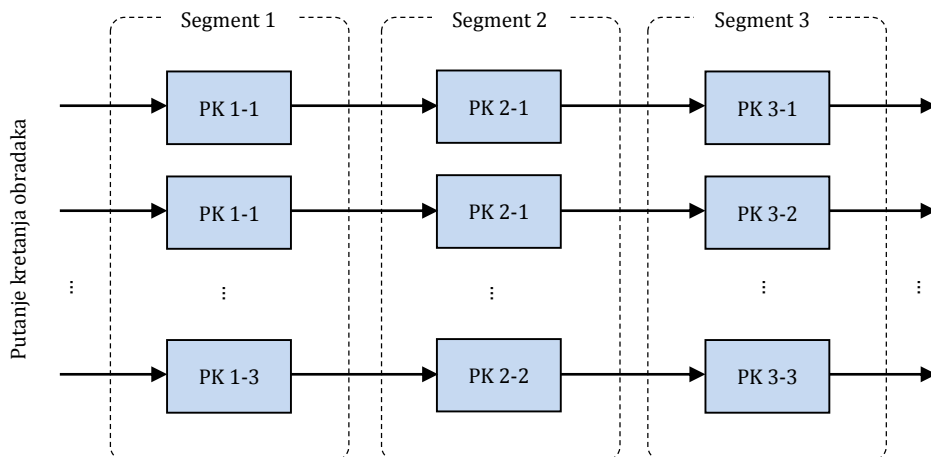
proizvodnje, putem izraza

$$\mathcal{P}_{\max} = \prod_{r=1}^{\mathcal{R}} S_r \quad (4.16)$$

pri čemu je S_r broj paralelno povezanih proizvodnih kapaciteta na r -tom od ukupno \mathcal{R} segmenata proizvodnog procesa.



slika 4.20 Hodogram obrade jednog proizvoda u serijsko-paralelnom višesegmentnom proizvodnom sustavu

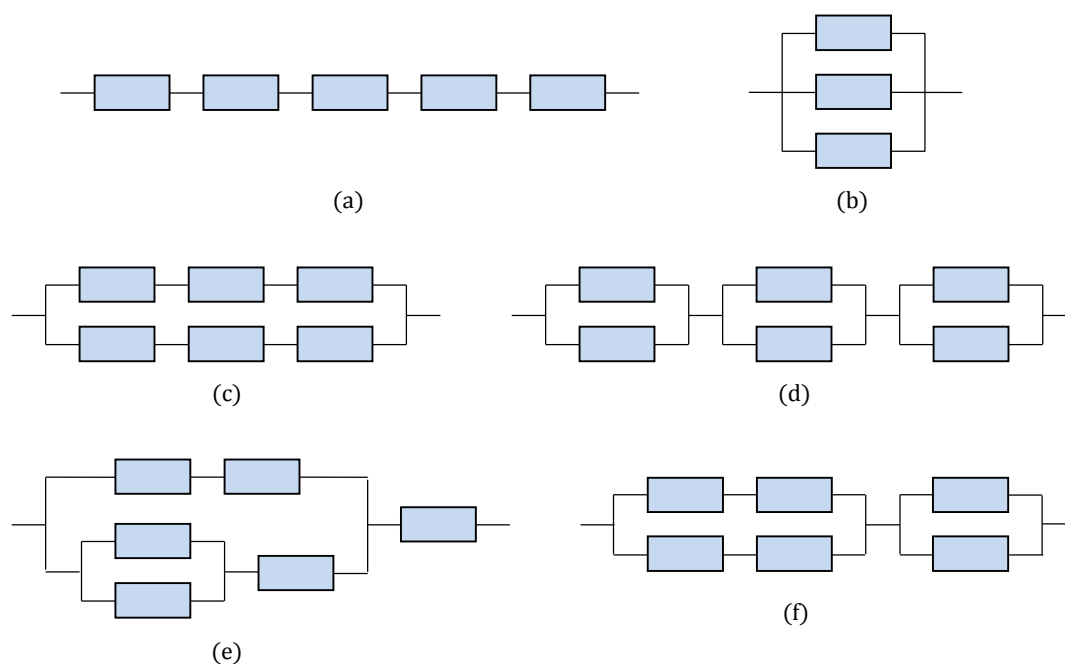


slika 4.21 Putanje kretanja obradaka proizvoda kroz proizvodni sustav

4.6 Klasifikacija konfiguracija proizvodnih sustava

Tradicionalno, većinu proizvodnih sustava (ili sustava za montažu) karakterizira linijsko kretanje izradaka kroz proizvodni sustav, što je posebno učestalo u procesima za proizvodnju proizvoda koji su visoko prilagođeni korisniku, poput automobila. Predvidiv, ravnomjeran slijed izradaka po

segmentima proizvodnog procesa na kojima se odvijaju operacije u određenom redosljedu je ključan kako bi se osigurala pravilna izrada proizvoda, npr. kako bi se ispravan tip motora sastao s odgovarajućom bojom karoserije u točno određenom trenutku. Serijski tip konfiguracije proizvodnog sustava sastoji se od jedne linije proizvodnih kapaciteta s točno jednom putanjom toka izratka kroz sustav, slika 4.22 (a). Međutim, posljednji trendovi i napredak tehnologije promijenili su takav pristup. Pojavom među-operacijskih spremnika s mogućnošću ponovnog sortiranja izradaka i automatski vođenih vozila u među-operacijskom transportu ostvarili su se uvjeti zadržavanja redosljeda izradaka u proizvodnom procesu čak i ako je na operaciji koja je prethodila postojalo više od jedne putanje toka materijala (Webbink et al., 2005.). Kao posljedica toga, razvili su se i ostali oblici konfiguracija proizvodnih linija, poput paralelnih [slika 4.22 (b)] ili hibridnih koje se nadalje mogu podijeliti na simetrične [slika 4.22 (c, d i f)] i nesimetrične, slika 4.22 (e). Nesimetrične konfiguracije obično nisu prikladne za proizvodne sustave iz razloga što ih karakteriziraju različite putanje kretanja materijala od prve do zadnje operacije pa zahtijevaju veći broj različitih tehnoloških postupaka i uvelike kompliciraju probleme vezane za praćenje kvalitete proizvoda.



slika 4.22 Različiti primjeri konfiguracija proizvodnih linija (Koren i Shiptalni, 2010.)

Simetrične konfiguracije se nadalje mogu podijeliti na tri osnovna tipa (Koren i Shiptalni, 2010.):

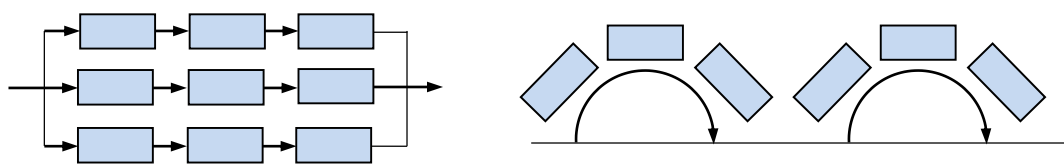
- I. Konfiguracije oblika proizvodne ćelije koje se sastoje od nekoliko serijskih proizvodnih linija raspoređenih paralelno bez križanja putanji kretanja materijala. Ovakve konfiguracije su učestalo korištene u Japanu, slika 4.23 (a).
- II. RPS konfiguracije koje su nakon svake operacije povezane križnim vezama. Izradak s bilo

koje proizvodne opreme sa proizvodnog segmenta r može biti prosljeđen na bilo koju proizvodnu opremu na segmentu $r + 1$. Sva proizvodna oprema u bilo kojem segmentu je u ovom slučaju identična. Ovakve su konfiguracije učestale kod američkih proizvođača automobila.

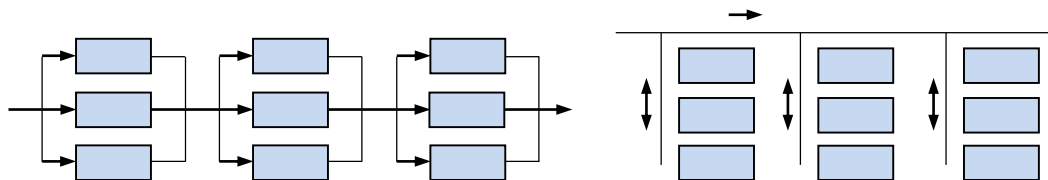
- III. Konfiguracije u kojima postoje određene ćelije između kojih nema križnih veza kretanja materijala već se materijal prosljeđuje linijski. Ovakve su konfiguracije kombinacija prethodno navedenih, slika 4.23 (c).

Klasificiranje pojedinih konfiguracija prvo zahtijeva određivanje broja mogućih konfiguracija kojim je moguće zadovoljiti zadane dnevne količine gotovih izradaka q [kom./d] kad je poznato ukupno vrijeme obrade izratka t [min/kom.]. U stvarnosti su vremena obrade uvelike pod utjecajem odabrane proizvodne opreme. Potrebna količina proizvodne opreme za savršeno vremenski uravnotežen sustav iznosi (Koren i Shiptalni, 2010.):

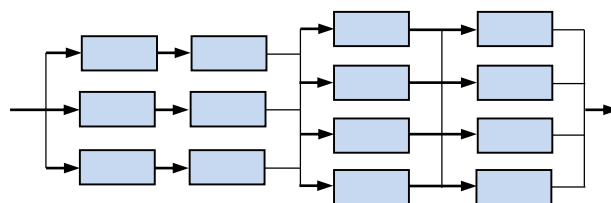
$$S = \frac{q \cdot t}{K_{i,dn} \cdot \text{Pouzdanost opreme}} \quad (4.17)$$



(a) Tip I - Konfiguracije proizvodnih ćelija



(b) Tip II - RPS konfiguracije



(c) Tip III - Kombinirane konfiguracije

slika 4.23 Konfiguracije proizvodnih sustava. Tip I (a), tip II (b) i tip III (c) (Koren i Shiptalni, 2010.)

U općem slučaju, ukupni broj konfiguracija za S potrebne opreme može biti golem. Prikaže li se broj mogućih konfiguracija na logaritamskoj skali, njihov broj naglo raste s porastom broja opreme u sustavu. No, broj mogućih RPS konfiguracija je ipak znatno manji, tablica 4.4.

tablica 4.4 Broj mogućih konfiguracija za određeni broj opreme u sustavu (Koren i Shiptalni, 2010.)

Količina opreme u sustavu S	Broj mogućih konfiguracija	Broj mogućih RPS konfiguracija
2	2	2
4	15	8
6	170	32
8	2325	128
10	35341	512

4.6.1 Određivanje broja mogućih RPS konfiguracija sustava

Ako je broj potrebne opreme sustava moguće izračunati putem jednadžbe (4.17), postavlja se pitanje: „Kuju je od mogućih konfiguracija najbolje implementirati?“ Npr. Treba li oprema biti složena serijski ili paralelno? Ili u nekoj kombinaciji serijskog i paralelnog spoja? Koren i Shiptalni (2010.) su definirali jednadžbu za izračun broja mogućih RPS konfiguracija sustava sa S strojeva raspoređenih do najviše I segmenata

$$\mathcal{K} = \sum_{I=1}^S \binom{S-1}{I-1} = 2^{S-1}. \quad (4.18)$$

Najveći broj mogućih konfiguracija u kojima se S strojeva može rasporediti u točno I segmenata moguće je izračunati putem izraza (Koren i Shiptalni, 2010.):

$$\mathcal{K}_I = \left(\frac{(S-1)!}{(S-I)!(I-1)!} \right). \quad (4.19)$$

Pošto se dva identična proizvodna kapaciteta koja mogu činiti jedan segment sustava ne mogu rasporediti u više od dva segmenta sustava ovakav se matematički oblik može slikovito prikazati tzv. Pascalovim trokutom, tablica 4.5. Za slučaj da postoji ukupno šest identičnih proizvodnih kapaciteta ukupni broj mogućih RPS konfiguracija sustava iznosi $(1+5+10+10+5+1)$ tj. trideset dvije konfiguracije. Pošto se jednadžba (4.18) odnosi na savršeno uravnotežen sustav, gotovo nikada nije primjenjiva na sustav u cjelini već na pojedinačne segmente sustava u kojima se izvodi određeni segment proizvodnog procesa. Prikladniji način prikaza mogućeg broja RPS konfiguracija sustava zasniva se na matrici potrebnih proizvodnih kapaciteta za obradu količina u jednom vremenskom razdoblju (Mikac, 1994.), primjerice jednom danu

$$M_{S,rij} = \frac{[M_{t,rij}] \cdot [q_{j,dn}]}{[K_{i,dn}]} = \begin{matrix} & & 1 & \dots & j & \dots & N \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ M \end{matrix} & \begin{bmatrix} S_{r11} & S_{r1j} & S_{r1N} \\ S_{ri1} & S_{rij} & S_{riN} \\ S_{rM1} & S_{rMj} & S_{rMN} \end{bmatrix} & & & & \end{matrix} \quad (4.20)$$

pri čemu je $q_{j,dn}$ dnevna količina j -tog proizvoda koju je potrebno obraditi. U praksi potrebna

količina proizvodne opreme (broj) mora biti cjelobrojna vrijednost pa se računski vrijednost S_i zaokružuje na prvi veći cijeli broj koji se označava $S_{i,int}$. Matrica potrebne opreme sustava

$$M_{S,i,int} = \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ M \end{matrix} \begin{bmatrix} S_{1,int} \\ \vdots \\ S_{i,int} \\ \vdots \\ S_{M,int} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

tada predstavlja količinu proizvodne opreme S po segmentima sustava i koji se potencijalno mogu dodatno rasporediti manji broj segmenata ukoliko je na taj način moguće postići svojstva rekonfigurabilnosti sustava. Moguće konfiguracije proizvodnog ustava s obzirom na moguće konfiguracije pojedinih segmenata sustava moguće je prikazati putem matrice

$$\mathcal{K}_{sus} = \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ M \end{matrix} \begin{bmatrix} \mathcal{K}_1 \\ \vdots \\ \mathcal{K}_i \\ \vdots \\ \mathcal{K}_M \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

pri čemu je \mathcal{K}_i najveći broj mogućih konfiguracija i -tog segmenta proizvodnog sustava.

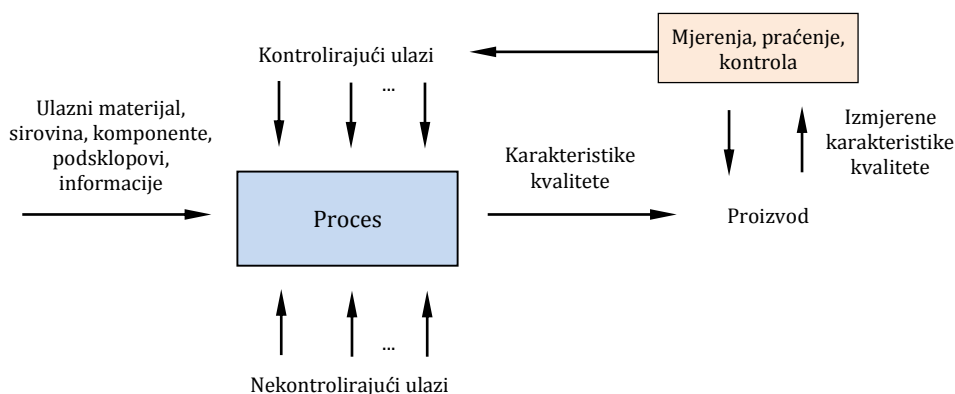
tablica 4.5 Pascalov trokut, ukupni broj RPS konfiguracija slaganja S strojeva u l segmenata procesa

\mathcal{K}	raspoređena u ukupno l segmenata									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1									
2	1	1								
3	1	2	1							
4	1	3	3	1						
5	1	4	6	4	1					
6	1	5	10	10	5	1				
7	1	6	15	20	15	6	1			
8	1	7	21	35	35	21	7	1		
9	1	8	28	56	70	56	28	8	1	
10	1	9	36	84	126	126	84	36	9	1

Pri projektiranju sustava potrebno je za svaku pojedinu konfiguraciju provjeriti zadovoljava li ista uvjet propusnosti, tj. potrebnog takta sustava. Za očekivati je da će samo neke od ukupno mogućih konfiguracija zadovoljiti taj uvjet čime se dolazi do znatno manjeg broja ukupno mogućih konfiguracija sustava.

5 STATISTIČKA KONTROLA PROCESA

Proizvodni proces je moguće prikazati kao sustav sa skupom ulaza i jednim izlazom. U takvom se sustavu transformira ulazni materijal, sirovina ili poluproizvod u konačan proizvod kojeg karakteriziraju određene karakteristike kvalitete, slika 5.1. Parametri procesa predstavljaju pri tome ulazne varijable procesa koje je moguće podijeliti na kontrolirajuće i nekontrolirajuće ulazne varijable. Kontrolirajuće varijable procesa predstavljaju ulaze koji u većini slučajeva predstavljaju vrijednosti kao što su npr. tlak, temperatura, vrijeme operacije i sl. Nekontrolirajuće ulazne varijable procesa su s druge strane one koje je teško ili potpuno nemoguće kontrolirati, a često su to utjecaji okoline ili svojstva materijala dobavljenih sirovina ili poluproizvoda koje nije moguće u potpunosti kontrolirati. Izlaznu varijablu procesa u ovako prikazanom sustavu predstavljaju karakteristike kvalitete odnosno izmjerene vrijednosti karakteristika kvalitete.



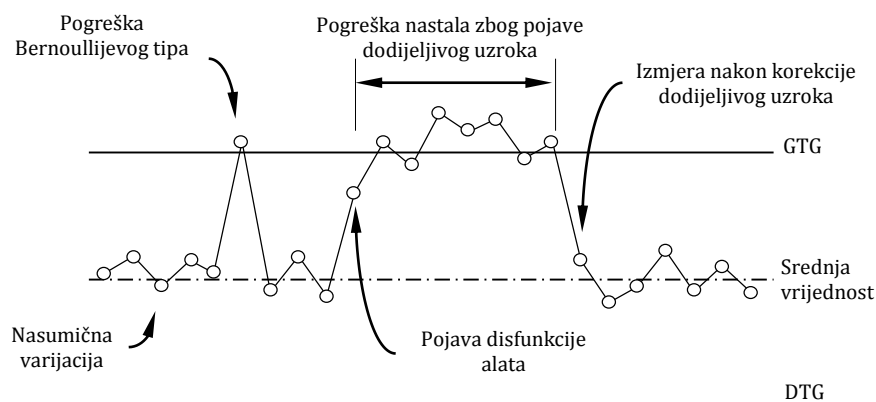
slika 5.1 Kontrola proizvodnog procesa (Montgomery, 2009.)

Ne postoje dva proizvoda proizvedena istim proizvodnim procesom koja su apsolutno identična. Postojanje određene varijacije među njima i njihovim karakteristikama je neizbježno. Statistička kontrola procesa (eng. *Statistical process control*, SPC) i njoj slične metode za poboljšanje kvalitete razvile su se u cilju povećanih zahtjeva za poboljšanjem kvalitete i povećanjem konkurentnosti

proizvoda. Potreba za njihovim uvođenjem su nastale iz činjenice da smanjenje varijabilnosti u proizvodnim procesima i varijabilnosti karakteristika proizvoda vode k poboljšanju proizvoda i smanjenju troškova loše kvalitete. Statistička kontrola procesa je snažan skup alata korisnih za uspostavljanje i poboljšavanje sposobnosti procesa kroz smanjivanje varijabilnosti koje u njima djeluju.

Razlikuju se dvije vrste uzroka pomaka vrijednosti karakteristika proizvoda (u daljnjem tekstu skraćeno „uzroka“) koji uzrokuju varijabilnost. U svakom proizvodnom procesu, ma koliko on bio dobro projektiran ili pažljivo održavan, postoji određeni udio inherentne ili prirodne varijacije. Ta prirodna varijacija ili „pozadinski šum“ je zapravo rezultat egzistiranja vrlo malih, neizostavnih uzroka koja dovode do varijabilnosti. Proces koji je pod utjecajem isključivo i samo takvih neizostavnih uzroka smatra se procesom pod kontrolom jer su oni inherentni dio procesa. U literaturi se za takve uzroke često koristi izraz - nedodijeljivi uzroci. Rezultat takvih uzroka je nasumična varijabilnost karakteristika proizvoda.

S druge strane, postoje uzroci čija pojava može samo povremeno generirati varijabilnosti na izlazu procesa. Neprirodne varijabilnosti ključnih karakteristika proizvoda KKP (eng. *key product characteristics*) mogu se pojaviti uslijed tri vrste izvora: neprimjereno podešene proizvodne opreme, ljudske pogreške ili defektnog materijala (Montgomery, 2009.). Ovakve su varijacije generalno veće od pozadinskog šuma i obično predstavljaju neprihvatljivu pojavu pri odvijanju proizvodnog procesa, slika 5.2. Drugi naziv za takve uzroke su dodijeljivi ili specijalni uzroci. Varijacije mjerljivih parametara do kojih dovode takvi uzroci su generalno veće od pozadinskog šuma, a procesi u kojima se pojavljuju nazivaju se procesima izvan kontrole. Glavni cilj statističke kontrole procesa je čim brže detektiranje pojave dodijeljivog uzroka u procesu kako bi se pravovremeno poduzele korektivne akcije prije nego što se proizvede veća količina proizvoda nesukladnih njihovim tehničkim zahtjevima (škarta).



slika 5.2 Vrste pogrešaka (Kim i Gershwin, 2005.)

Jedan od čestih tipova pogreški jesu i one pogreške koje se pojavljuju kada je proces osjetljiv na vanjske perturbacije poput pogrešaka u sirovom materijalu ili prilikom korištenja novih tehnologija kada je mjerenje parametara procesa otežano. Takvi se pomaci mogu opisati nezavisnim Bernoullijevim slučajnim varijablama pa se ovakve pogreške nazivaju još i pogreškama Bernoullijevog tipa. Pojava signala kontrolnog podsustava kao posljedice pojave takvog uzroka nikako ne ukazuje na stanje procesa i njima se ni na koji način ne predviđa buduće stanje procesa (Kim i Gershwin., 2005.).

5.1 Praćenje kvalitete proizvodnog procesa

Procesi se često izvode u kontroliranom stanju kroz relativno duge vremenske periode. No ipak, niti jedan proces nije vječno stabilan te prije ili kasnije postaje podložan pojavi dodijeljivog uzroka. To može rezultirati pomakom procesa u stanje izvan kontrole pri čemu neke karakteristike procesa ili proizvoda mogu postati nesukladne s propisanim zahtjevima tj. poprimiti vrijednosti izvan njihovih propisanih područja: vrijednosti gornje tolerancijske granice (GTG) T_g i vrijednosti donje tolerancijske granice (DTG) T_d .

Kontrolne karte su učestalo korišten statistički alat za procjenu stanja procesa. Putem kontrolnih karti moguće je otkriti vrijednosti parametara procesa te putem tih informacija odrediti i sposobnost promatranog proizvodnog procesa. Kontrolne karte i u vrijeme kad je proces pod kontrolom mogu pružiti korisne informacije za unaprjeđenje procesa te tako na vrijeme prevenirati nastanak pogreške. Iako je ponekad nemoguće u potpunosti eliminirati varijacije u procesu, putem kontrolnih varijacije je moguće smanjiti na minimum. Smanjenje varijabilnosti parametara procesa i proizvoda povoljno utječe i na operativne karakteristike proizvodnih procesa kao što su proizvodnost, vrijeme ciklusa i iskorištenje kapaciteta.

Proizvodni proces izrade proizvoda kojeg će njegov korisnik percipirati kvalitetnim općenito mora biti stabilan tj. ponovljiv. Drugim riječima, proces mora biti sposoban izvoditi se s vrlo malim varijacijama parametara od njihovih nominalnih vrijednosti ili određenih ciljanih vrijednosti koje omogućuju zadovoljavajuću kvalitetu proizvoda.

5.1.1 Numerička interpretacija skupa podataka

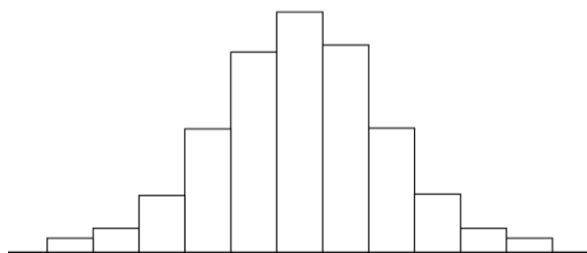
Histogram je grafička interpretacija distribucije skupa podataka, dijagram na kojem su iznad apscise vrijednosti ucrtani pravokutnici jednake širine (koja predstavlja razred ili interval vrijednosti) i visine proporcionalne frekvenciji pojavljivanja tog razreda, slika 5.3. Uzorak je skup izmjera izuzetih iz nekog većeg skupa ili populacije. Pored oblika distribucije podataka u uzorku, središnje tendencije i raspršenosti podataka u skupu, korisno je poznavati i točne matematičke

vrijednosti tih svojstava uzorka. Ako su x_1, x_2, \dots, x_n promatranja varijable u jednom uzorku, najvažnija mjera tog skupa je njegova centralna tendencija tj. prosječna vrijednost uzorka \bar{x} koju je moguće predstaviti sljedećom jednačinom:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (5.1)$$

Takva prosječna vrijednost uzorka \bar{x} je zapravo aritmetička sredina vrijednosti iz ukupno n promatranja. Varijabilnost u uzorku podataka moguće je odrediti varijancom uzorka s^2 :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}. \quad (5.2)$$



slika 5.3 Histogram

Moguće je primijetiti da vrijednost varijance jednostavno predstavlja sumu kvadrata devijacija svakog pojedinog promatranja od prosječne vrijednosti uzorka \bar{x} , podijeljeno s veličinom uzorka oduzetim za jedan. Zbog jedinice vrijednosti varijance koja je izražena u kvadratima jedinice promatrane varijable, ponekad je prikladnije koristiti izraz za standardnu devijaciju uzorka s kao mjerom varijabilnosti. Standardnu devijaciju je tako moguće predstaviti izrazom

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (5.3)$$

5.1.2 Distribucije vjerojatnosti

Distribucija vjerojatnosti je matematički model koji povezuje vrijednost varijable s vjerojatnošću pojave te vrijednosti u populaciji (Montgomery, 2009.). Srednja vrijednost μ distribucije vjerojatnosti je mjera središnje tendencije distribucije tj. njena lokacija. Za slučaj diskretne slučajne varijable s n jednako vjerojatnih vrijednosti vrijedi

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.4)$$

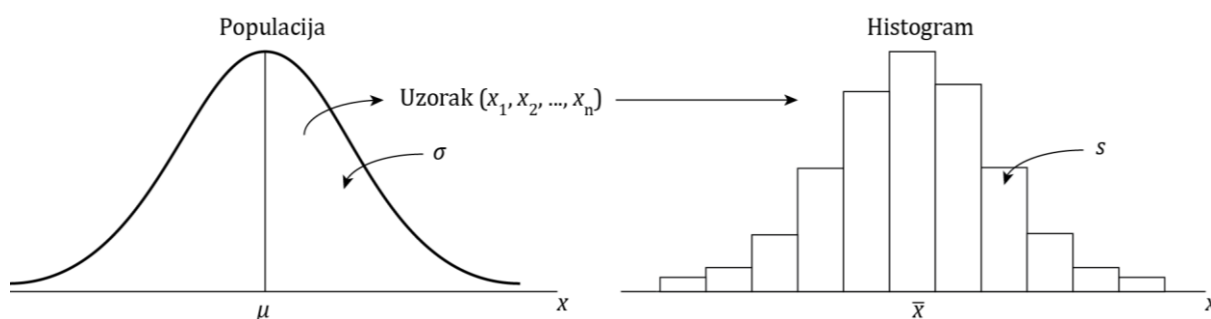
pri čemu je x nasumična varijabla. Raspršenost ili širina distribucije vjerojatnosti opisana je varijancom σ^2 koja se može odrediti kao

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n} \quad (5.5)$$

što je izraz prikazan u kvadratima jedinica promatrane varijable. Stoga, ponekad je prikladno promatrati dvostruki korijen varijance, tj. standardnu devijaciju

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (5.6)$$

koja predstavlja mjeru raspršenosti ili širine populacije izraženu jedinicama promatrane varijable. Statističko zaključivanje podrazumijeva izračun vrijednosti parametara uzorka. Cilj statističkog zaključivanja je donošenje zaključka o populaciji na osnovu uzorka koji je dio promatrane populacije, slika 5.4. Statistička vrijednost je definirana kao bilo koja vrijednost uzorka čiji su svi članovi poznati. Jednadžbe (5.1), (5.2) i (5.3) tako predstavljaju statističke vrijednosti uzorka.



slika 5.4 Odnos između populacije i uzorka populacije interpretiranog histogramom

Općenito, distribucije vjerojatnosti se mogu podijeliti u dvije skupine: kontinuirane distribucije (kad se varijabla može izmjeriti na neprekinutoj skali) i diskontinuirane ili diskretne distribucije (kad varijabla može poprimiti samo određene vrijednosti, npr. cjelobrojne). Značajne kontinuirane distribucije su: normalna, lognormalna, eksponencijalna, gamma i Weibulova distribucija. Značajne diskretne distribucije su hipergeometrijska, Poissonova i Pascalova distribucija.

5.1.2.1 Normalna distribucija vjerojatnosti

Normalna distribucija je vjerojatno najznačajnija distribucija u teoriji i primjeni statistike. Ukoliko je x normalna slučajna varijabla, vjerojatnost distribucije x je definirana kao funkcija (Montgomery, 2009.):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (5.7)$$

Zbog učestalog spominjanja normalne distribucije često se koristi posebna oznaka

$$x \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (5.8)$$

kojom se označava da je varijabla x normalno distribuirana sa srednjom vrijednosti μ i variancom

σ^2 . Jednostavnom interpretacijom standardne devijacije σ normalne distribucije može se prikazati kako se 68,26% vrijednosti populacije nalazi u području ograničenom s $\mu \pm 1\sigma$; 95,46% vrijednosti se nalazi u području ograničenom s $\mu \pm 2\sigma$ dok se 99,73% vrijednosti populacije nalazi u području ograničenom s $\mu \pm 3\sigma$. Normalna distribucija se često pretpostavlja kao prikladan matematički model slučajne varijable. Ukoliko su x_1, x_2, \dots, x_n nezavisne nasumične varijable sa srednjom vrijednosti μ_i i varijancom σ_i^2 te ako je $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$, tada se distribucija

$$\frac{y - \sum_{i=1}^n \mu_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}$$

približava $N(0, 1)$ distribuciji kako se n približava beskonačnoj vrijednosti. Ovaj teorem se često naziva i centralni teorem. Kumulativna distribucija standardne normalne distribucije je definirana kao vjerojatnost da je normalno distribuirana slučajna varijabla x manja ili jednaka nekoj vrijednosti a (Montgomery, 2009.):

$$P\{x \leq a\} = F(a) = \int_{-\infty}^a \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (5.9)$$

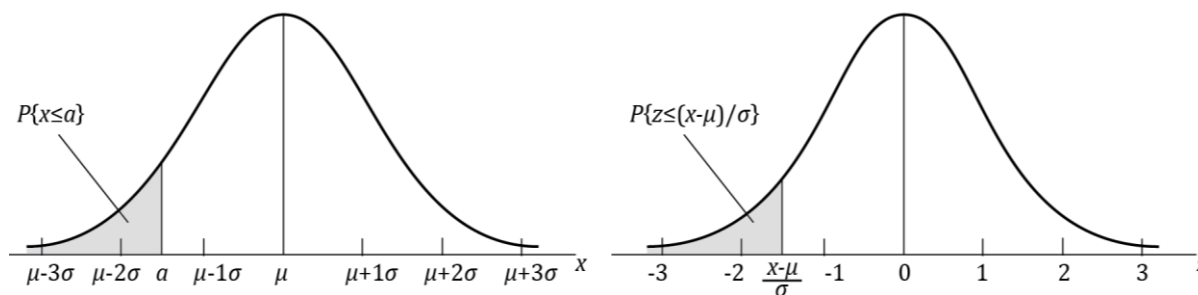
što se uvođenjem nove varijable z

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (5.10)$$

može prikazati kao

$$P\{x \leq a\} = P\left(z \leq \frac{x - \mu}{\sigma}\right) \equiv \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) \quad (5.11)$$

gdje je $\Phi(\cdot)$ funkcija kumulativne distribucije standardne normalne distribucije (gdje je srednja vrijednost = 0, a standardna devijacija = 1). Tablica kumulativne standardne distribucija široko je dostupna u literaturi (Montgomery, 2009.). Transformacija varijabli prikazana jednačbom (5.10) obično se naziva standardizacijom jer pretvara nasumičnu varijablu $N(\mu, \sigma^2)$ u nasumičnu varijablu $N(0, 1)$, slika 5.5.



slika 5.5 Normalna (lijevo) i standardna normalna distribucija (desno)

S obzirom da se u literaturi navode samo vjerojatnosti s lijeve strane od vrijednosti z , potrebno je upotrijebiti simetriju normalne distribucije kako bi se odredile vjerojatnosti s druge strane na način da je

$$P\{x \geq a\} = 1 - P\{x \leq a\} \quad (5.12)$$

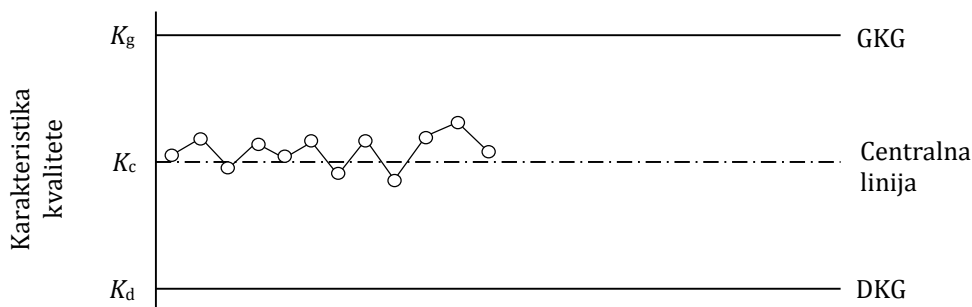
$$P\{x \geq -a\} = P\{x \leq a\}. \quad (5.13)$$

5.1.2.2 Ostale kontinuirane distribucije vjerojatnosti

Pojavljivanje ne-normalnih distribucija vjerojatnosti je učestalo u mnogim granama tehnike. Proces odabira matematičke distribucije koja najbolje pristaje određenoj populaciji može biti vrlo važno pri donošenju odluka vezanih za upravljanje kvalitetom. Najčešće ne-normalne distribucije u tehnici su Weibulova i Lognormalna distribucija.

5.1.3 Statističke osnove kontrolnih karti

Kontrolne karte sadrže liniju srednje vrijednosti koja predstavlja centralnu vrijednost karakteristike kvalitete koja je karakteristična za proces koji je pod kontrolom. Druge dvije horizontalne linije koje se nalaze na kontrolnoj karti nazivaju se gornjom kontrolnom granicom (GKG) na vrijednosti K_g i donjom kontrolnom granicom (DKG) na vrijednosti K_d , slika 5.6.



slika 5.6 Primjer kontrolne karte

Te se dvije granice odabiru na način da će se, ako je proces pod kontrolom, vrijednosti svih izmjera uzoraka nalaziti između njih. Dok god se izmjereni podaci nalaze unutar tih granica, smatra se da je sustav pod kontrolom i nikakve korektivne akcije tada nisu potrebne. Izmjerena vrijednost parametra koja se nalazi izvan tih granica interpretira se kao dokaz da je proces izvan kontrole. Međutim, čak i ako se sve izmjerene vrijednosti u kontrolnoj karti nalaze unutar kontrolnih granica u nekakvom sistematičnom i ne-nasumičnom obliku, tada se i to može interpretirati kao znak da je proces izvan kontrole. Npr. ako se od zadnjih 20 mjerenja, njih čak 18 nalazi između centralne linije i GKG, a samo 2 mjerenja između linije srednje vrijednosti i DKG, tada postoji osnovana sumnja da je možda nešto u procesu krivo i da postoji dodijeljiv uzrok pomaka.

5.1.3.1 Određivanje parametara hipoteza i testiranje hipoteza

Iz navedenog je moguće zaključiti kako postoji vrlo bliska veza između kontrolnih karti i testiranja hipoteza. Statistička hipoteza predstavlja stav oko vrijednosti parametara neke distribucije vjerojatnosti. Stav da su statističke vrijednosti tj. parametri distribucije jednaki nekim prethodno definiranim vrijednostima označava se s H_0 i naziva se nul-hipotezom, dok se stav da su ti parametri različiti od iste prethodno definirane vrijednosti označava s H_1 i naziva se alternativnom hipotezom. Postupci testiranja hipoteza su vrlo korisni i primjenjivi pri rješavanju različitih vrsta problema u području statističke kontrole procesa.

Važan dio statističkog zaključivanja je prethodno definiranje parametra opisanog u nul-hipotezi i alternativnoj hipotezi. Do tog se parametra generalno dolazi na jedan od tri načina:

- zaključkom dobivenim prethodno prikupljenim (iskustvenim) saznanjima o vrijednostima parametara procesa koji je pod kontrolom
- teoretskom pretpostavkom
- prethodno propisanom (dogovorenim) odlukom.

Prvi način je vrlo čest u statističkoj kontroli procesa gdje se koriste podaci iz prošlosti kako bi se odredila vrijednost parametra koji karakterizira stanje procesa koji je pod kontrolom i zatim vrši periodičko testiranje hipoteza da se vrijednost tog parametra nije promijenila.

Kako bi se testirala hipoteza, izuzima se nasumični uzorak iz populacije koja se istražuje, na uzorku se vrši odgovarajući statistički test nakon čega se prihvaća ili odbacuje nul-hipoteza. Skup vrijednosti statističkog testa koje dovode do odbacivanja H_0 zove se kritično područje ili područje odbacivanja. Pri tome se mogu pojaviti ukupno dvije vrste pogreške pri testiranju hipoteze. Ako je nul-hipoteza odbačena kad je točna - radi se pogrešci prve vrste. Ako nul-hipoteza nije odbijena kad je bila netočna - radi se o pogrešci druge vrste. Vjerojatnosti nastanka tih pogrešaka označavaju se kao:

$$\alpha = P\{\text{pogreška prve vrste}\} = P\{\text{odbačen } H_0 | H_0 \text{ je točan}\}$$

$$\beta = P\{\text{pogreška druge vrste}\} = P\{\text{nije odbačen } H_0 | H_0 \text{ je netočan}\}$$

Ponekad je prikladno koristiti i izraz snage statističkog testa, pri čemu je:

$$\text{snaga} = 1 - \beta = P\{\text{odbačen } H_0 | H_0 \text{ je netočan}\}. \quad (5.14)$$

Snaga statističkog testa tako predstavlja vjerojatnost ispravnog odbijanja H_0 kad je on zaista netočan. Za ilustraciju, pri kontroli kvalitete, a vezano za planove preuzimanja pošiljki, α se često naziva i proizvođačevim rizikom jer označava vjerojatnost da će dobra pošiljka biti odbijena. S druge strane, β se često naziva i kupčevim rizikom jer predstavlja vjerojatnost prihvatanja pošiljke loše kvalitete.

Ako se promatra karakteristika kvalitete koja se prati putem kontrolne karte, slika 5.6 i ukoliko se točke, koje predstavljaju vrijednosti uzoraka promatranih u određenim intervalima, ucrtane u kontrolnu kartu nalaze unutar kontrolnih granica i ne formiraju sistematični obrazac već se pojavljuju nasumično - zaključuje se da je proces pod kontrolom tj. da je trenutna vrijednost procesa jednaka nekoj vrijednosti koja je ranije definirana kao vrijednost koja je karakteristična procesu koji je pod kontrolom. Ukoliko pak kontrolirana vrijednost izlazi izvan kontrolnih granica, zaključuje se da je proces izvan kontrole.

Kontrolna karta je zapravo test hipoteze da je neki proces u stanju statističke kontrole. Testiranje hipoteze je posebno korisno kod analize učinkovitosti kontrolne karte te se pogrešne ocjene stanja procesa mogu svesti na dva slučaja pogrešaka navedenih testiranja hipoteza:

- I. pogrešku prve vrste kad se zaključuje da je proces izvan kontrole kad je zapravo pod kontrolom i
- II. pogrešku druge vrste kad se zaključuje da je proces pod kontrolom kad je zapravo izvan kontrole.

Montgomery (2009.) je prikazao općeniti model kontrolne karte. Ako je w jednostavna statistička mjera neke karakteristike koja predstavlja kvalitetu, μ_w njena srednja vrijednost i σ_w standardna devijacija, kontrolne granice i centralna linija mogu se odrediti kao:

$$\begin{aligned} K_g &= \mu_w + k\sigma_w \\ K_c &= \mu_w \\ K_d &= \mu_w - k\sigma_w \end{aligned} \quad (5.15)$$

pri čemu je k koeficijent udaljenosti kontrolnih granica od centralne linije, izražena kao višekratnik standardne devijacije. K_c je vrijednost karakteristike na centralnoj liniji kontrolnog polja. Ovu općenitu teoriju prvi je predložio Shewhart pa se kontrolne karte razvijene po ovom principu nazivaju Shewhartove kontrolne karte.

5.1.3.2 Zaključivanje o srednjoj vrijednosti populacije kad je varijanca poznata

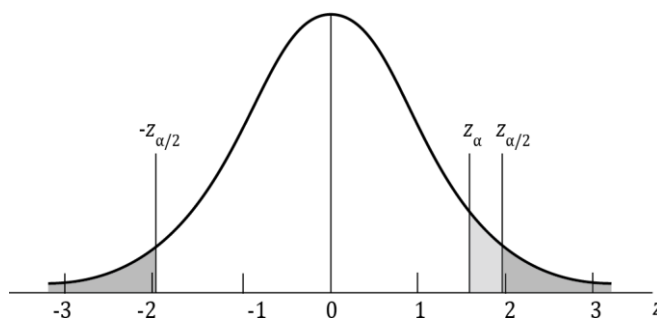
Neka je x nasumična varijabla s nepoznatom srednjom vrijednosti μ i poznatom varijancom σ^2 . Potrebno je testirati hipoteze koje se mogu izraziti na način:

$$\begin{aligned} H_0: \mu &= \mu_0 \\ H_1: \mu &\neq \mu_0. \end{aligned}$$

Alternativna hipoteza H_1 pretpostavlja da je μ manji ili veći od μ_0 pa se ponekad naziva i dvostrukom (obostranom) alternativnom hipotezom. Sam postupak testiranja hipoteze pretpostavlja nasumično izdvajanje uzorka veličine n i promatranje varijable x tj. pojedinačnih vrijednosti x_1, x_2, \dots, x_n . Prikladni statistički test uzorka tada glasi (Montgomery, 2009.):

$$Z_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (5.16)$$

te se ovakav test u literaturi naziva i Z-test. Testom se zaključuje se da je nul-hipoteza H_0 odbačena ako je $|Z_0| > Z_{\alpha/2}$ pri čemu je $Z_{\alpha/2}$ gornja $\alpha/2$ točka postotka standardne normalne distribucije. Kod jednostranog testa vrijedi da se nul-hipoteza odbacuje ako je $|Z_0| > Z_\alpha$, slika 5.7.



slika 5.7 Kriteriji statističkog testa

Iz centralnog teorema je poznato da je srednja vrijednost uzorka \bar{x} distribuirana otprilike prema $N(\mu, \sigma^2/n)$. Tada, ako je nul-hipoteza $H_0: \mu = \mu_0$ točna, Z_0 je distribuiran prema $N(0,1)$. Kao posljedica toga, za očekivati je da će se $100(1 - \alpha)\%$ vrijednosti Z_0 nalaziti između vrijednosti $-Z_{\alpha/2}$ i $Z_{\alpha/2}$. Uzorak čiji se Z_0 nalazi izvan tih granica znak je da se nul-hipotezu $H_0: \mu = \mu_0$ treba odbaciti. Standardna normalna distribucija se smatra referentnom distribucijom Z-testa.

Interval procjene je interval između dvije statistički određene vrijednosti u kojem se parametar smatra ispravnim s određenom vjerojatnošću. Na primjer, kako bi se odredio interval procijene srednje vrijednosti μ prvo je potrebno odrediti statističke vrijednosti DGP i GGP takve da je

$$P\{DGP \leq \mu \leq GGP\} = 1 - \alpha. \quad (5.17)$$

Interval između statističkih vrijednosti DGP i GGP se naziva $100(1 - \alpha)\%$ -tni interval povjerenja nepoznate vrijednosti μ . DGP i GGP su pri tome donja i gornja granica povjerenja, a $1 - \alpha$ je koeficijent povjerenja. Interval povjerenja prikazan jednadžbom (5.17) točnije bi se mogao nazvati dvostranim intervalom povjerenja. Ponekad je prikladnije promatrati jednostranu granicu povjerenja. Ako je DGP niža granica s $100(1 - \alpha)\%$ povjerenja, vrijedi $D \leq \mu$, a granica je odabrana tako da je

$$P\{DGP \leq \mu\} = 1 - \alpha. \quad (5.18)$$

Ako se razmotri nepoznata varijabla x s nepoznatom srednjom vrijednosti μ i poznatom varijancom σ^2 te izuzme nasumičan uzorak n promatranja x_1, x_2, \dots, x_n te izračuna \bar{x} . Tada je $100(1 - \alpha)\%$ -tni interval povjerenja za μ jednak

$$\bar{x} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.19)$$

pri čemu je $Z_{\alpha/2}$ točka postotka $N(0,1)$ distribucije takva da je $P\{z \geq Z_{\alpha/2}\} = \alpha/2$.

5.1.3.3 Korištenje P -vrijednosti kod testiranja hipoteze

Tradicionalni način tumačenja rezultata testa hipoteza je prihvaćanje ili odbijanje nul-hipoteze sa definiranim vrijednosti α ili razinom značajnosti. Pri tome, ukoliko dođe do odbijanja nul-hipoteze nije moguće odrediti da li je stvarna vrijednost samo malo udaljena od područja prihvaćanja hipoteze ili je ona mnogo dalje. Da bi se izbjegle takve poteškoće uveden je pristup koji koristi tzv. P -vrijednost. P -vrijednost je vjerojatnosti odbijanja nul-hipoteze H_0 te što je P -vrijednost manja to je manja i empirijski utvrđena vjerojatnost odbacivanja nul-hipoteze H_0 . Za normalnu distribuciju vrijedi (Montgomery, 2009.):

$$P = \begin{cases} 2[1 - \Phi(|Z_0|)] & \text{za dvostrani test} & H_0: \mu = \mu_0 \quad H_1: \mu \neq \mu_0 \\ 1 - \Phi(|Z_0|) & \text{za gornji test} & H_0: \mu = \mu_0 \quad H_1: \mu > \mu_0 \\ \Phi(Z_0) & \text{za donji test} & H_0: \mu = \mu_0 \quad H_1: \mu < \mu_0 \end{cases} \quad (5.20)$$

pri čemu je $\Phi(Z)$ funkcija kumulativne distribucije standardne normalne distribucije.

5.1.3.4 Zaključivanje o srednjoj vrijednosti normalne distribucije kad je varijanca nepoznata

Neka je x normalno distribuirana nasumična varijabla s nepoznatom srednjom vrijednosti μ i nepoznatom varijancom σ^2 . Potrebno je testirati hipoteze koje se mogu izraziti na način:

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0.$$

Ovaj je postavka slična onoj u 5.1.3.2, osim što je u ovom slučaju varijanca nepoznata. Iz tog razloga, potrebno je uvesti dodatnu pretpostavku – da je varijabla normalno distribuirana. Ta je pretpostavka potrebna kako bi se formalno postavio statistički test, ali određena odstupanja od normalne distribucije ne mijenjaju značajno rezultat (Montgomery, 2009.). Pošto je σ^2 nepoznata, može se procijeniti putem s^2 . Ukoliko se zamijeni σ sa s tada statistički test glasi

$$t_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{s/\sqrt{n}}. \quad (5.21)$$

Referentna distribucija statističkog testa je t distribucija s $n - 1$ stupnjeva slobode. Tada je $100(1 - \alpha)\%$ -tni dvostrani interval povjerenja za μ jednak

$$\bar{x} - t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + t_{\alpha/2, n-1} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (5.22)$$

pri čemu $t_{\alpha/2, n-1}$ označava točku postotka t distribucije s $n - 1$ stupnjeva slobode tako da je $P\{t_{n-1} \geq t_{\alpha/2, n-1}\} = \alpha/2$.

5.1.3.5 Zaključivanje o varijanci normalne distribucije

Dok su testovi srednjih vrijednosti relativno neosjetljivi na podrazumijevanje normalne distribucije, testovi varijanci nisu. Ako je potrebno testirati hipoteze da je varijanca normalne distribucije konstantna, recimo σ_0^2 , hipoteze su sljedeće:

$$H_0: \sigma^2 = \sigma_0^2$$

$$H_1: \sigma^2 \neq \sigma_0^2.$$

Statistički test ovih hipoteza je

$$\chi_0^2 = \frac{(n-1)s^2}{\sigma_0^2}. \quad (5.23)$$

pri čemu je s^2 varijanca nasumično izuzetog uzorka veličine n promatranja. Tada je $100(1 - \alpha)\%$ -tni dvostrani interval povjerenja za μ jednak

$$\frac{(n-1)s^2}{\chi_{\alpha/2, n-1}^2} \leq \sigma^2 \leq \bar{x} + \frac{(n-1)s^2}{\chi_{1-\alpha/2, n-1}^2} \quad (5.24)$$

pri čemu $\chi_{1-\alpha/2, n-1}^2$ označava točku postotka chi-kvadrat distribucije tako da je $P\{\chi_{n-1}^2 \geq \chi_{\alpha/2, n-1}^2\} = \alpha/2$.

5.1.3.6 Vjerojatnost nastanka pogreške druge vrste

U većini slučajeva testiranja hipoteza, važno je odrediti vjerojatnost nastanka pogreške druge vrste tj. snagu statističkog testa koji se provodi. Kao bi se ilustrirao ovakav izračun, odrediti će se vjerojatnost nastanka pogreške druge vrste testa gdje je varijanca σ^2 poznata. Statistički test za

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

hipoteze glasi:

$$Z_0 = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma/\sqrt{n}}. \quad (5.25)$$

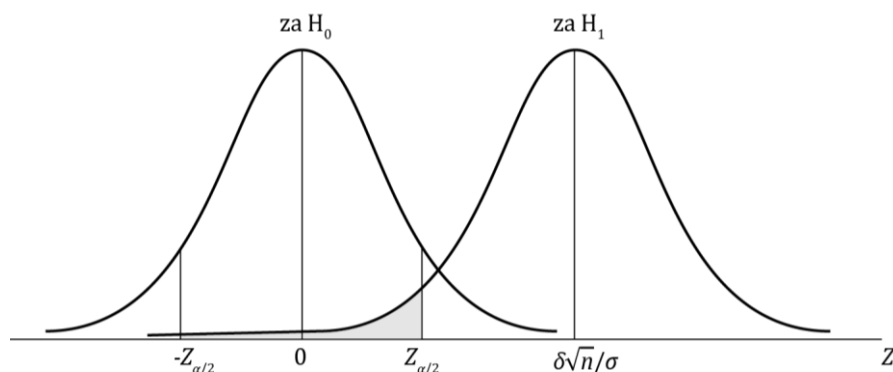
Kako bi se pronašla vjerojatnost nastanka pogreške druge vrste, potrebno je pretpostaviti da je nul-hipoteza H_0 netočna. Ako se pretpostavi da se zbog pomaka $\delta > 0$ srednja vrijednost distribucije pomakne na $\mu_1 = \mu_0 + \delta$, tada je alternativna hipoteza H_1 točna i pod tom pretpostavkom Z_0 je jednak

$$Z_0 \sim N\left(\frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma}, 1\right). \quad (5.26)$$

Distribucija statističkog testa Z_0 pod obje hipoteze prikazana je u nastavku, slika 5.8. Vjerojatnost pojave pogreške druge vrste u uvjetima standardne normalne kumulativne distribucije tako se može izraziti kao (Montgomery, 2009.):

$$\beta = \Phi \left[Z_{\alpha/2} - \frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma} \right] - \Phi \left[-Z_{\alpha/2} - \frac{\delta\sqrt{n}}{\sigma} \right] \quad (5.27)$$

iz čega je vidljivo kako je pogreška druge vrste ovisna o veličini pomaka koja se želi otkriti δ , veličini uzorka n i vrijednosti α . S obzirom na to, moguće je kreirati set krivulja koje opisuju vjerojatnost nastanka pogreške druge vrste. Grafički prikazi takvog oblika nazivaju se krivulje operativnih karakteristika. Jednadžba (5.21) vrijedi i kad je $\delta < 0$.



slika 5.8 Distribucija Z_0 za H_0 i H_1

5.1.4 Odabir kontrolnih granica kontrolnih karti

Iz navedenog je moguće zaključiti kako je odabir kontrolnih granica kontrolnih karti ekvivalentan postavljanju kritičnog područja za testiranje hipoteze. Kontrolnim kartama se zapravo testiraju hipoteze u ponavljajućim intervalima. Odabir kontrolnih granica jedan je od kritičnih odluka koje se moraju donijeti pri kreiranju kontrolne karte. Pomicanjem kontrolnih granica dalje od centralne linije smanjuje se α rizik pojave pogreške prve vrste tj. rizik da će se točka naći izvan kontrolnih granica kada ne postoji niti jedan dodijeljivi uzrok. No, takvo odmicanje granica će povećati rizik od pojave pogreške druge vrste tj. rizik da će se točka naći unutar kontrolnih granica kada je proces zapravo izvan kontrole. Ako se pak kontrolne granice pomiču prema centralnoj liniji postiže se suprotan učinak: rizik pojave pogreške prve vrste se povećava dok se rizik pojave pogreške druge vrste smanjuje. S obzirom na odabrani koeficijent udaljenosti kontrolnih granica k (npr. 3-sigma kontrolne granice, $k = 3$), a pod pretpostavkom da su podaci normalno distribuirani, iz standardnih tablica normalne razdiobe može se očitati vjerojatnost pojave pogreške prve vrste tj. pojavljivanja lažnog signala da je proces van kontrole.

Umjesto određivanja kontrolnih granica putem višekratnika standardne devijacije, moguće je izravno odabrati pogrešku prve vrste i putem nje odrediti pripadajuću kontrolnu granicu. Npr. za definiranu vjerojatnost nastanka pogreške prve vrste $\alpha = 0,001$ u jednom smjeru, prikladni višekratnik standardne devijacije bio bi 3,09 (iz Gaussove krivulje; Montgomery, 2009. ili

<http://www.zscorecalculator.com>). Kontrolne granice tada bi bile definirane kao:

$$K_g = \mu_0 + 3,09\sigma_0$$

$$K_d = \mu_0 - 3,09\sigma_0$$

Ove kontrolne granice se obično nazivaju granice vjerojatnosti 0,001 iako bi se logički trebale nazivati granicama vjerojatnosti 0,002 zbog toga što je ukupni (obostrani) rizik pojave pogreške prve vrste upravo toliki.

Shewhartove kontrolne karte imaju nedostatak jer koriste samo zadnji set promatranih podataka pri čemu se ignorira cijeli skup ostalih podataka koji su dostupni. To čini Shewhartove kontrolne karte relativno neosjetljivima na male pomake u procesu. Zato se često pojavljuje potreba uvođenja dodatnog para granica na kontrolne karte. Dok vanjske kontrolne granice (npr. na udaljenosti 3-sigma) predstavljaju korektivne granice nakon koji je potrebno izvesti određene korektivne akcije u procesu, unutarnje granice (npr. na udaljenosti 2-sigma) predstavljaju granice upozorenja. Gornja i donja granica upozorenja tada se računaju kao:

$$U_g = \mu_0 + 2\sigma_0$$

$$U_d = \mu_0 - 2\sigma_0$$

Ukoliko jedna ili više točaka padne između granice upozorenja i kontrolne granice, poželjno je pažljivije razmotriti odvija li se promatrani proces propisno. Dodavanjem dodatnih kontrolnih granica upozorenja moguće je povećati osjetljivost kontrolnih karti, tj ubrzati pojavu signala kontrolne karte pri situacijama izvan kontrole.

5.2 x-potez i R kontrolne karte

Mnoge karakteristike procesa ili proizvoda koje predstavljaju kvalitetu mogu biti izražene u obliku numerički izmjerene vrijednosti. Pojedina mjerljiva karakteristika kao što je dimenzija, težina, brzina, tlak ili volumen naziva se varijablom. Kontrolne karte za kontrolu varijabli se intenzivno koriste u proizvodnim sustavima. Kako bi se pratila određena varijabla sustava, obično je nužno provjeravati i srednju vrijednost karakteristike ali i njenu varijabilnost. Srednja vrijednost i varijabilnost karakteristika se često provjeravaju parom kontrolnih karti. I dok se srednja vrijednost karakteristika prati srednjim vrijednostima uzorka \bar{x} (zbog tehničkih razloga u naslovima, nazivima slika i tablica navedenih kao "x-potez"), varijabilnost karakteristika se prati putem vrijednosti standardnih devijacija uzoraka s , ili još češće R kontrolnim kartama kojima se prati vrijednost raspona uzoraka. Pod pretpostavkom da je promatrana karakteristika normalno distribuirana, sa srednjom vrijednosti μ i standardnom devijacijom σ pri čemu su obje vrijednosti poznate, izuzima se n uzoraka karakteristike x . Srednja vrijednost tog uzorka tada je, prema (5.1):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

a poznato je da je \bar{x} normalno distribuirana sa srednjom vrijednosti μ i standardnom devijacijom $\sigma_{\bar{x}} = \sigma/\sqrt{n}$. Tako postoji $100(1 - \alpha)\%$ -tna vjerojatnost da će se srednja vrijednost bilo kojeg uzorka nalaziti u rasponu između vrijednosti:

$$\mu - z_{\alpha/2} \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad \text{i} \quad \mu + z_{\alpha/2} \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad (5.28)$$

tj.

$$\mu - z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{i} \quad \mu + z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.29)$$

Stoga, ako su vrijednosti μ i σ poznate, jednadžbe (5.29) mogu poslužiti za izračun kontrolnih granica kontrolne karte za srednje vrijednosti. Pri tom se vrijednost $z_{\alpha/2}$ proizvoljno zamjenjuje s k , višekratnikom od σ , uobičajeno je $k = 3$ što bi značilo da se primjenjuju 3-sigma granice:

$$K_d = \mu - k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{i} \quad K_g = \mu + k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.30)$$

Općenita veza između koeficijenta kontrolnih granica i vjerojatnosti pogreške prve vrste može se prikazati kao (Wu et al., 2004.):

$$k = \Phi^{-1}(1 - 0,5\alpha) \quad (5.31)$$

pri čemu je $\Phi^{-1}(\cdot)$ inverzna funkcija kumulativne distribucije standardne normalne distribucije. Ukoliko srednja vrijednost uzorka izađe iz tih granica, može se smatrati da se srednja vrijednost procesa promijenila. Čak i ako gore pretpostavljena karakteristika nije normalno distribuirana, navedene vrijednosti su aproksimativno točne zbog teorema centralne granice (Montgomery, 2009.).

U praksi vrijednosti μ i σ obično nisu poznate pa ih je stoga potrebno ispitati, npr. probnim serijama proizvodnje u kontroliranim uvjetima. Takva ispitivanja se obično baziraju na $m = 20 - 25$ uzoraka, svaki od kojih sadrži $n = 4 - 6$ podataka promatrane karakteristike. Male veličine uzoraka procjenjuju se obično s obzirom na pojedine podgrupe podataka. Ako su $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ srednje vrijednosti svakog od uzoraka, onda se kao procjenitelj srednje vrijednosti cijele populacije μ iz koje su uzorkovani može koristiti izraz

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (5.32)$$

pa se tako ovaj izraz može koristiti i kao vrijednost centralne linije \bar{x} kontrolne karte.

Kako bi se konstruirale kontrolne granice R kontrolne karte, potrebno je procijeniti standardnu devijaciju populacije σ . Jedan mogući način za to je određivanjem raspona svakog pojedinog

izuzetog uzorka. Ako su x_1, x_2, \dots, x_n vrijednosti promatrane karakteristike u jednom uzorku, onda je raspon tog uzorka jednak $R = x_{\max} - x_{\min}$. Tako je za cijeli skup od m promatranih uzoraka veličine n , prosječni raspon jednak

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (5.33)$$

Na osnovi navedenog, moguće je formirati jednadžbe za određivanje vrijednosti kontrolnih granica \bar{x} i R kontrolnih karti.

Za \bar{x} kontrolne karte vrijedi

$$K_d = \bar{x} - A_2 \bar{R} \quad \text{i} \quad K_g = \bar{x} + A_2 \bar{R} \quad (5.34)$$

pri čemu je A_2 konstanta (Montgomery, 2009.), a centralna linija se nalazi na vrijednosti \bar{x} .

Varijabilnost procesa moguće je pratiti označavanjem raspona pojedinih uzoraka koristeći R kontrolnu kartu s kontrolnim granicama na vrijednostima

$$K_d = D_3 \bar{R} \quad \text{i} \quad K_g = D_4 \bar{R} \quad (5.35)$$

te centralnom linijom na vrijednosti \bar{R} . Konstante D_3 i D_4 definirane su tablično (Montgomery, 2009.). Često se devijacija populacije σ procjenjuje putem vrijednosti \bar{R}/d_2 pri čemu je d_2 vrijednost ovisna o veličini uzorka n (Montgomery, 2009.).

U prvoj fazi promjene \bar{x} i R kontrolnih karti, tijekom probne proizvodnje dok ne postoje nikakva saznanja o ponašanju i stabilnosti proizvodnog sustava, vrijednosti (5.34) i (5.35) koriste se kao probne kontrolne granice. Ukoliko neka od karti registrira stanje izvan kontrole, iz razloga što se proces u ovoj fazi detaljno prati, moguće je ustanoviti postoji li dodijeljivi uzrok i po potrebi revidirati vrijednosti kontrolnih granica.

5.2.1 Efekti ne-normalnosti kod \bar{x} -potez i R kontrolnih karti

Vrlo česta pretpostavka koja se povezuje s \bar{x} i R kontrolnim kartama je da je osnovna distribucija promatrane karakteristike - normalna. U mnogim situacijama postoji osnovana zabrinutost u tu pretpostavku, npr. kada se analizom podataka utvrdi da se ne može prihvatiti hipoteza o normalnoj distribuciji. Ukoliko je poznat oblik osnovne distribucije moguće je odrediti granice kontrolne karte no takav je pristup u nekim slučajevima vrlo složen pa većina analitičara ipak preferira pristup po normalnoj distribuciji ako postoji vjerovanje da efekt ne istinitosti u ovu pretpostavku ne dovodi do potpuno pogrešnog zaključka o stanju procesa (Montgomery, 2009.). S druge strane, postoje situacije kad nije poznat oblik osnovne distribucije i kad je jedino rješenje korištenja teorije normalne distribucije. Schilling i Nelson (1976.) su istražili uniformnu, desno-trokutastu, gamma i bimodalnu distribuciju (kombinacija dvije normalne distribucije). Njihova

studija pokazuje da je u većini slučajeva veličina uzorka od 4 ili 5 dovoljna da se osigura dovoljna robusnost pretpostavci da se radi o normalnoj distribuciji.

5.2.2 Krivulje operativnih karakteristika x-potez kontrolnih karti

Mogućnosti \bar{x} kontrolne karte da detektiraju pomak u procesu opisane su krivuljom operativnih karakteristika (engl. *Operating-characteristic curve*). Standardna devijacija σ je pretpostavljeno poznata i konstantna. Ako se srednja vrijednost pomakne iz vrijednosti pod kontrolom μ_0 u drugu vrijednost $\mu_1 = \mu_0 + \xi\sigma$, gdje je ξ koeficijent pomaka srednje vrijednosti uzorka prikazan kao višekratnik standardne devijacije, vjerojatnost da se taj pomak neće detektirati je jednak vrijednosti β -rizika:

$$\beta = P\{K_d \leq \bar{x} \leq K_g \mid \mu = \mu_1 = \mu_0 + \xi\sigma\}$$

Pošto je varijabla \bar{x} distribuirana na način da je

$$\bar{x} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right) \quad (5.36)$$

a vrijednost pomaka srednje vrijednosti je jednaka:

$$\delta = \xi\sigma \quad (5.37)$$

te su donja i gornja kontrolna granica jednake vrijednostima:

$$K_d = \mu_0 - k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{i} \quad K_g = \mu_0 + k \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.38)$$

slijedi da je vjerojatnost pojave pogreške druge vrste (ne signaliziranja stanja izvan kontrole kod pomaka δ) jednaka (Montgomery, 2009.):

$$\beta = \Phi\left[\frac{K_g - (\mu_0 + \xi\sigma)}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}\right] - \Phi\left[\frac{K_d - (\mu_0 + \xi\sigma)}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}\right] \quad (5.39)$$

$$\beta = \Phi\left[\frac{\mu_0 + k \frac{\sigma}{\sqrt{n}} - (\mu_0 + \xi\sigma)}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}\right] - \Phi\left[\frac{\mu_0 - k \frac{\sigma}{\sqrt{n}} - (\mu_0 + \xi\sigma)}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}\right] \quad (5.40)$$

pri čemu Φ označava standardnu normalnu funkciju kumulativne distribucije. Iz toga slijedi:

$$\beta = \Phi(k - \xi\sqrt{n}) - \Phi(-k - \xi\sqrt{n}) \quad (5.41)$$

Npr. ako se koristi \bar{x} kontrolna karta s $k = 3$ granicama (3-sigma granice) i veličinom uzorka $n = 5$. Da bi se odredila vjerojatnost da će se otkriti pomak srednje vrijednosti uzorka na $\mu_1 = \mu_0 + 2\sigma$ ($\xi = 2$) u prvom uzorkovanju nakon što se dogodio pomak, potrebno je prvo izračunati pripadajući rizik ne otkrivanja pomaka:

$$\beta = \Phi(3 - 2\sqrt{5}) - \Phi(-3 - 2\sqrt{5}) = \Phi(-1,472) - \Phi(-7,472)$$

Vrijednost očitana iz tablice iznosi $\beta \cong 0,0708$. Vjerojatnost da će se takav pomak otkriti, uz veličinu uzorka od $n = 5$, iznosi $1 - \beta = 1 - 0,0708 = 0,9292$. Očito je da se rizik ne otkrivanja pomaka smanjuje s povećanjem veličine pogreške koju se želi otkriti (ξ) kao i s povećanjem veličine uzorka (n).

Pri kreiranju kontrolne karte nužno je definirati veličinu uzorka i frekvenciju uzorkovanja, što su odluke koje se donose pri projektiranju kontrolnog podsustava. Sa statističkog stajališta, krivulje operativnih karakteristika \bar{x} i R kontrolnih karti mogu biti od pomoći projektantu kontrolnog podsustava pri odabiru veličine uzorka, pružajući osjećaj veličine pomaka varijabli procesa koji je moguće otkriti s pojedinom veličinom uzorka n .

Općenito, većom veličinom uzorka se lakše otkrivaju mali pomaci u procesu (Montgomery, 2009.). Pri odabiru veličine uzorka treba imati na umu veličinu pomaka koja se želi detektirati. Ukoliko su ti pomaci relativno veliki, odabiru se manje veličine uzorka nego onda kada se žele detektirati relativno mali pomaci. Najpoželjnija situacija za otkrivanje pomaka u procesu bilo bi vrlo često uzorkovanje velikih uzorka ali to nije obično nikad nije ekonomski isplativo. Generalni problem predstavlja odabir tzv. dodijeljenog napora uzorkovanja (eng. *allocating sampling effort*) procesa. To znači sljedeće: uzimaju se ili mali uzorci u kratkim intervalima ili veliki uzorci u dugim intervalima. Trenutna industrijska praksa, kod proizvodnji velikih serija proizvoda ili u procesima gdje se veliki broj dodijeljivih uzroka može pojaviti, favorizira uzorkovanje malih uzoraka vrlo često, kako ne bi prošlo puno vremena između dvije prilike za otkrivanjem pomaka karakteristike između kojih može biti proizvedena velika količina nesukladnih proizvoda (Montgomery, 2009.).

Kako bi se prikazala krivulja operativne karakteristike \bar{x} kontrolne karte grafički je prikazan odnos β -rizika prema pomaku kojeg je potrebno otkriti izraženog višekratnikom (ξ) standardnih devijacija za pojedine veličine uzorka (n), slika 5.9. Slika prikazuje vrijednosti za \bar{x} kontrolnu kartu s 3-sigma granicama te ukazuje na činjenicu da za tipične veličine uzorka od 4, 5 ili 6 \bar{x} kontrolna karta s 3-sigma granicama nije posebno korisna pri brzom otkrivanju malih pomaka varijabli procesa, točnije onih manjih od $1,5\sigma$. No, s narednim uzorkovanjima vjerojatnost ne otkrivanja pomaka se smanjuje pa tako vjerojatnost da se pomak otkrije u drugom uzorkovanju nakon nastanka pomaka iznosi $\beta(1 - \beta)$, u trećem $\beta^2(1 - \beta)$ itd. Iz navedenog vrijedi da vjerojatnost ne otkrivanja pomaka u c -tom uzastopnom uzorkovanju iznosi

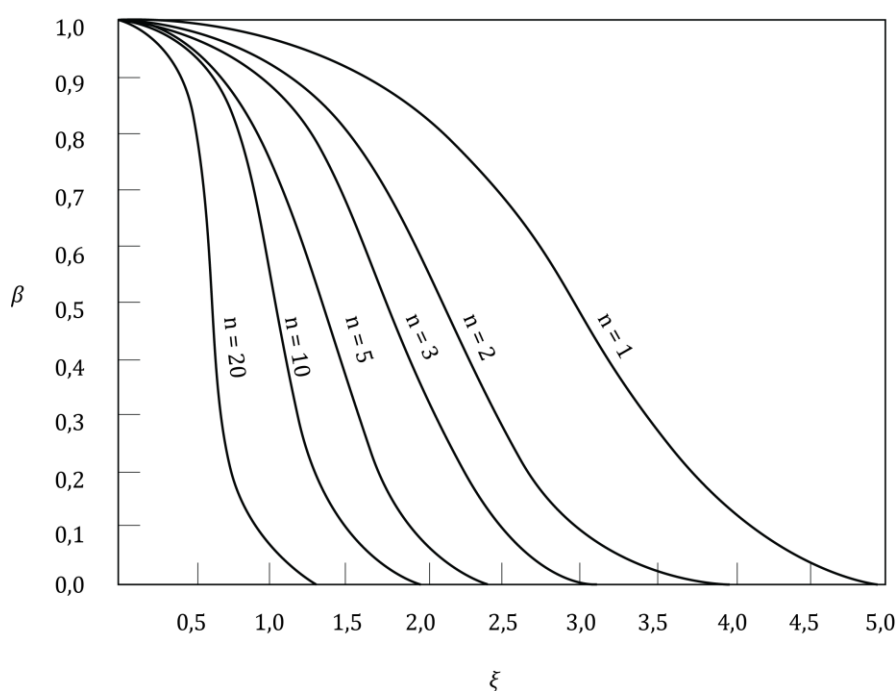
$$\beta^{c-1}(1 - \beta). \quad (5.42)$$

Očekivani broj uzorkovanja i statističkih testova koje je potrebno napraviti, kako bi se detektirao

pomak, predstavlja vrijednost prosječne duljine protoka ARL (eng. *Average Run Length*) kontrolne karte koja se može izraziti kao

$$ARL = \sum_{c=1}^{\infty} c\beta^{c-1}(1-\beta) = \frac{1}{1-\beta}. \quad (5.43)$$

Ovakva postavka podržava trenutnu industrijsku praksu čestog izuzimanja malih uzoraka koji, iako imaju relativno veliku vjerojatnost ne otkrivanja pomaka β u prvom uzorkovanju, imaju dobru šansu otkriti pomak relativno brzo u idućih nekoliko uzorkovanja. Brzina otkrivanja pomaka tada ovisi o propisanoj učestalosti uzorkovanja h što je isto vrijednost koju je potrebno definirati pri projektiranju kontrolnog podsustava.



slika 5.9 Krivulje operativnih karakteristika x -potez kontrolne karte s 3-sigma granicama, β - vjerojatnost ne otkrivanja pomaka veličine $\xi\sigma$ s uzorkom veličine n (Montgomery, 2009.)

Primjerice, ukoliko se želi otkriti pomak veličine 1σ ($\xi = 1$) s uzorkom veličine $n = 5$, tada je vjerojatnost ne otkrivanja pomaka u prvom statističkom testu jednaka $\beta = 0,75$ dok je potreban broj statističkih testova koje treba izvršiti da bi se takav pomak otkrio

$$ARL = \frac{1}{1-\beta} = \frac{1}{1-0,75} = \frac{1}{0,25} = 4.$$

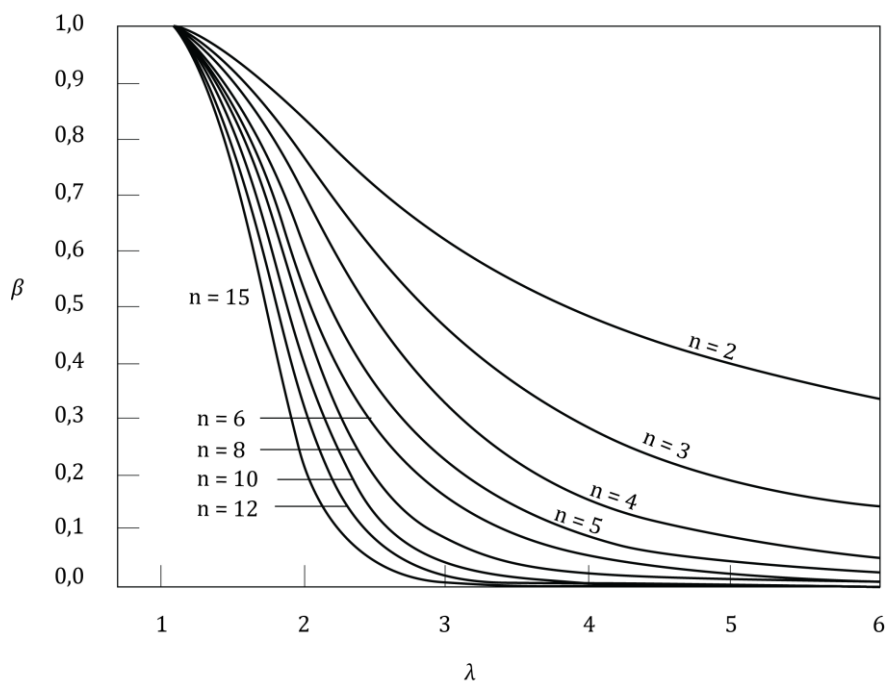
Veća vrijednost ARL, uz dug period potrebnog uzorkovanja, znači da će kontrolnom podsustavu trebati više vremena da otkrije željen pomak varijable procesa ili proizvoda. To može rezultirati povećanim troškovima i problemima u upravljivosti proizvodnje iz razloga što je cijeli period od nastanka pomaka sustav radio u stanju izvan kontrole pri tome koristeći sve resurse.

5.2.3 Krivulje operativnih karakteristika R kontrolnih karti

Kako bi se prikazale operativne karakteristike R kontrolnih karti, potrebno je definirati vrijednost relativnog omjera standardne devijacije varijable procesa koji je pod kontrolom i standardne devijacije iste varijable koju je potrebno otkriti

$$\lambda = \frac{\sigma_1}{\sigma_0}. \quad (5.44)$$

Promatrajući krivulje operativnih karakteristika R kontrolne karte s 3-sigma kontrolnim granicama, slika 5.10, moguće je zaključiti kako standardnim veličinama uzorka nije u potpunosti učinkovito otkrivanje malih pomaka standardnih devijacija. Primjerice, uzorkom veličine $n = 5$ postoji vjerojatnost oko 40% da će se otkriti dvostruko povećanje standardne devijacije $\lambda = 2$ u prvom uzorkovanju, iako je to relativno velik pomak.



slika 5.10 Krivulje operativnih karakteristika R kontrolne karte s 3-sigma granicama, β - vjerojatnost ne otkrivanja relativnog pomaka standardne distribucije λ s uzorkom veličine n (Montgomery, 2009.)

Takve karakteristike R kontrolnih karti ukazuju kako su neosjetljive na male pomake varijabli procesa za veličine uzoraka $n = 4, 5$ ili 6 . Za veće veličine uzoraka $n > 10$ ili 12 potrebno je koristiti s -kontrolne karte (Montgomery, 2009.).

5.2.4 Prosječna duljina protoka x -potez kontrolnih karti

Jedan od načina vrednovanja mogućih odluka donesenih pri projektiranju kontrolnog podsustava tj. vrednovanja varijanti mogućih strategija uzorkovanja i donošenja odluka pri odabiru veličine uzorka i frekvencije uzorkovanja je vrednovanje putem prosječne duljine protoka ARL kontrolne

karte. ARL je u biti prosječan broj točaka koje će biti ucrtane u kontrolnu kartu prije nego se registrira da je stanje procesa izvan kontrole. Za Shewhartove kontrolne karte općenito se može definirati izraz (Montgomery, 2009.):

$$ARL_{\text{Shewhart}} = \frac{1}{P} \quad (5.45)$$

gdje je P vjerojatnost da će bilo koja točka premašiti područje kontrolnih granica. Ovakva jednadžba može poslužiti za ocjenjivanje učinkovitosti kontrolne karte kao procjena perioda u kojem će kontrolna karta generirati ispravne signale.

Za \bar{x} kontrolnu kartu, vrijednost α predstavlja vjerojatnost da će neka točka kontrolne karte izaći izvan kontrolnih granica kad je proces pod kontrolom. Tada je prosječna duljina protoka kad je proces pod kontrolom jednaka

$$ARL_0 = \frac{1}{\alpha}. \quad (5.46)$$

To znači, da će \bar{x} kontrolna karta s 3-sigma kontrolnim granicama ($k = 3, \alpha = 0,0027$) čak i kad je proces pod kontrolom, generirati pogrešni „izvan kontrole“ signal svaki u prosijeku nakon svakog 370-tog statističkog testa.

S druge strane, kad je proces izvan kontrole, vjerojatnost da kontrolna karta neće registrirati pomak i da će generirati pogrešni „pod kontrolom“ signal jednak je vjerojatnosti β koja je ovisna o veličini pomaka kojeg je potrebno detektirati ξ kao i o veličini uzorka n . Parametar snage statističkog testa $1 - \beta$ tada je prikladan pokazatelj vjerojatnosti da će pomak procesa biti detektiran i da će kontrolna karta pravilno signalizirati stanje „izvan kontrole“. Prosječni broj točaka koje trebaju biti ucrtane u kontrolnu kartu prije nego se detektira pomak tada je jednak:

$$ARL = \frac{1}{1 - \beta} \quad (5.47)$$

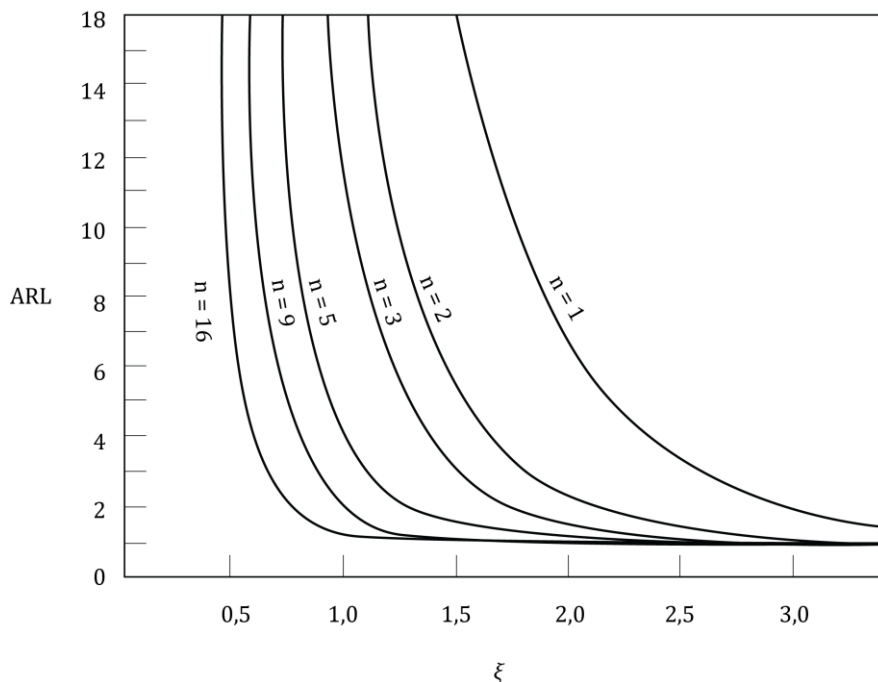
Pošto je za \bar{x} kontrolnu kartu relativno lako povezati izraz β s detekcijom pomaka $\xi\sigma$ (jednadžba 5.41), moguće je i napraviti set ARL krivulja za veličine uzorka $n = 1 \dots 16$, slika 5.11. Iz krivulja je moguće očitati da ako se \bar{x} kontrolnom kartom s 3-sigma kontrolnim granicama ($k = 3$) želi detektirati pomak veličine $1,5\sigma$ ($\xi = 1,5$) koristeći veličinu uzorka od $n = 3$ tada će prosječni broj izmjerenih uzoraka potrebnih da bi se pomak registrirao biti $ARL = 3$.

Ponekad je korisno izraziti učinkovitost kontrolne karte putem izraza o prosječnom vremenu do signala ATS (eng. *Average Time to Signal*). Ako se uzorci uzimaju iz procesa u intervalima od h sati onda općeniti izraz glasi (Montgomery, 2009.):

$$ATS_{\text{Shewhart}} = ARL_{\text{Shewhart}} \cdot h \quad (5.48)$$

što je zapravo vrijednost prosječne duljine rada kontrolne karte do signala izražena u jedinicama vremena. Kada je proces pod kontrolom, pogrešan signal da je proces „izvan kontrole“ će se pojaviti u prosjeku nakon svakog ARL_0 -tog intervala, što u vremenskim jedinicama glasi:

$$ATS_0 = ARL_0 \cdot h. \quad (5.49)$$



slika 5.11 Prosječna duljina protoka (uzoraka) ARL x -potez kontrolne karte potreban da bi se detektirao pomak veličine $\xi\sigma$ kontrolnom kartom s 3-sigma granicama (Montgomery, 2009.)

Ukoliko je interval uzorkovanja $h = 1$ sat, a proces je pod kontrolom te se koriste kontrolne karte s 3-sigma kontrolnim granicama ($k = 3$, $\alpha = 0,0027$), prosječno vrijeme do lažnog „izvan kontrole“ signala kad je proces zapravo pod kontrolom će iznositi 370 sati. Slično, kad je proces izvan kontrole, prosječni vremenski interval u kojem će se kontrolnom kartom ispravno detektirati stanje procesa „izvan kontrole“ će iznositi:

$$ATS = ARL \cdot h \quad (5.50)$$

što je vrijednost koja je ovisna o parametrima definiranim pri projektiranju kontrolnog podsustava (veličini uzorka n i intervalu uzorkovanja h) kao i o veličini pomaka kojeg je potrebno detektirati (ξ).

Kako je već navedeno, visoke vrijednosti β mogu rezultirati povećanim vremenom do signala kad je proces izvan kontrole ATS što može biti neprihvatljivo iz razloga što proizvodni proces u tom periodu generira dodatne troškove nastaju daljnji problemi na idućim operacijama u proizvodnom procesu. Moguće odluke koje bi rezultirale smanjenjem ovog vremena mogu biti: učestalije kontroliranje ili povećanje veličine uzorka. Da bi se odgovorilo na pitanje koliku

učestalost uzorkovanja odabrati, potrebno je uzeti u obzir i druge faktore: cijenu uzorkovanja, gubitke kad je proces izvan kontrole, kadencu proizvodnje (količinu proizvoda u vremenskoj jedinici) kao i moguće dodijeljive uzroke koji se mogu pojaviti u procesu.

5.3 Analiza sposobnosti proizvodnog procesa

Kvantifikacija izmjerenih varijabilnosti proizvoda može poslužiti za njihovu relativnu usporedbu s konstrukcijskim specifikacijama proizvoda. Sposobnost procesa je izraz koji se odnosi na njegovu uniformnost, a jednostavan način za izražavanje sposobnosti procesa je putem indeksa sposobnosti procesa C_p

$$C_p = \frac{T_g - T_d}{6\sigma} \quad (5.51)$$

gdje su T_g i T_d vrijednosti gornje i donje tolerancijske granice karakteristike kvalitete proizvoda. U praksi vrijednost σ gotovo nikada nije poznata pa ju je potrebno zamijeniti s njenom procijenjenom vrijednošću, npr. standardnom devijacijom uzorka s . Jednadžbama (5.38) pretpostavlja se da proces ima i gornju i donju tolerancijsku granicu. Za jednostrane tolerancije, koriste se jednostrani indeksi sposobnosti procesa

$$C_{pg} = \frac{T_g - \mu}{3\sigma} \quad (5.52)$$

$$C_{pd} = \frac{\mu - T_d}{3\sigma}. \quad (5.53)$$

Ukoliko se pretpostavi da je karakteristika kvalitete normalno distribuirana, da je proces pod statističkom kontrolom i da je u slučaju dvostranih tolerancija proces centriran točno između gornje i donje tolerancijske granice, moguće je izračunati očekivani broj izradaka nesukladnih s zahtjevima kvalitete na ukupno milijun pokušaja, tablica 5.1. S obzirom na takve podatke, moguće je postaviti preporučene minimalne vrijednosti indeksa sposobnosti procesa, za pojedine vrste procesa, tablica 5.2 (Montgomery, 2009.). Te su vrijednosti samo preporučene i posljednjih ih godina mnoge proizvodne kompanije definiraju strožima od navedenog.

5.3.1 Indeks sposobnosti procesa za ne centrirane procese

Indeks sposobnosti procesa ne uzima u obzir lokaciju srednje vrijednosti populacije u relativnom odnosu na tolerancijske granice već jednostavno predstavlja omjer širine tolerancijskog polja naspram raspršenosti procesa u vrijednosti 6σ . Taj se nedostatak ovog pokazatelja sposobnosti procesa može korigirati kreiranjem ponešto drugačijeg indeksa koji uzima u obzir i centriranost procesa

$$C_{pk} = \min(C_{pd}, C_{pg}). \quad (5.54)$$

Tako općenito vrijedi, ako je $C_p = C_{pk}$, proces je centriran točno između tolerancijskih granica, a ako je $C_p > C_{pk}$ tada je proces pomaknut iz centra. Iz navedenog se može zaključiti kako C_p predstavlja potencijalnu sposobnost procesa, dok C_{pk} predstavlja njegovu stvarnu sposobnost, slika 5.12.

tablica 5.1 Broj nesukladnih izradaka za centriranu, normalno distribuiranu karakteristiku procesa koji je pod kontrolom (Montgomery, 2009.)

C_p	Nesukladnih izradaka (izraženo u ppm)	
	Jednostrane tolerancije	Dvostrane tolerancije
0,50	66.807	133.614
0,70	17.865	35.729
0,90	3.467	6.934
1,00	1.350	2.700
1,10	484	967
1,20	159	318
1,30	48	96
1,40	14	27
1,50	4	7
1,60	1	2
1,70	0,17	0,34
1,80	0,03	0,06
2,00	0,0009	0,0018

tablica 5.2 Preporučene minimalne vrijednosti indeksa sposobnosti procesa C_p (Montgomery, 2009.)

	Jednostrane tolerancije	Dvostrane tolerancije
Postojeći proces	1,33	1,25
Novi proces	1,50	1,45
Sigurnosni ili kritičan parametar, postojeći proces	1,50	1,45
Sigurnosni ili kritičan parametar, novi proces	1,67	1,60

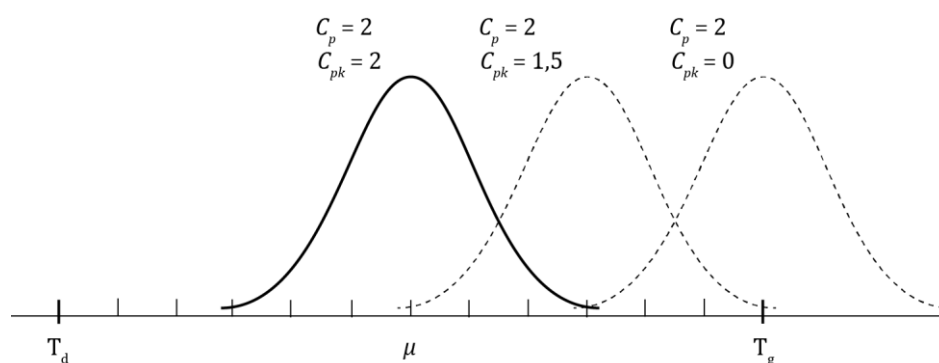
5.3.2 Efekti ne-normalnosti distribucije na indeks sposobnosti procesa

Kako je navedeno, važna pretpostavka izračunu indeks sposobnosti procesa je ta da je mjerena karakteristika procesa normalno distribuirana. No ako to nije slučaj, izračuni sposobnosti procesa mogu biti točni, a procjena o sposobnosti procesa pogrešna. Jedan pristup rješavanja tog problema uključuje normalizaciju skupa podataka, dok drugi pristup uključuje računanje indeksa sposobnosti na originalnom, ne-normalno distribuiranom skupu. Treći pristup određivanju sposobnosti takvih procesa je modifikacija navedenih pokazatelja sposobnosti kako bi se oni

prilagodili nekoj od općenitih obitelji distribucija kao što su Paersonova ili Johnsonova. Ovakva ideja uključuje korištenje kvantila distribucije procesa, pa je tako na kvantilima baziranu sposobnost procesa moguće izračunati kao

$$C_p(q) = \frac{T_g - T_d}{x_{0,99865} - x_{0,00135}}. \quad (5.55)$$

Pošto za normalnu distribuciju vrijedi da je $x_{0,99865} = \mu + 3\sigma$ i $x_{0,00135} = \mu - 3\sigma$, vidljivo je da za normalnu distribuciju vrijedi i da je $C_p(q) = C_p$.



slika 5.12 Odnos između C_p i C_{pk}

5.3.3 Indeks izvođenja procesa

Početak 90-tih godina prošlog stoljeća u SAD-u se javila potreba za standardizacijom zahtjeva koje je američka udruga proizvođača automobila AIAG imala prema svim svojim dobavljačima kako bi se standardizirali podaci izvještaja o sposobnostima procesa. AIAG je preporučila svojim dobavljačima računanje indeksa sposobnosti procesa C_p s procjenom standardne devijacije procesa putem $\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2$ kada je proces pod kontrolom. Kada pak proces nije pod kontrolom AIAG preporučuje računanje sposobnosti putem indeksa izvođenja procesa P_p i P_{pk} gdje je primjerice

$$\hat{P}_p = \frac{T_g - T_d}{6s} \quad (5.56)$$

pri čemu je s standardna devijacija uzorka

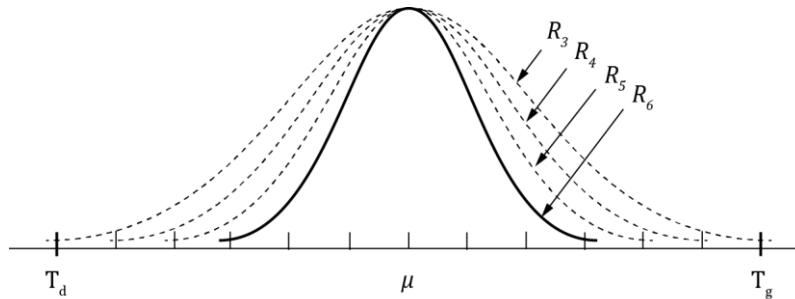
$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (5.57)$$

Kad je proces pod kontrolom, a promatrana varijabla normalno distribuirana vrijedi $\hat{P}_p = \hat{C}_p$, odnosno $\hat{P}_{pk} = \hat{C}_{pk}$ iz razloga što je za stabilan proces razlika između $\hat{\sigma}$ i \bar{R}/d_2 minimalna.

5.3.4 Sigma razina procesa

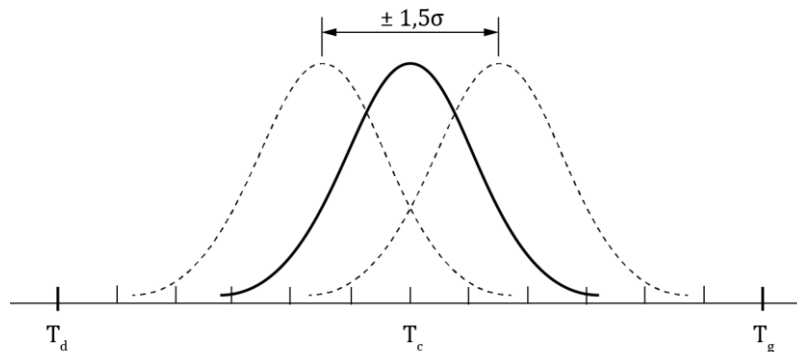
Mjerilo sigma razine procesa R_σ omogućuje usporedbu različitih procesa kroz cijelu organizaciju.

Sigma je statistički izraz koji mjeri koliko određeni proces odstupa od savršenosti koju predstavlja 6-sigma razina, mjereno u broju pogrešaka pri milijun pokušaja. U terminologiji „6-sigma procesa“, izraz 6-sigma označava postojanje razmaka od srednje vrijednosti karakteristike kvalitete procesa μ do najbliže tolerancijske granice u iznosu od upravo šest vrijednosti standardne devijacije populacije, tj. 6σ (www.ocot.ca), slika 5.13.



slika 5.13 Dostizanje 6-sigma razine procesa

Praksa ipak pokazuje da se procesi dugoročno ne izvode toliko dobro kao kratkoročno te da su svi procesi dugoročno podložni pomaku. Analitičari proizvodnih procesa su ustanovili da se srednja vrijednost karakteristika s vremenom pomakne, nazivajući tu vrijednost tada -dugoročnom dinamičkom varijacijom srednje vrijednosti. Inženjeri u Motoroli su ustanovili da dugoročna dinamička varijacija procesa iznosi $1,4 \div 1,6\sigma$ (Harry i Lawson, 1992.). Tako se pomicanjem srednje vrijednosti distribucije promatrane karakteristike za vrijednost koja je u industriji široko prihvaćena kao vrijednost $1,5\sigma$, sa svake strane distribucije, uzima u obzir pojava koja se događa u gotovo svim procesima kroz velik broj ciklusa proizvodnje, bez obzira na to koliko procesi bili dobro projektirani i održavani, slika 5.14.



slika 5.14 Dugoročni pomak vrijednosti karakteristike 6-sigma procesa

Dugoročni pomaci srednje vrijednosti posljedicu imaju u dodjeljivim uzrocima koji se pojavljuju s vremena na vrijeme u svakom procesu. Takva, dugoročno promatrana distribucija karakteristike procesa, očekivano će proizvoditi u kompanijama koje su implementirale 6-sigma metodologiju

opće prihvatljivih 3,4 defekta na milijun pokušaja (DNMP) što je ekvivalent 4,5-sigma razini kratkoročno promatranog procesa za jednostranu tolerancijsku granicu, tablica 5.3.

5.3.5 Doprinos procesa

Doprinos (eng. *Yield*) procesa, predstavlja vjerojatnost da će se proces odvititi bez pogrešaka i bez potrebe za njegovim ponavljanjem. Vrijednosti doprinosa procesa, koje su očito ovisne o sigma razinama procesa R_σ , moguće je statistički izračunati, poznajući očekivani oblik distribucije karakteristike koja opisuje kvalitetu izvođenja procesa. Za karakteristiku kvalitete koja je očekivano raspoređena prema normalnoj distribuciji, doprinos procesa moguće je izračunati prema

$$D \equiv \Phi(R_\sigma). \quad (5.58)$$

Kao i sigma razina procesa, vrijednost doprinosa ovisna je o širini distribucije promatrane karakteristike koja opisuje kvalitetu ali i o tolerancijskim granicama te karakteristike. Konkretnu vrijednost doprinosa moguće je očitati iz tablica standardne normalne distribucije ili Excel funkcijom $\text{NORMSDIST}(R_\sigma)$.

tablica 5.3 Parametri sigma razina procesa s dugoročnim pomakom za jednostranu toleranciju

R_σ	$R_\sigma - 1,5\sigma$	DNMP	Defekata (%)	Doprinos D (%)	Kratkoročni C_{pk}	Dugoročni C_{pk}
1	-0,5	691.462	69%	31%	0,33	-0,17
2	0,5	308.538	31%	69%	0,67	0,17
3	1,5	66.807	6,7%	93,3%	1,00	0,50
4	2,5	6.210	0,62%	99,38%	1,33	0,83
5	3,5	233	0,023%	99,977%	1,67	1,17
6	4,5	3,4	0,00034%	99,99966%	2,00	1,50
7	5,5	0,01	0,000019%	99,999981%	2,33	1,83

6 STRATEGIJE KONTROLE KVALITETE

Mogući problemi kvalitete vezani za dimenzijska odstupanja izratka jedni su od kritičnih pitanja koje je potrebno razmotriti pri projektiranju serijsko-paralelnih višesegmentnih proizvodnih sustava. Ta su pitanja posebno značajna kod proizvoda koji zahtijevaju visoku preciznost poput dijelova motora ili prijenosnika snage. Na nekim se segmentima sustava formiraju dimenzije koje kasnije predstavljaju tehnološke baze na segmentima koji slijede, pa se tako veličine devijacija dimenzijskih karakteristika proizvoda propagiraju kroz proces i dodatno povećavaju.

6.1 Utjecaj izvora varijabilnosti na dimenzijska odstupanja proizvoda

Općenito, devijacije dimenzijskih karakteristika proizvoda su posljedica tri izvora varijabilnosti koje je moguće podijeliti u dvije skupine, s obzirom na njihov korijenski uzrok:

1. naslijeđene varijabilnosti (varijabilnosti inducirane tehnološkim bazama obradaka)
2. nenaslijeđene varijabilnosti (varijabilnosti inducirane napravama za pozicioniranje obradaka i varijabilnosti inducirane alatima ili procesom), slika 6.1.

Devijacije dimenzijskih karakteristika obradka nakon r -tog segmenta proizvodnog procesa od njihovih nominalnih vrijednosti predstavljena su vektorom stanja X_r (Abellan-Nebot i Liu, 2013.):

$$X_r = A_{r-1}X_{r-1} + B_r^n U_r^n + B_r^a U_r^a + W_r; \quad r = 1, \dots, \mathcal{R}. \quad (6.1)$$

Komponente vektora stanja predstavljaju:

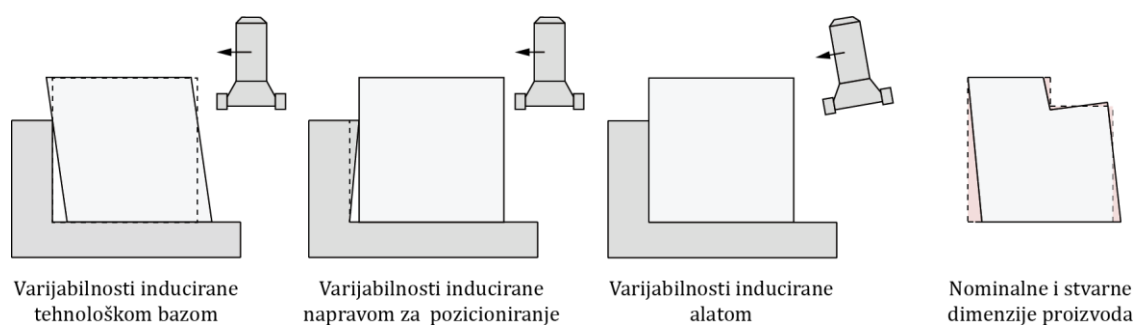
- X_{r-1} vektor stanja devijacija dimenzijskih karakteristika obradka nakon $r-1$ segmenta,
- U_r^n ulazni vektor devijacija naprave za pozicioniranje na r -tom segmentu,
- U_r^a ulazni vektor devijacija alata na r -tom segmentu,
- W_r inherentni šum na r -tom segmentu procesa

Matrice A i B jednadžbe 6.1 se mogu interpretirati kako je prikazano u nastavku, tablica 6.1.

Komponente nenaslijeđenih varijabilnosti tj. onih koje su inducirane napravom za pozicioniranje $B_r^n U_r^n$ i onih koje su inducirane alatima $B_r^a U_r^a$ na ukupno stanje devijacija proizvoda X_r mogu se prikazati jednom komponentom $B_r U_r$ (Ceglarek et al., 2004.):

$$X_r = A_{r-1} X_{r-1} + B_r U_r + W_r; \quad r = 1, \dots, \mathcal{R}. \quad (6.2)$$

Smanjenje i uklanjanje novih pogreški sadržanih u ulaznim vektorima U_r na segmentima proizvodnog procesa sastavljenog od ukupno \mathcal{R} segmenata dovodi do smanjenja i uklanjanja problema povezanih s kvalitetom konačnog proizvoda.



slika 6.1 Izvori varijabilnosti izratka u proizvodnim procesima (Abellan-Nebot i Liu, 2013.)

tablica 6.1 Interpretacija matrica proizvodnog procesa (Ceglarek et al., 2004.)

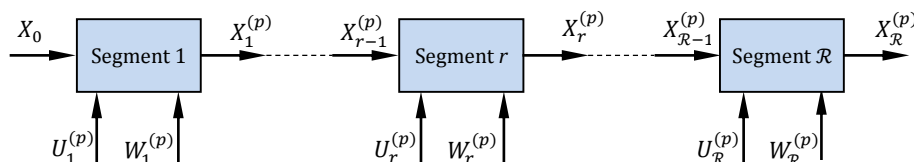
Simbol	Naziv	Odnos	Interpretacija
A_{r-1}	Tranzicijska matrica	$X_{r-1} \xrightarrow{A_{r-1}} X_r$	Matrica interpretira kako se varijabilnosti prenose s tehnoloških bazi formiranih prije r -tog segmenta na r -ti segment.
B_r	Ulazna matrica	$U_r \xrightarrow{B_r} X_r$	Matrica interpretira kako devijacije alata i naprava utječu na kvalitetu obratka na r -tom segmentu.

6.2 Model propagacija varijabilnosti kroz proizvodni sustav

Sirovi obradak ulazi u serijsko-paralelni višesegmentni proizvodni sustav s veličinama početnih odstupanja X_0 i prolazi jednom od putanja sustava prema definiranom proizvodnom procesu. Naslijeđene dimenzijske devijacije obratka X_{r-1} akumulirane u segmentima procesa $1, 2, 3, \dots, r-1$ utječu na dimenzijske devijacije obratka X_r koje postoje nakon r -tog segmenta. Pored toga, nove pogreške predstavljene vektorom U_r nastale zbog devijacija naprava i alata (proces) na r -tom segmentu proizvodnog procesa dodatno utječu na izlazne devijacije obratka X_r nakon r -tog segmenta. Uslijed prisutnosti neizostavnih uzroka koji djeluju na proces, inherentna prirodna varijacija (tzv. prirodni šum) W_r također utječe na izlaznu pogrešku X_r . Stanje devijacija obratka nakon r -tog segmenta na p -toj putanji može se tako prikazati u vektorskom obliku putem izraza

$$X_r^{(p)} = A_{r-1}^{(p)} X_{r-1}^{(p)} + B_r^{(p)} U_r^{(p)} + W_r^{(p)}; \quad r = 1, \dots, \mathcal{R}. \quad (6.3)$$

$X_r^{(p)}$ tada predstavlja vektor stanja kvalitete proizvoda (npr. dimenzijskih devijacija) nakon r -tog segmenta na p -toj putanji, slika 6.2.



slika 6.2 Model propagacija varijabilnosti kroz p -tu putanju proizvodnog sustava (Ceglarek et al., 2004.)

Fizičku implementaciju kontrolnog podsustava u proizvodnom sustavu čini određen broj kontrolnih stanica raspoređenih po segmentima proizvodnog procesa. Shetwan et al. (2011.) su proveli istraživanje optimalne alokacije kontrolnih stanica u višesegmentnom proizvodnom sustavu. No, osim što zahtijevaju detaljne podatke finog projektiranja proizvodnog sustava, takva istraživanja su orijentirana prema ekonomskoj isplativosti kontrole kvalitete i ne istražuju probleme uklanjanja korijenskog uzroka nastanka pogreške. Na području statističke kontrole procesa, razvijene su posebne kontrolne karte koje su primjenjive u serijsko-paralelnim višesegmentnim proizvodnim sustavima (Mortel i Runger, 1995.). No i takve su strategije statističke kontrole fokusirane uglavnom na detekciju promjene u procesu, no ne i na identifikaciju korijenskog uzroka promjene.

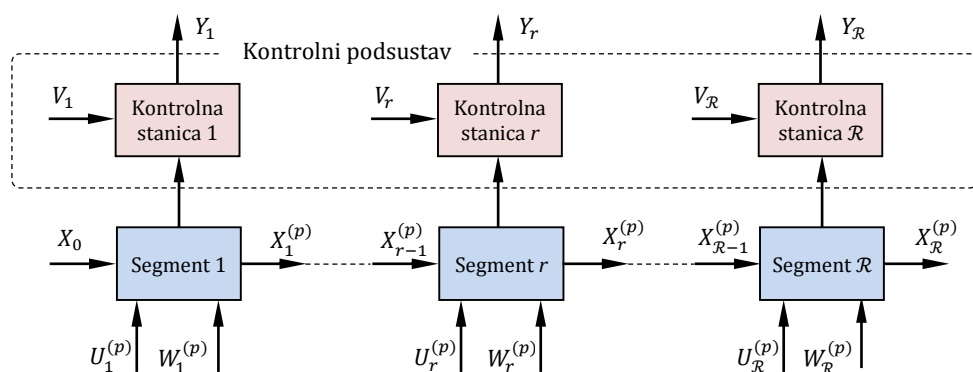
Ukoliko je $Y_r^{(p)}$ vektor izmjerenih devijacija karakteristika kvalitete proizvoda nakon r -tog segmenta proizvodnog procesa, na p -toj putanji, tretirajući vektor devijacija dimenzijskih karakteristika obradka $X_r^{(p)}$ kao vektor stanja, a oznaku proizvodnog segmenta kao vremenski indeks, moguće je definirati model propagacija varijabilnosti za svaku putanju posebno (Huang i Shi, 2004.), slika 6.3:

$$Y_r^{(p)} = C_r^{(p)} X_r^{(p)} + V_r; \quad r = 1, \dots, \mathcal{R} \quad (6.4)$$

pri čemu vektor V_r predstavlja vektor šuma mjernog senzora na kontrolnoj stanici nakon r -tog segmenta procesa. Pripadajuća matrica može se interpretirati na sljedeći način, tablica 6.2.

tablica 6.2 Interpretacija matrice kontrolnog podsustava (Ceglarek et al., 2004.)

Simbol	Naziv	Odnos	Interpretacija
C_r	Matrica mjerenja	$X_r \xrightarrow{C_r} Y_r$	Matrica interpretira odnos stvarnih i izmjerenih dimenzijskih devijacija obradka na kontrolnoj stanici nakon r -tog segmenta



slika 6.3 Implementacija kontrolnog podsustava u model propagacije varijabilnosti (Ceglarek et al., 2004.)

6.3 Reducirani model propagacija varijabilnosti kroz proizvodni sustav

Analiza strujanja varijabilnosti (eng. *Stream Of Variation Analysis*, SOVA) u proizvodnim procesima (Shi, 2010.) je usko specifična analiza za proizvodni sustav na kojem se primjenjuje i kao takva nije u potpunosti primjenjiva za ranu fazu projektiranja proizvodnog sustava u kojoj specifični podaci za proizvodni sustav još nisu dostupni. No, reducirani modeli propagacija varijabilnosti ukazuju na mogućnost ranog definiranja opterećenja kontrolnog podsustava. Redukcija modela propagacija varijabilnosti kroz proizvodni sustav pretpostavlja sljedeće (Huang i Shi, 2004.):

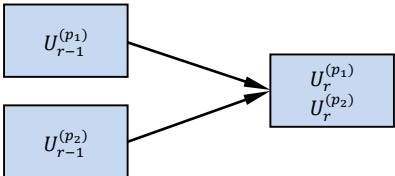
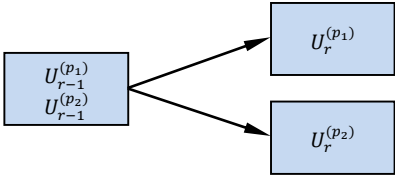
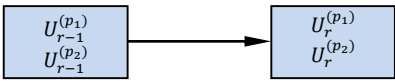
1. pretpostavka: Sve putanje hodograma proizvodnog procesa počinju iz istog skupa sirovi obradaka kojeg karakterizira početni vektor odstupanja X_0 . Ukoliko su sirovi obratci besprijekorne kvalitete, početni vektor odstupanja može se zanemariti.
2. pretpostavka: Svi alati, strojevi, oprema i operacije na istom segmentu procesa su jednaki. Obratci sa svih putanji se pozicioniraju i obrađuju identičnim napravama i alatima na svakom segmentu proizvodnog procesa.
3. pretpostavka: Ako se putanje p_1 i p_2 spoje na r -tom segmentu proizvodnog procesa, ulazni vektori U_r su identični na obje putanje, tj. $U_r^{(p_1)} = U_r^{(p_2)}$.
4. pretpostavka: Elementi pogreške W i V predstavljaju nasumičnu pogrešku unutar tolerancija alata i naprava u normalnim proizvodnim uvjetima. Pošto su alati i naprave identični u pojedinom pojedinačnom segmentu proizvodnog procesa, oznake segmenta u indeksu se izostavljaju.

Jedan od očitih nedostataka modela prikazanog jednadžbama (6.3) i (6.4) je njegova kompleksnost. Huang et al. (2004.) su istražili kako je takav visoko dimenzionirani model moguće reducirati.

6.4 Redukcija ulaznih vektora odstupanja procesa U

Ako se do tad razdvojene putanje hodograma proizvodnog procesa p_1 i p_2 spajaju u segmentu k , tada prema drugoj pretpostavci vrijedi da je $U_r^{(p_1)} = U_r^{(p_2)}$. Redukcija vektora varijabilnosti procesa ne doprinosi samo smanjenju visoke dimenzionalnosti prikazanog modela, već je potrebna kad se pojavi potreba za određivanjem vektora U, npr. pri identifikaciji korijenskih uzroka pomaka. No, potrebno je primijetiti da ako je $U_r^{(p_1)} = U_r^{(p_2)}$, nije nužno istina i da je $Y_r^{(p_1)} = Y_r^{(p_2)}$ iz razloga što je obradak na r -ti segment možda stigao različitim putanjama, tablica 6.3.

tablica 6.3 Spajanje dvaju putanji na jednom segmentu proizvodnog sustava (Huang i Shi, 2004.)

Klasifikacija	Opis	Rezultat
	Konvergencija: Putanje p_1 i p_2 se spajaju na r -tom segmentu.	$U_{r-1}^{(p_1)} \neq U_{r-1}^{(p_2)}$ $U_r^{(p_1)} = U_r^{(p_2)}$
	Divergencija: Putanje p_1 i p_2 se razdvajaju na segmentu $r-1$.	$U_{r-1}^{(p_1)} = U_{r-1}^{(p_2)}$ $U_r^{(p_1)} \neq U_r^{(p_2)}$
	Koincidencija: Putanje p_1 i p_2 ostaju iste na r -tom segmentu.	$U_{r-1}^{(p_1)} = U_{r-1}^{(p_2)}$ $U_r^{(p_1)} = U_r^{(p_2)}$

6.5 Redukcija vektora izmjerenih odstupanja karakteristika kvalitete Y

Ako su putanje hodograma proizvodnog procesa p_1 i p_2 spojene sve do operacije r_M , tablica 6.4 red 1, prema trećoj pretpostavci vrijedi da su ulazni vektori odstupanja procesa jednaki, tj.

$$U_r^{(p_1)} = U_r^{(p_2)} \text{ za } r = 1, \dots, r_M$$

Iz razloga što su tranzicijske matrice

$$A_{r-1}^{(p_1)} = A_{r-1}^{(p_2)} \text{ za } r = 1, \dots, r_M$$

identične za obje putanje i vektori dimenzijskih materijala na prethodnim segmentima

$$X_{r-1}^{(p_1)} = X_{r-1}^{(p_2)} \text{ za } r = 1, \dots, r_M$$

identični, slijedi da su i vektori odstupanja karakteristika kvalitete nakon r -tog segmenta

proizvodnog procesa identični, tj. $Y_r^{(p_1)} = Y_r^{(p_2)}$. Na taj se način za cijeli dio procesa do segmenta r_M mogu eliminirati svi vektori odstupanja karakteristika kvalitete $Y_r^{(p_2)}$ i pratiti samo vektori $Y_r^{(p_1)}$. Pošto varijable sadržane u vektorima Y predstavljaju karakteristike kvalitete koje treba izmjeriti, ovakva redukcija predstavlja značajni doprinos smanjenju napora i troškova kontrole.

U proizvodnim sustavima često postoji još jedna mogućnost za redukcijom vektora odstupanja karakteristika kvalitete Y , a time i redukcijom potrebnih mjerenja. Ukoliko se na r -tom segmentu obrađuju oblici koji se koriste kao tehnološke baze na segmentima $r + 1$ do $r + R$, tablica 6.4, red 2, a na segmentu $r + R$ putanje spajanju, tada su vektori odstupanja karakteristika kvalitete nakon proizvodnog segmenta $r + R$ identični, tj.

$$Y_{r+R}^{(p_1)} = Y_{r+R}^{(p_2)}.$$

tablica 6.4 Posebni slučajevi spajanja putanji (Huang et al., 2004)

Spajanje dvaju putanji	Opis	Rezultat
	<p>Putanje p_1 i p_2 su spojene od segmenta 1 do M,</p> <p>$u_k^{(p_1)} = u_k^{(p_2)}$ za $r = 1, \dots, r_M$.</p>	$Y_r^{(p_1)} = Y_r^{(p_2)}$ $r = 1, \dots, r_M$
	<p>Dijelovi izratka obrađeni u segmentu r koriste se kao tehnološke baze u segmentima od $r + 1$ do $r + R$.</p>	$Y_{r+R}^{(p_1)} = Y_{r+R}^{(p_2)}$

Huang et al. (2004.) su model na kojima više nije moguće izvesti redukcije vektora U i Y nazvali modelom minimalnih dimenzija. Pri tome je Y redukcija modela nastavak U redukcije modela sustava. Pri tome model sustava minimalnih dimenzija sadrži sve varijabilnosti obradaka (proizvoda) kroz proizvodni proces. Dijagnostibilnost sustava minimalnih dimenzija pri tome nije smanjena U i Y redukcijom.

Moguće strategije kontrole kvalitete u serijsko-paralelnim višesegmentnim proizvodnim sustavima su sljedeće:

1. strategija: Za svaki je promatrani izradak poznata putanja njegovog kretanja do promatrane operacije. Na kontrolnoj stanici nakon promatrane operacije vrši se mjerenje odstupanja karakteristika kvalitete na svim segmentima proizvodnog procesa $r =$

- 1, ..., R i to za svaku putanju zasebno. Ovakva strategija je pogodna za praćenje procesa i identificiranje korijenskog uzroka pomaka karakteristike proizvoda no iziskuje najveće napore mjerenja.
2. strategija: Kao i prethodna strategija, i ova podrazumijeva mjerenje odstupanja karakteristika kvalitete na svakom segmentu proizvodnog procesa $r = 1, \dots, R$, no ignoriraju se propagacije varijabilnosti iz prethodnih segmenata proizvodnog sustava i potpuno nasumično se izabiru izradci za mjerenje, neovisno po kojoj putanji su prošli do promatrane operacije. Ovakva strategija, iako je često korištena, nije posebno pogodna za statističku kontrolu procesa iz razloga što se analiziraju podaci dobiveni mjerenjima izradaka koji su prolazili kroz sustav različitim putanjama. Osim za praćenje procesa, ova strategija nije pogodna niti za analizu korijenskog uzroka pomaka karakteristike.
3. strategija: Mjerenje odstupanja karakteristika kvalitete u modelu s minimalnim dimenzijama. Ova strategija je slična prvoj, s time da je model reduciran na manje dimenzija putem U i Y redukcije. Sve propagacije varijabilnosti se mogu pratiti putem dobivenih izmjera pa su i nakon redukcija zadržane mogućnosti praćenja procesa i identificiranja korijenskog uzroka pomaka karakteristike proizvoda uz nešto manje napore mjerenja.
4. strategija: Mjerenje odstupanja karakteristika kvalitete u modelu s minimalnim dimenzijama u svim segmentima proizvodnog procesa $r = 1, \dots, R$ za samo onoliko putanji koliko je dovoljno da se pokriju svi strojevi (alati) na svim segmentima proizvodnog sustava. Ovakva strategija je pogodna za identificiranje korijenskog uzroka pomaka karakteristike proizvoda ali ne i za praćenje procesa.

Ovako reducirani model serijsko-paralelnih više-proizvodnih proizvodnih sustava manjih je dimenzija no ipak dovoljan da se njime opišu sve propagacije varijabilnosti u proizvodnom procesu. Pri tome tehnike reduciranja iako smanjuju napore mjerenja ne utječu na dijagnostibilnost sustava (Huang i Shi, 2004.).

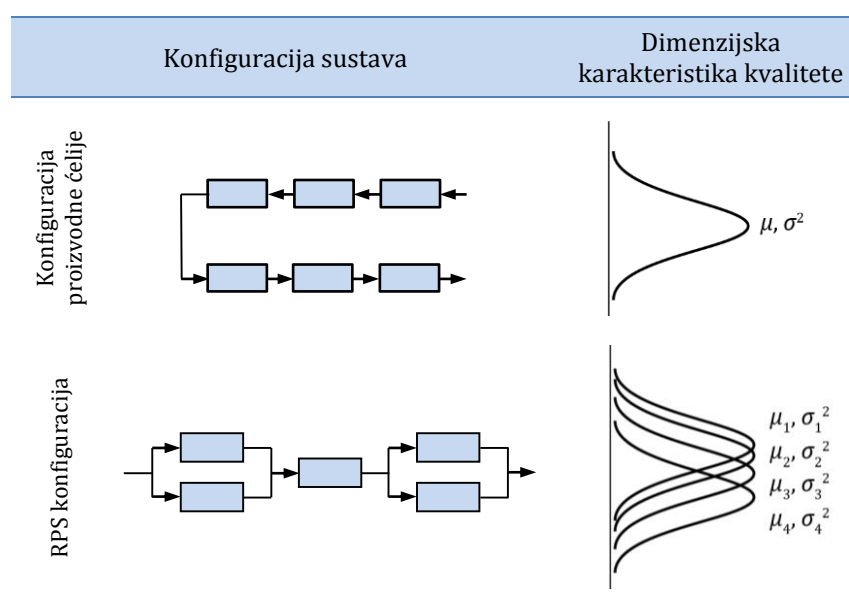
6.5.1 Model distribucije varijabilnosti pojedinih konfiguracija sustava

Primjenom reduciranih modela propagacija varijabilnosti kroz sustav opisanih u naslovu 6.3, moguće je uz zadržavanje svojstva dijagnostibilnosti konstantnim, uvelike pojednostaviti model propagacija varijabilnosti formiranjem modela distribucija varijabilnosti koji opisuje intenzitet varijabilnosti u pojedinim segmentima proizvodnog procesa. Veći broj paralelnih obrada povećava broj pod skupova, a time i različitost skupa gotovih proizvoda što može imati negativan utjecaj na standardnu devijaciju karakteristika kvalitete konačnog skupa proizvoda. Utjecaj broja

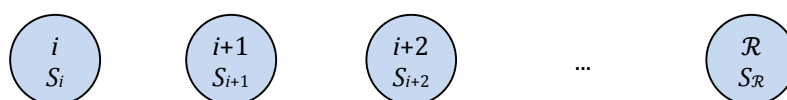
paralelnih putanji obrade ilustriran je u nastavku (Zhong, 2002.), tablica 6.5. Nada et al. (2006.) navode kako i broj serijski povezanih segmenata proizvodnje također utječe na povećanje standardne devijacije karakteristika kvalitete konačnog skupa proizvoda zbog efekta propagacija i nagomilavanja varijabilnosti. Osnovni element modela distribucija varijabilnosti je stanje složenosti varijabilnosti pojedinog segmenta proizvodnog procesa koje se prikazuje:

- brojem naslijeđenih i
- brojem novonastalih varijabilnosti upisanih u krug koji predstavlja pojedini segment proizvodnog procesa.

tablica 6.5 Efekt paralelnih obrada na varijabilnost karakteristika kvalitete (Zhong, 2002.)



Krugovi koji predstavljaju segmente procesa između kojih se nasljeđuju varijabilnosti povezani su strelicom što indicira nasljeđivanje varijabilnosti u modelu poveznica kvalitete. Ukoliko se promatra proizvodni proces s ukupno \mathcal{R} međusobno potpuno neovisnih segmenata proizvodnog procesa, model poveznica kvalitete se uz redukciju modela propagacija varijabilnosti može izraziti na način, slika 6.4.

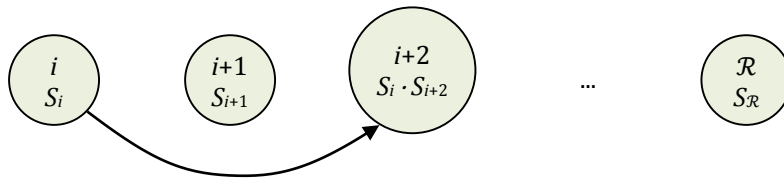


slika 6.4 Jednostavni model distribucije varijabilnosti

Pri tome je S_i broj paralelno povezanih proizvodnih kapaciteta na i -tom segmentu proizvodnog procesa. Na svakom se segmentu proizvodnog procesa formiraju određene karakteristike koje određuju kvalitetu proizvoda. Zadatak kontrolnog podsustava je održavanje povoljne razine

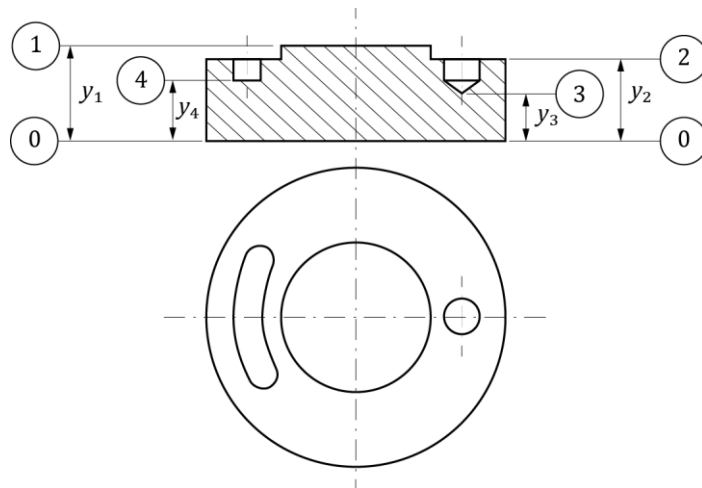
kvalitete proizvoda provjerom tih karakteristika.

No ukoliko su veze među segmentima takve da se utjecaj naslijeđenih komponenti varijabilnosti ne može zanemariti, primjerice ukoliko se na segmentu $i+2$ formiraju određene karakteristike proizvoda i pritom koriste površine formirane u i -tom segmentu kao tehnološke baze, nasljedna komponenta varijabilnosti ne smije biti zanemarena. Takav model distribucije varijabilnosti je tada moguće prikazati u obliku, slika 6.5.



slika 6.5 Model distribucije varijabilnosti s nasljednom komponentom

To znači da je na kontrolnoj stanici postavljenoj nakon segmenta $i+2$ potrebno provjeravati, u svim strategijama kontrole osim u drugoj, ukupno $S_i \cdot S_{i+2}$ putanji prolaza materijala kroz segment $i+2$. Time se broj pojedinačnih uzoraka za statističku analizu nakon segmenta $i+2$ povećava, što uzrokuje povećanu opterećenost kontrolnog podsustava. Kako bi se prikazao model distribucije varijabilnosti na konkretnom primjeru, opisan je redoslijed obrade izratka koji je poznat u literaturi (Wu et al., 2007.), slika 6.6.

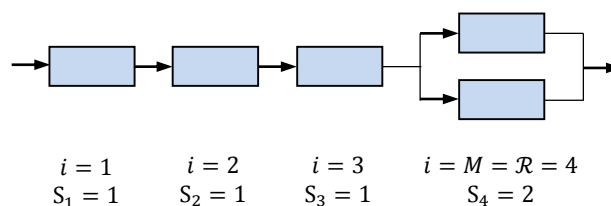


slika 6.6 Izradak (Wu et al., 2007.)

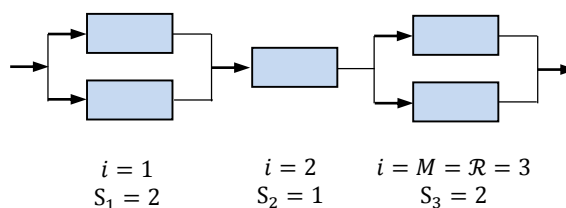
Izradak karakteriziraju četiri važne karakteristike: y_1 , y_2 , y_3 i y_4 . Dimenzije y_1 i y_2 se formiraju koristeći ravninu ① kao tehnološku bazu. Nakon toga se formiraju dimenzije y_3 i y_4 koristeći ravninu ② kao tehnološku bazu. Iz navedenog se može primijetiti kako su karakteristike y_3 i y_4 pod izravnim utjecajem karakteristike y_2 . Ukoliko je za izvođenje postupka obrade dimenzija y_1 ,

y_2 i y_3 potreban po jedan proizvodni kapacitet za svaku karakteristiku, a za karakteristiku y_4 ukupno dva proizvodna kapaciteta, takvu je konfiguraciju moguće prikazati na sljedeći način, slika 6.7.

Pošto se za izvođenje postupka obrade dimenzija y_1 i y_2 koristi identična proizvodna oprema i identične naprave za pozicioniranje (ravnina ①), mogući oblik konfiguracije je i sljedeći, slika 6.8. Usporede li se dvije moguće konfiguracije sustava, može se primijetiti da obje čine isti broj strojeva, ukupno pet. No, usporede li se njihovi modeli distribucije varijabilnosti s nasljednim komponentama uočavaju se razlike, slika 6.9 i slika 6.10.



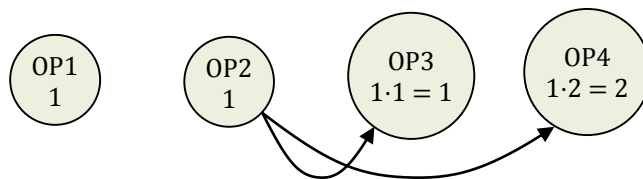
slika 6.7 Prva moguća konfiguracija sustava za proizvodnju izratka (Wu et al., 2007.)



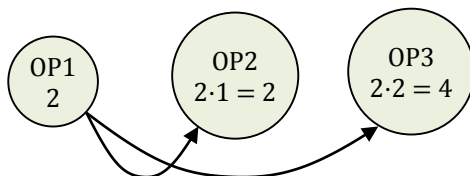
slika 6.8 Druga moguća konfiguracija za proizvodnju izratka

Očito je da u prvoj konfiguraciji postoji samo jedna putanja kretanja izradaka od prve do treće operacije, te dvije putanje na posljednjoj, četvrtoj operaciji. U drugoj konfiguraciji na prvoj operaciji postoje već dvije putanje. Pošto se upravo na toj, prvoj operaciji obrađuje ravnina ② (koju karakterizira dimenzija y_2) na drugoj operaciji sa samo jednim proizvodnim kapacitetom postoje ukupno dvije putanje kretanja izradaka. U posljednjoj, trećoj operaciji ta je nasljednost još izraženija jer kroz svaki od dva paralelna proizvodna kapaciteta prolaze po dvije putanje. Tako ukupno postoje četiri putanje na posljednjoj operaciji druge konfiguracije. Mjeru distribucije varijabilnosti pojedine konfiguracije tako predstavlja suma svih putanji po svim operacijama u procesu. Očito je da zbog većeg broja paralelnih proizvodnih kapaciteta na operaciji u kojoj se definira dimenzija y_2 (druga operacija u prvoj konfiguraciji i prva u drugoj), druga konfiguracija postaje zahtjevnija za kontrolu kvalitete od prve konfiguracije, neovisno o strategiji kontrole

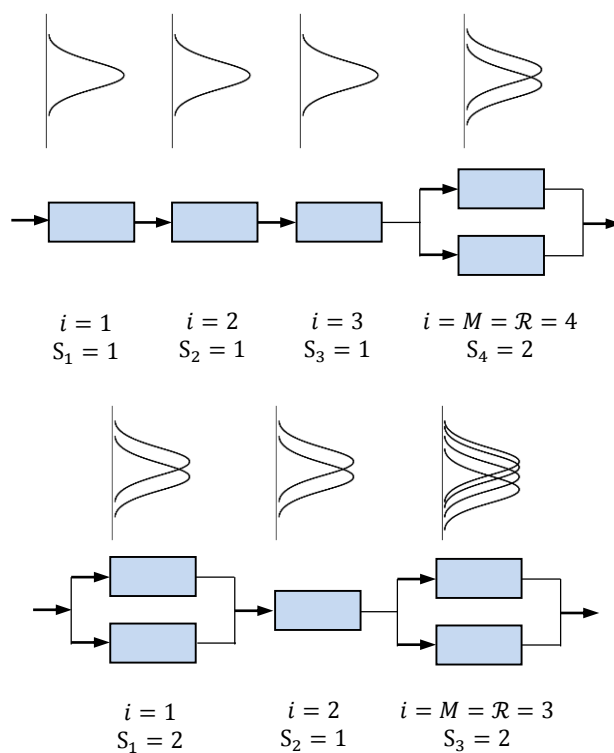
kvalitete. Grafički prikaz efekta paralelnih obrada može se prikazati kao, slika 6.11.



slika 6.9 Model distribucije varijabilnosti prve konfiguracije



slika 6.10 Model distribucije varijabilnosti druge konfiguracije



slika 6.11 Grafički prikaz distribucije varijabilnosti

Kontrola kvalitete prvom strategijom iziskuje najveće napore mjerenja, a zbog većeg broja putanji kontrolni podsustav je 60% više opterećen u drugoj konfiguraciji zbog većeg broja potrebnih kontrolnih karti, 8 umjesto 5. Napori mjerenja su reducirani trećom strategijom kontrole, ali je potreban broj kontrolnih karti i dalje isti, tablica 6.6 i tablica 6.7.

Drugom strategijom kontrole kvalitete, jedinom kod koje nije potrebno praćenje putanji kretanja izradaka, nije pogodno pratiti proces niti otkrivati korijenski uzrok pomaka. Iako je broj kontrolnih karti manji nego u prvoj i trećoj strategiji, napori statističke kontrole dodatno su povećani u drugoj konfiguraciji zbog većeg broja putanji iz kojih se prikupljaju uzorci za pojedini statistički test. Otkrivanje pomaka nastalog u samo jednoj putanji kretanja izradaka zahtjeva korištenje većih veličina uzoraka za statistički test, recipročno broju putanji na promatranom segmentu proizvodnog procesa.

Iako se četvrtom strategijom kontrole kvalitete u obje konfiguracije na posljednjoj operaciji kontroliraju samo dvije putanje, u drugoj je konfiguraciji neophodno poznavati putanju po kojoj je promatrani izradak prošao na prvoj operaciji što zahtjeva dodatni trošak praćenja kretanja izradaka kroz proizvodni sustav. Kako je već navedeno, ovakva strategija nije pogodna za praćenje proizvodnog procesa.

tablica 6.6 Značajke strategija kontrole kvalitete prve konfiguracije

Strategija kontrole	Poznavanje putanje kretanja izradaka	Napor mjerenja	Broj kontrolnih karti	Napor statističke kontrole
1.	Potrebno	Normalan	5	Normalan
2.	Nije potrebno	Normalan	4	Visok
3.	Potrebno	Reduciran	5	Normalan
4.	Potrebno	Reduciran	2	Normalan

tablica 6.7 Značajke strategija kontrole kvalitete druge konfiguracije

Strategija kontrole	Poznavanje putanje kretanja izradaka	Napor mjerenja	Broj kontrolnih karti	Napor statističke kontrole
1.	Potrebno	Normalan	8	Normalan
2.	Nije potrebno	Normalan	3	Vrlo visok
3.	Potrebno	Reduciran	8	Normalan
4.	Potrebno	Reduciran	2	Normalan

Iz navedenog se može zaključiti kako je prva konfiguracija u kojoj je manji broj paralelnih obrada na segmentu procesa čija se varijabilnost nasljeđuje, pogodnija za kontrolu kvalitete za sve strategije kontrole kvalitete. Ovakav zaključak korelira i s činjenicom da smanjenje varijabilnosti u proizvodnim procesima vodi k poboljšanju proizvoda i smanjenju troškova loše kvalitete.

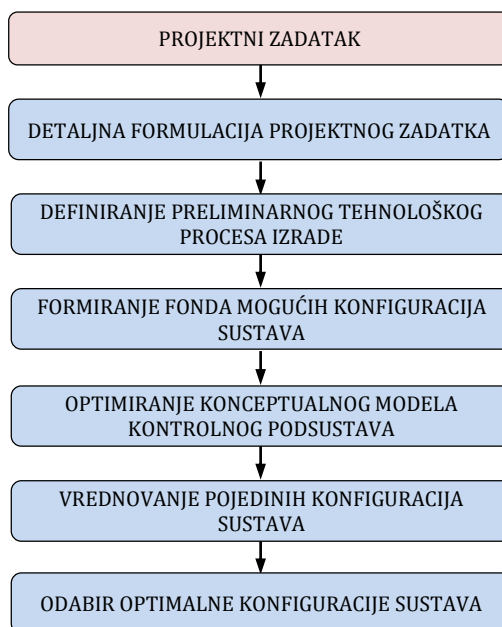
7 PROJEKTIRANJE KONCEPTA PROIZVODNOG SUSTAVA S OPTIMALNIM KONTROLNIM PODSUSTAVOM

Proces projektiranja proizvodnog sustava sistematski je posao s vrlo obuhvatnim i trajnim efektima djelovanja na poslovni sustav koji vrši neposrednu proizvodnju. Procjena utjecaja odluka donesenih pri projektiranju proizvodnog sustava na kvalitetu proizvoda u ranim fazama projektiranja proizvodnog sustava, tj. u njegovoj konceptualnoj fazi, može pomoći u postizanju željene kvalitete proizvoda po nižim troškovima. U ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava, bez daljnje razrade pojedinih operacija u proizvodnom sustavu, planiranja radnog osoblja te izrade plana realizacije, potrebno je izvršiti vrednovanje alternativnih rješenja na osnovi pogodnih kriterija, čiji je fond u ovoj fazi relativno sužen ograničavajućim brojem informacija. Raspoložujući samo podacima iz preliminarnih tehnoloških procesa o asortimanu izradaka i primijenjenoj proizvodnoj opremi kroz njenu cijenu i načelne veličine, onemogućena je procjena svih pokazatelja troškova proizvodnje izraženih kroz cijenu koštanja jednog izratka (Mikac, 1994.). U okviru tehnologije projektiranja rekonfigurabilnih proizvodnih sustava, a uz uvažavanje kvalitete kao jednog od ciljeva projektiranja i značajki pojedinih rješenja, razvijena je nova metoda formiranja koncepta sustava koja obuhvaća:

- oblikovanje optimalnog konceptualnog modela kontrolnog podsustava
- vrednovanje pojedinih konfiguracija sustava i
- odabir optimalne konfiguracije proizvodnog sustava.

Složenost poslova koje je potrebno obaviti u okviru projektnog zadatka podrazumijeva njihovu postupnost i višefaznost odvijanja određenim redoslijedom i načinom kojim se osigurava ostvarivanje ciljeva projektiranja. Sistematika aktivnosti projektiranja rekonfigurabilnog proizvodnog sustava prikazana je u nastavku, slika 7.1. Posebna vrijednost ovakve metode

predstavlja vrlo rano vrednovanje pojedinih konfiguracija sustava s obzirom na opterećenost kontrolnog podsustava te oblikovanje optimalnog kontrolnog podsustava kakav treba biti implementiran da bi se dosegla povoljna sigma razina izvođenja proizvodnog procesa u takvom sustavu.




slika 7.1 Sistematika aktivnosti projektiranja koncepta proizvodnog sustava

7.1 Detaljna formulacija projektnog zadatka

Nakon definiranja značajki proizvodnog programa (konstrukcijskih, tehnoloških, proizvodnih), proizvodne politike (dugoročnost eksploatacije, raspoloživost sredstava) te saznanja o suvremenim tehnologijama (postupci, oprema, alati i sl.) i dosadašnjim praktičnim iskustvima, vrši se korelacija svih tih utjecajnih varijabli uz uvažavanje globalnih, organizacijskih, tehničkih, ekonomskih i kadrovskih ciljeva tvrtke te usmjeravajući utjecaj ograničavajućih rubnih uvjeta projektiranja proizvodnog sustava (Mikac, 1994.). Rezultat korelacije varijabli i vrednovanja ciljeva projektiranja proizvodnog sustava je definicija politike projektiranja koja je iskazana kroz glavne stavove o značajkama koje projektirani proizvodni sustav treba u danim uvjetima poprimiti (razina promjenjivosti, automatizacije, proizvodnosti, kvalitete, upravljivosti, radnih površina, minimalne sigma razine izvođenja procesa itd.). Pri tome je određeni skup prioritarnih značajki (investicijska ulaganja, sposobnost sustava, skalabilnost) kriterij kasnijeg vrednovanja pri odabiru optimalne konfiguracije sustava. U ovoj fazi projektiranja važno je definirati i ograničenja projektiranja kao što su veličina novčanih ulaganja te raspoloživost prostornih ili proizvodnih kapaciteta. Ograničavajući podaci o broju radnih dana na godišnjoj razini, broju

proizvodnih sustava. Ukoliko se promatra kvaliteta kao jedan od ciljeva projektiranja proizvodnog sustava, važan čimbenik odabira proizvodnog procesa je njegova očekivana sposobnost. Sposobnost proizvodnog procesa (naslov 5.3) je izraz koji se odnosi na njegovu uniformnost, a predstavlja omjer raspona konstrukcijskih specifikacija proizvoda i varijabilnosti karakteristika kvalitete proizvoda. Za svaku varijantu alternativnog rješenja tehnološkog procesa realno je očekivati razlike u sposobnosti procesa. Razlog tome je što različiti modeli proizvodne opreme te različita tehnološka rješenja mogu rezultirati različitom varijabilnošću karakteristika koje predstavljaju kvalitetu proizvoda (dimenzije, oblik, sastav, svojstva, funkcionalnost i sl.). Preliminarni planovi obrade zato, osim osnovnih podataka o tehnološkom procesu, mogu sadržavati i niz ostalih podataka kojima se može predvidjeti sposobnost da će se cjelokupni proces odvijati bez pojave pogreške ili potrebe za ponavljanjem procesa, slika 7.2.

 SVEUČILIŠTE U RIJECI TEHNIČKI FAKULTET	Naziv izratka: <input type="text"/>	Skica izratka: <div style="border: 1px dashed black; width: 150px; height: 80px;"></div>
	Oznaka izratka: <input type="text"/>	
PRELIMINARNI POPIS OPERACIJA	Dnevne količine: <input type="text"/>	Oznaka materijala: <input type="text"/>

KONSTRUKCIJSKO PREDGRUPIRANJE IZRADAKA					
Grupa mat.:	<input type="text"/>	Ocjena varijabilnosti proizvodnog programa:	<input type="text"/>		
Grupa dimenzija:	<input type="text"/>	Ocjena značajki tehn. procesa i opreme:	<input type="text"/>		
Ocjena količina:	<input type="text"/>				

RAZRADA PRELIMINARNOG PLANA OBRADJE					
Operacija: Diferencijacija:	Naziv diferencijacije operacije:	Paralal. procesa:	Vrijeme (min)	Očekivana sigma razina:	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Oznaka opreme:	Vrsta :	Vrijedn. :	Amortiz. vrijeme (god.):	P.-Y.:	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
...					
Operacija: Diferencijacija:	Naziv diferencijacije operacije:	Paralal. procesa:	Vrijeme (min)	Očekivana sigma razina:	<input type="text"/>
<input type="text"/>	Izrada navojnih rupa	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Oznaka opreme:	Vrsta :	Vrijedn. :	Amortiz. vrijeme (god.):	P.-Y.:	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Operacija: Diferencijacija:	Naziv diferencijacije operacije:	Paralal. procesa:	Vrijeme (min)	Očekivana sigma razina:	<input type="text"/>
<input type="text"/>	Pranje	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Oznaka opreme:	Vrsta :	Vrijedn. :	Amortiz. vrijeme (god.):	P.-Y.:	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

REZULTATI RAZRADE PRELIMINARNOG PLANA OBRADJE	
Ukupni broj stezanja:	<input type="text"/>
Razina implementacije Jidoka (0-1):	<input type="text"/>
Razina implement. elem. za spriječavanje pogrešaka (0-1):	<input type="text"/>

Datum:	<input type="text"/>	Izradio:	<input type="text"/>	Odobrio:	<input type="text"/>
--------	----------------------	----------	----------------------	----------	----------------------

slika 7.2 Preliminarni popis operacija

Ispunjavanje obrasca Preliminarni popis operacija podrazumijeva njegovu povezanost s bazom podataka proizvodne opreme kako bi se iz nje automatski prikupljali podaci o opremi, njenoj vrsti, vrijednosti i vremenu amortizacije čime se onemogućuje pogrešan unos podataka i ubrzava proces kreiranja obrasca.

Kako bi se procijenila očekivana ukupna sposobnost procesa u ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava, ključno je da proizvodna organizacija održava bazu podataka o sposobnostima svojih postojećih i prošlih procesa. Takva baza podataka treba sadržavati arhivirane povijesne podatke o sigma razinama procesa (naslov 5.3.4) na osnovu kojih je u ranoj fazi projektiranja moguće vrednovati alternativna rješenja proizvodnih procesa s obzirom na očekivanu kvalitetu proizvoda, slika 7.3. Primjenom datoteka podatka o proizvodnoj opremi, asortimanu izradaka i preliminarnim tehnološkim procesima kao sintezi njihovih korelacija, moguće je formirati matricu koja opisuje očekivanu sigma razinu izvođenja procesa. Za svaku se diferencijaciju operacije tako iz baze podataka može očitati očekivana sigma razina njenog izvođenja, pa se ukupna sigma razina sustava može prikazati putem matrice veza

$$R_{\sigma,rij} = \begin{matrix} & & 1 & \dots & j & \dots & N \\ \begin{matrix} 1_{(1)} \\ 1_{(2)} \\ \vdots \\ i_{(1)} \\ i_{(2)} \\ \vdots \\ M \end{matrix} & \left[\begin{matrix} R_{\sigma,1(1)1} & R_{\sigma,1(1)j} & R_{\sigma,1(1)N} \\ R_{\sigma,1(2)1} & R_{\sigma,1(2)j} & R_{\sigma,1(2)N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{\sigma,i(1)1} & R_{\sigma,i(1)j} & R_{\sigma,i(1)N} \\ R_{\sigma,i(2)1} & R_{\sigma,i(2)j} & R_{\sigma,i(2)N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{\sigma,M1} & R_{\sigma,Mj} & R_{\sigma,MN} \end{matrix} \right] \end{matrix} \quad (7.2)$$

pri čemu je $R_{\sigma,i(1)j}$ sigma razina izvođenja prve diferencijacije (1) r -te operacije koja se izvodi na i -toj opremi pri obradi j -tog proizvoda (vrijednost postoji kada je $r \neq 0$). Vrijednosti $R_{\sigma,i(0)j}$ unose se u obrazac preliminarnog popisa operacija u rubriku "Očekivana sigma razina". Kako doprinos procesa predstavlja vjerojatnost da će se proces odviti bez pogrešaka i bez potrebe za njegovim ponavljanjem, a ovisne su o sigma razinama procesa R_{σ} , moguće je formirati matricu veza koja prikazuje doprinose pojedinih diferencijacija operacija (naslov 5.3.5) u tehnološkom procesu

$$D_{rij} = \begin{matrix} & & 1 & \dots & j & \dots & N \\ \begin{matrix} 1_{(1)} \\ 1_{(2)} \\ \vdots \\ i_{(1)} \\ i_{(2)} \\ \vdots \\ M \end{matrix} & \left[\begin{matrix} D_{r1(1)1} & D_{r1(1)j} & D_{r1(1)N} \\ D_{r1(2)1} & D_{r1(2)j} & D_{r1(2)N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{ri(1)1} & D_{ri(1)j} & D_{ri(1)N} \\ D_{ri(2)1} & D_{ri(2)j} & D_{ri(2)N} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ D_{rM1} & D_{rMj} & D_{rMN} \end{matrix} \right] \end{matrix} \quad (7.3)$$

Ukoliko se r -ta operacija promatra kao skup diferencijacija operacija onda je njen doprinos jednak

$$D_r = \prod_{d=1}^{d_{\max,r}} D_{r_d} \quad (7.4)$$

pri čemu je:

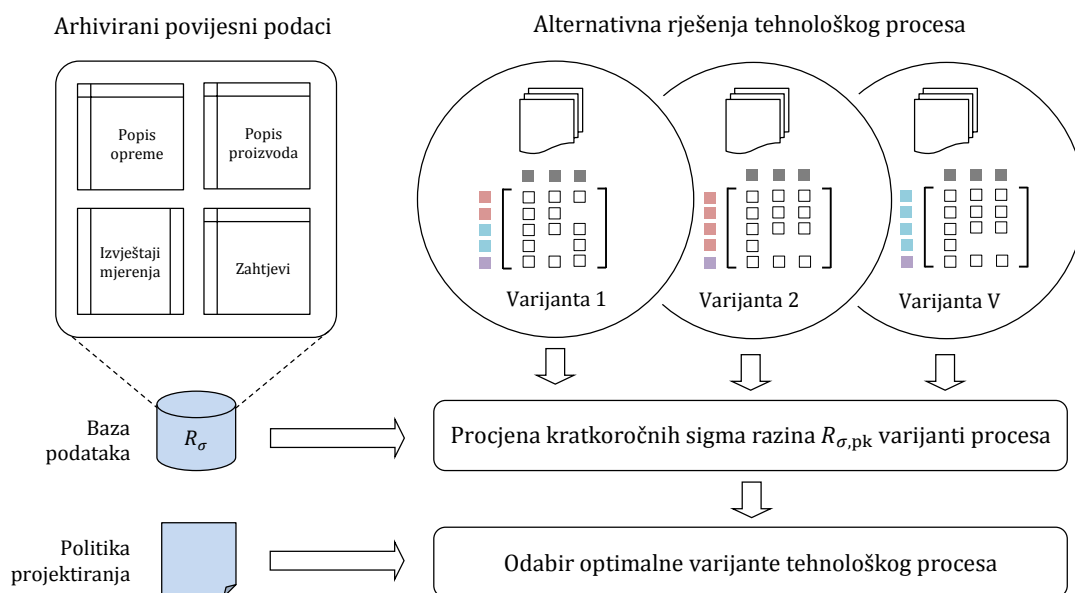
- D_{r_d} doprinos d -te diferencijacije r -te operacije,
- $d_{\max,r}$ ukupan broj diferencijacija u r -toj operaciji.

Ukupni doprinos D_{uk} (eng. *Rolled Throughput Yield, RTY*) tada predstavlja vjerojatnost da će pojedini izradak proći cijelim proizvodnim procesom bez pogreški i potrebe za popravkom. Vrijednost ukupnog doprinosa procesa D_{uk} kojeg je moguće izračunati prema jednadžbi

$$D_{\text{uk}} = \prod_{r=1}^{\mathcal{R}} D_r, \quad (7.5)$$

pri čemu je \mathcal{R} ukupan broj operacija tehnološkog procesa za izradu određenog izratka, tako predstavlja vrijednost ovisnu o sigma razinama svih segmenata proizvodnog procesa. Pod pretpostavkom da su promatrane karakteristike normalno distribuirane, moguće je iz izraza D_{uk} odrediti očekivanu dugoročnu sigma razinu procesa putem jednadžbe

$$R_{\sigma,\text{pd}} = \Phi^{-1}(D_{\text{uk}}). \quad (7.6)$$



slika 7.3 Vrednovanje alternativnih rješenja koncepta tehnološkog procesa prema njihovoj procijenjenoj sigma razini

Tennant (2000.) navodi kako je potrebno, kako bi se izračunala kratkoročna sigma razina cijelog procesa $R_{\sigma,\text{pk}}$, takvoj dugoročnoj sigma razini procesa pribrojiti vrijednost 1,5 putem jednadžbe

$$R_{\sigma, pk} = \Phi^{-1}(D_{uk}) + 1,5. \quad (7.7)$$

Vrijednost ukupne sposobnosti konačno odabranog procesa može biti jedan od pokazatelja potrebnih napora za kontrolom takvog procesa. Proces s većom ukupnom sposobnošću procesa će zahtijevati manje napora aktivnosti kontrole kvalitete od procesa s manjom sposobnošću.

7.3 Formiranje fonda mogućih konfiguracija proizvodnog sustava

Odabrana optimalna varijanta tehnološkog procesa koja se može prikazati putem jednadžbe (7.1) tj. matricom veza opreme i izradaka koja pokazuje vremensko opterećenje i -te proizvodne opreme pri izvođenju r -te diferencijacije operacije obrade j -tog izratka. Ukoliko se takva matrica pomnoži s (jednorednom) matricom koja predstavlja potrebnu dnevnu količinu izradaka koje je potrebno proizvesti, te podijeli s (jedno stupčanom) matricom dnevne vremenske raspoloživosti proizvodnih kapaciteta slijedi izraz za matricu veza koja prikazuje potrebnu količinu proizvodne opreme u sustavu (prema jednadžbi 4.20)

$$M_{S,rij} = \frac{[M_{t,rij}] \cdot [q_{j,dn}]}{[K_{i,dn}]} = \begin{matrix} 1_{(1)} \\ 1_{(2)} \\ \vdots \\ i_{(1)} \\ i_{(2)} \\ \vdots \\ M \end{matrix} \begin{matrix} 1 & \dots & j & \dots & N \\ \left[\begin{array}{ccccc} S_{r1(1)1} & & S_{r1(1)j} & & S_{r1(1)N} \\ S_{r1(2)1} & & S_{r1(2)j} & & S_{r1(2)N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{ri(1)1} & & S_{ri(1)j} & & S_{ri(1)N} \\ S_{ri(2)1} & & S_{ri(2)j} & & S_{ri(2)N} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ S_{rM1} & & S_{rMj} & & S_{rMN} \end{array} \right] \end{matrix} = \begin{matrix} \left[\begin{array}{c} S_{r1(1)} \\ S_{r1(2)} \\ \vdots \\ S_{ri(1)} \\ S_{ri(2)} \\ \vdots \\ S_{rM} \end{array} \right] \end{matrix} \quad (7.8)$$

pri čemu je:

$S_{ri(1)j}$ potrebna količina (broj) proizvodne opreme za izvođenje prve (1) diferencijacije r -te operacije obrade j -tog izratka na i -toj proizvodnoj opremi,

$S_{ri(1)}$ potrebna količina (broj) proizvodne opreme za izvođenje prve (1) diferencijacije r -te operacije obrade svih izradaka iz obitelji proizvoda na i -toj proizvodnoj opremi.

Matrica potrebne količine opreme prikazana u (na diferencijacije operacija) raščlanjenom obliku omogućava modularnost povezivanja diferencijacija operacija u jednu ili više operacija. Spajanje diferencijacija u samo jednu operaciju često iziskuje veći broj paralelno povezanih kapaciteta pa se gore navedena matrica prema (4.21) može prikazati kao

$$M_{S,rij,int} = \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ M \end{matrix} \begin{matrix} S_{i,int} \\ \left[\begin{array}{c} S_{1,int} \\ \vdots \\ S_{i,int} \\ \vdots \\ S_{M,int} \end{array} \right] \end{matrix} \quad (7.9)$$

iz čega je moguće putem Pascalovog trokuta očitati mogući broj konfiguracija svakog segmenta proizvodnog procesa, prema (4.22)

$$\mathcal{K}_{\text{sus}} = \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ i \\ \vdots \\ M \end{matrix} \begin{bmatrix} \mathcal{K}_1 \\ \vdots \\ \mathcal{K}_i \\ \vdots \\ \mathcal{K}_M \end{bmatrix}. \quad (7.10)$$

No, ograničavajući uvjet pri oblikovanju sustava u navedeni broj konfiguracija predstavlja takt sustava koji mora biti zadovoljen u svakoj operaciji tj.

$$T_{\text{op},jr} \leq T_{\text{sus},j} \quad (7.11)$$

pri čemu je

$T_{\text{op},jr}$ takt r -te operacije obrade j -tog izratka,

$T_{\text{sus},j}$ takt sustava za proizvodnju j -tog izratka.

Takt operacije predstavlja srednje vrijeme u kojem jedan segment proizvodnog procesa u kojem se izvodi r -ta operacija proizvede jedan izradak

$$T_{\text{op},jr} = \frac{t_{jr}}{S_{jr}} \quad (7.12)$$

pri čemu je:

t_{jr} vrijeme trajanja r -te operacije pri obradi j -tog izratka,

S_r broj paralelno povezanih proizvodnih kapaciteta na r -toj operaciji pri obradi j -tog izratka.

Vrijeme takta (eng. *takt time*, njem. *Takzeit*) sustava predstavlja nametnuti, potrebni tempo proizvodnje izradaka koji proizvodni sustavi moraju doseći kako bi se vrijeme ciklusa proizvodnje izratka prilagodilo tempu potrebne isporuke proizvoda tj. zahtjevima tržišta. Takt sustava za j -ti proizvod može se prikazati izrazom

$$T_{\text{sus},j} = \frac{K_{i,\text{dn},\text{sus}}}{q_{j,\text{dn}}} \quad (7.13)$$

pri čemu je:

$K_{i,\text{dn},\text{sus}}$ raspoloživ dnevni kapacitet proizvodne opreme sustava,

$q_{j,\text{dn}}$ potrebna dnevna količina j -tog proizvoda.

Takt više-predmetnog proizvodnog sustava može se prikazati u matričnom obliku

$$T_{\text{sus}} = \frac{K_{i,\text{dn},\text{sus}}}{[q_{j,\text{dn}}]} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & j & \dots & N \\ T_{\text{sus},1} & & T_{\text{sus},j} & & T_{\text{sus},N} \end{bmatrix}. \quad (7.14)$$

Prikladan matični prikaz uvjeta zadovoljenja takta linije (7.11) glasi

$$\begin{matrix} & 1 & \dots & j & \dots & N \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ r \\ \vdots \\ \mathcal{R} \end{matrix} & \begin{bmatrix} T_{op,11} & & T_{op,j1} & & T_{op,N1} \\ & & & & \\ T_{op,1r} & & T_{op,jr} & & T_{op,Nr} \\ & & & & \\ T_{op,1\mathcal{R}} & & T_{op,j\mathcal{R}} & & T_{op,N\mathcal{R}} \end{bmatrix} & \leq & \begin{bmatrix} 1 & \dots & j & \dots & N \\ T_{sus,1} & & T_{sus,j} & & T_{sus,N} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (7.15)$$

7.4 Optimiranje konceptualnog modela kontrolnog podsustava

Ukoliko se kao jedan od ciljeva projektiranja proizvodnog sustava promatra i kvaliteta, potrebno je definirati značajke kojima je moguće komparativno vrednovanje svih mogućih konfiguracija proizvodnog sustava, a koje predstavljaju razinu kvalitete i potrebnih napora za održavanjem povoljne razine kvalitete. Kako se opterećenje kontrolnog podsustava očituje kroz parametre definirane planovima kontrole, optimiranje kontrolnog podsustava svodi se na optimiranje parametara plana kontrole: učestalosti uzorkovanja i potrebne veličine uzoraka. Kako bi se postavio pristup određivanja parametara optimalnog kontrolnog podsustava, u ovom se radu pretpostavlja:

- da proizvodna organizacija prati i arhivira povijesne podatke o pojavi specijalnih uzroka pomaka varijabli svojih procesa i bilježi učestalost njihove pojave u cilju boljeg predviđanja njihovog ponavljanja i efekata koje izazivaju (FMEA)
- da proizvodna organizacija prati i arhivira povijesne podatke o sigma razinama R_σ odvijanja svojih procesa u cilju predviđanja sposobnosti novo-projektiranih procesa.
- da se ukupna statistička pogreška provjere kontrolnog podsustava odnosi na pogreške koje su karakteristične za statističke testove koji se provode \bar{x} kontrolnim kartama.

Istraživanje koje su proveli Nada et al. (2006.) prikazuje postupak određivanja indeksa sposobnosti konfiguracije (ISK) sustava i predstavlja okvir za ovdje predloženu metodu pronalaženja optimalnog rješenja koncepta kontrolnog podsustava.

Postupak određivanja indeksa sposobnosti konfiguracije zasnovan je na sustavu neizrazite logike. Pristup neizrazitom logikom omogućuje projektantu donošenja konačnih odluka i zaključaka iz nepotpunih i ne sasvim preciznih podataka. Neizrazita logika vrlo slični ljudskom donošenju odluka omogućavajući korisniku da aproksimativnim podacima donosi precizne zaključke. Za razliku od klasične logike koja zahtjeva duboka razumijevanja odnosa veličina i modeliranja jednadžbi, sustav neizrazite logike koristi modeliranja odnosa između varijabli koristeći veću razinu apstrakcije. Sustav neizrazite logike uključuje kreiranje ulaznih i izlaznih neizrazitih varijabli te modeliranje njihovih međusobnih odnosa. Iz navedenih je razloga ovakav koncept koji koristi

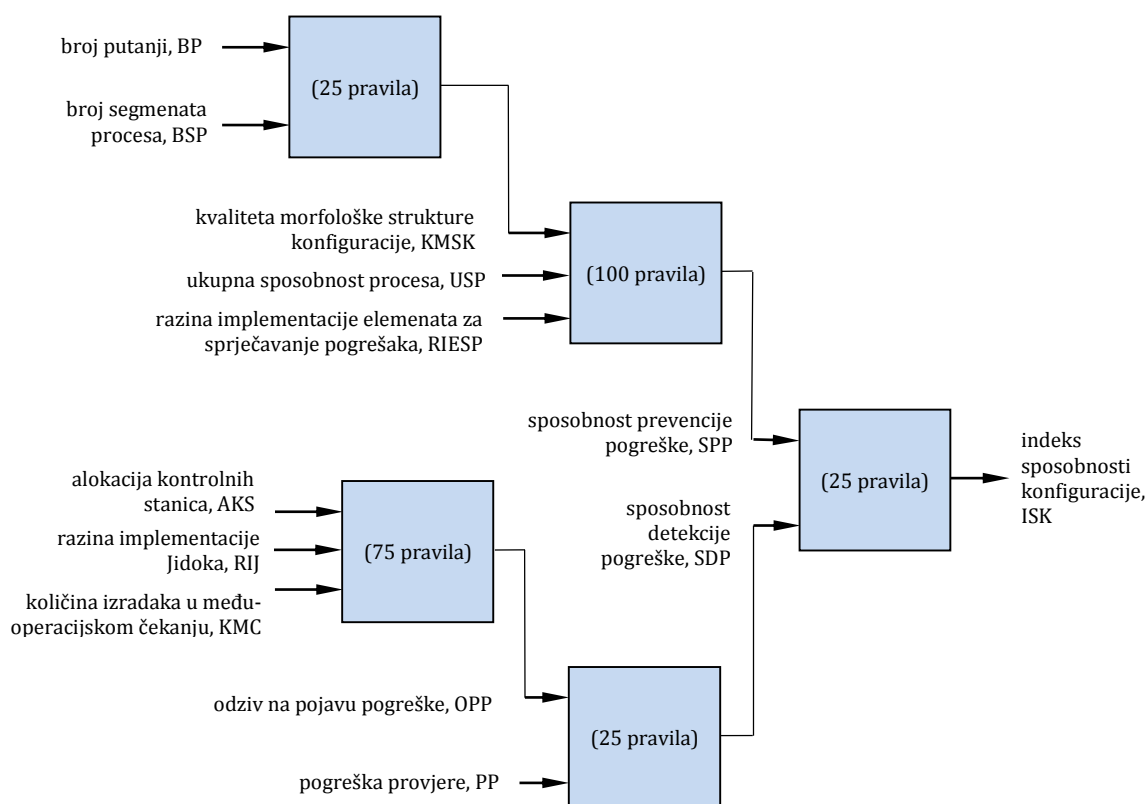
neizrazitu logiku iznimno pogodan za primjenu u ranoj fazi projektiranja proizvodnog sustava i kontrolnog podsustava gdje su uglavnom poznati samo konceptualni, aproksimativni podaci o sustavu. Rasponi vrijednosti varijabli i razine pripadnosti varijabli prikazane su u prilogu A dok su pravila sustava neizrazite logike sadržani u prilogu B ovog rada.

7.4.1 Potrebna alokacija kontrolnih stanica i dozvoljena pogreška provjere

Sustav neizrazite logike za izračun indeksa sposobnosti konfiguracije koristi ukupno osam ulaznih varijabli koje karakteriziraju pojedini koncept proizvodnog sustava, slika 7.4.

7.4.1.1 Sposobnost prevencije pogreške

Vrijednost sposobnosti prevencije pogreške (SPP) predstavlja varijablu čija se vrijednost kreće u rasponu 0-1 pri čemu 1 predstavlja najveću sposobnost konfiguracije da prevenira nastanak pogreške. Sposobnost prevencije pogreške sustava odnosi se na njegovu sposobnost da proizvodi izratke koji su sukladni sa zahtjevima kvalitete i koji imaju minimalne devijacije od nominalnih vrijednosti karakteristika kakve su propisane konstrukcijskim nacrtom izratka. Ulazne varijable za izračun varijable SPP predstavljaju kvaliteta morfološke strukture konfiguracije (KMSK), ukupna sposobnost procesa (USP) i razina implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka (RIESP).



slika 7.4 Sustav neizrazite logike za izračun vrijednosti ISK (Nada et al., 2006.)

Prva ulazna varijabla sustava za izračun SPP je kvaliteta morfološke strukture konfiguracije koja predstavlja aproksimativnu razinu složenosti strukture konfiguracije sustava (KMSK) koja u slučajevima velikog broja segmenata proizvodnog procesa i velikog broja paralelnih obrada može naštetiti sposobnosti prevencije pogreške. Kako je navedeno u poglavlju 6, istraživanja koje se bave analizom strujanja varijabilnosti (eng. *Stream Of Variation Analysis, SOVA*) karakteristika su vrlo specifična za sustav koji je predmet istraživanja te zahtijevaju detaljnu studiju i definiranje parametara proizvodnog procesa i kao takva nisu potpuno primjenjiva u ranoj fazi projektiranja kada takvi detaljni podaci o procesu nisu dostupni. Iako se utjecaj konfiguracije sustava na kvalitetu ne može izravno predvidjeti u svim slučajevima, moguće je zaključiti se da se mogu prepoznati neki opći trendovi koji mogu pomoći pri projektiranju proizvodnog sustava koje za cilj uz proizvodnost ima i kvalitetu. Istraživanja koja se bave utjecajem oblika konfiguracije sustava na kvalitetu (Zhong, 2002., Webbink i Hu, 2005., Nada et al., 2006.) navode dva parametra konfiguracije koji utječu na razinu konačne kvalitete proizvoda:

- broj paralelnih putanja (BP) \mathcal{P}_{\max} kojima obratci mogu prolaziti od prvog do zadnjeg segmenta proizvodnog procesa
- broj serijski povezanih segmenta procesa (BSP) \mathcal{R} .

Morfološka struktura konfiguracije proizvodnog sustava, odnosno, broj paralelnih putanja \mathcal{P}_{\max} i broj serijski povezanih segmenata proizvodnog procesa \mathcal{R} očitanih iz hodograma kretanja izradaka kroz sustav mogu povećati varijabilnost karakteristika kvalitete konačnog proizvoda. To znači da se povećanjem tih dvaju parametara smanjuje sposobnost prevencije pogreške konfiguracije. Tako definirana varijabla KMSK je podatak kojim se posebno može vrednovati svaka od mogućih konfiguracija sustava. Webbink i Hu (2005.) su objavili kako je razinu varijabilnosti koja se pojavljuje u proizvodnom sustavu nemoguće predvidjeti samo i isključivo kao funkciju konfiguracije sustava, iz razloga što i drugi čimbenici direktno utječu na nju. Smanjenu sposobnost prevencije pogreške uzrokovanu nepovoljnom morfološkom strukturom moguće je smanjiti (Nada et al, 2006.):

- većom razinom implementacije proizvodne opreme koja može osigurati visoku sigma razinu izvođenja proizvodnog procesa ili
- većom razinom implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka u sustavu.

Pri kreiranju varijable sustava neizrazite logike koja predstavlja ukupnu sposobnost procesa USP, promatra se relativan omjer očekivane kratkoročne sigma razine cijelog procesa na osnovi povijesnih podataka dobivenih praćenjem procesa koji su se odvijali ili se još odvijaju u proizvodnoj organizaciji i cilja projektiranja proizvodnog sustava – dostizanja 6-sigma razine tog istog procesa. Takva ulazna varijabla može poprimiti vrijednost u rasponu 0-1 prema

$$USP = \frac{R_{\sigma, pk}}{6}. \quad (7.16)$$

Sprječavanje pogreške (eng. *mistake proofing*, jap. *poka-yoka*) predstavlja koncept koji je formaliziran i adaptiran u sklopu Toyotinog proizvodnog sustava (TPS). Poka-yoke predstavlja bilo koji mehanizam u procesu proizvodnje koji pomaže spriječiti nastanak dodijeljivog uzroka i pojavu pogreške. Svrha takvih elemenata je eliminiranje defektivnih proizvoda kroz prevenciju i ispravljanje pogrešaka te na ukazivanje na pogreške u bilo kojem dijelu proizvodnog procesa ili sustava u kojem do pogreške može doći. U proizvodnom sustavu s implementiranim poka-yoka elementima, rizik ponavljanja iste pogreške sveden je na nulu. Takva vrsta preventivnog elementa utječe i na ekonomske pokazatelje proizvodnog sustava. Kada su troškovi implementacije poka-yoke elemenata manji od troškova loše kvalitete (popravci, zastoje proizvodne linije, reklamacije kupca i sl.) povrat uloženi sredstava proizvodnog sustava s implementiranim poka-yoka elementima će biti brži nego kod proizvodnog sustava bez implementiranih poka-yoke elemenata (Tsou i Chen, 2008.).

Neizrazita varijabla koja predstavlja razinu implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka (RIESP) predstavlja odnos broja diferencijacija u proizvodnom procesu proizvodnje j -tog izratka za koje postoje elementi koji sprječavaju nastanak pogreške $d_{py,j}$ i ukupnog broja diferencijacija u proizvodnom procesu u kojima može nastati pogreška d_{uk} tj.

$$RIESP = \frac{d_{py,j}}{d_{uk,j}}. \quad (7.17)$$

Rasponi vrijednosti varijabli te njihovi stupnjevi ocjena (broj kategorija) prikazani su u nastavku, tablica 7.1.

tablica 7.1 Varijable sustava neizrazite logike za određivanje sposobnosti prevencije pogreške

Naziv varijable	Raspon	Broj kategorija
Broj putanji (BP)	0-20	5
Broj segmenata procesa (BSP)	0-20	5
Kvaliteta morfološke strukture konfiguracije (KMSK)	0-1	5
Ukupna sposobnost procesa (USP)	0-1	4
Razina implementacije elemenata za sprječavanje pogreški (RIESP)	0-1	5
Sposobnost prevencije pogreške (SPP)	0-1	5

7.4.1.2 Sposobnost detekcije pogreške

Sposobnost detekcije pogreške predstavlja izlaznu varijablu sustava neizrazite logike koja je ovisna o dvije ulazne neizrazite varijable: odzivu sustava na pojavu pogreške (OPP) i pogrešci

provjera (PP). Jedna od važnih odluka pri projektiranju kontrolnog podsustava je odluka o broju i alokaciji kontrolnih stanica kontrolnog podsustava u proizvodnom sustavu. Takva odluka može imati velikog utjecaja na činjenicu koliko brzo će biti moguće detektirati pogrešku koja se u sustavu pojavi. Rano detektiranje pomaka varijable sustava može pomoći sprječavanju njene daljnje propagacije kroz proizvodni proces. Kod alokacije kontrolnih stanica (AKS) razlikuju se dva krajnja slučaja: postojanje kontrolne stanice na svakom segmentu proizvodnog procesa čime se kvaliteta kontrolira čim bliže izvoru ili potencijalnom mjestu nastanka problema kvalitete i postojanje samo jedne kontrolne stanice na kraju proizvodnog procesa. Neizrazita varijabla AKS tako može poprimiti vrijednost 0 kad je alokacija vrlo intenzivna u procesu, odnosno kada nakon svakog segmenta proizvodnog procesa postoji kontrolna stanica. Druga krajnost je postojanje samo jedne kontrolne stanice na kraju proizvodnog procesa te tada neizrazita varijabla AKS poprima vrijednost 1, tablica 7.2.

Jidoka u kontekstu proizvodnog sustava znači nedozvoljavanje da obratci koji nisu sukladni sa zahtjevima kvalitete prijeđu na sljedeći segment proizvodnog procesa. Implementacija Jidoke ima značajan utjecaj na gotovo trenutnu detekciju pogreške nakon što se pogreška dogodi (Mayne et al., 2001.). Prijevod izraza Jidoka – autonomizacija znači da proizvodna oprema ima takvu, gotovo ljudsku sposobnost osjeta kad nešto u procesu ne ide onako kako je planirano. Ukoliko oprema koja je implementirana u sustav ima takve značajke, sustav u cjelini ima veću sposobnost detekcije pogreške. Vrijednost neizrazite varijable RIJ koja predstavlja razinu implementacije Jidoka može poprimiti vrijednost od 0, kada je 0% segmenata proizvodnog procesa opremljeno uređajima i napravama za automatsku detekciju pogreške, do 1 kada su svi segmenti proizvodnog procesa opremljeni takvom opremom.

tablica 7.2 Varijable sustava neizrazite logike za određivanje sposobnosti detekcije pogreške

Naziv varijable	Raspon	Broj kategorija
Alokacija kontrolnih stanica (AKS)	0-1	3
Razina implementacije Jidoka (RIJ)	0-1	5
Količina izradaka u među-operacijskom čekanju (KMC)	0-50	5
Pogreška provjere (PP)	0-6	5
Sposobnost detekcije pogreške (SDP)	0-1	5

Kako je poznato iz promatranja Vitke proizvodnje, velika količina nedovršenih izradaka u proizvodnom procesu uzrokuje organizacijske i tehničke poteškoće u proizvodnom sustavu. Kada se promatra odziv sustava na pojavu pogreške, ukoliko se u sustavu detektira pogreška na izratku koji je dugo vremena proveo u među-operacijskom čekanju, vrijeme od nastanka do otkrivanja

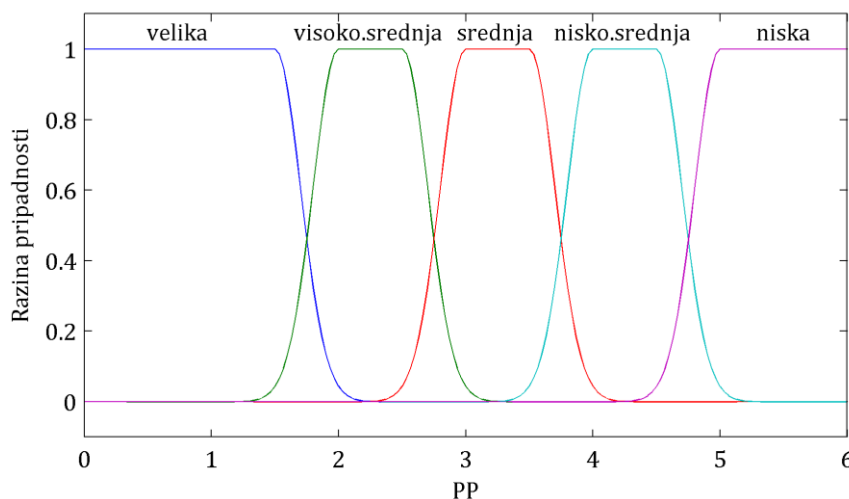
pogreške može biti dugo, što ima višestruko štetan utjecaj na proizvodnju. Svi izratci proizvedeni u tom periodu potencijalno su problematične kvalitete i potrebno ih je dodatno provjeriti. Kim i Gershwin (2005.) su istražili negativan utjecaj veličine među-operacijskog skladišta i ukupnog doprinosa sustava kojeg je uzrok spora detekcija pogreške.

7.4.2 Varijabla statističke pogreške provjere

Neizrazita varijabla pogreške provjere (PP) odnosi se na srednju vjerojatnost pogrešnog zaključivanja o statusu procesa (proces je pod kontrolom kada to nije ili proces nije pod kontrolom kada to je). Srednja vrijednost pogreške bilo kakvog postupka provjere jednak je (Nada et al., 2006.)

$$PP = -\log\left(\frac{\sum_{i=1}^z p(E)_i}{z}\right) \quad (7.18)$$

pri čemu je $p(E)_i$ opća, pojedinačna vjerojatnost krivog zaključivanja mjernog instrumenta o stanju procesa pri izvođenju i -tog mjerenja od ukupno z mjerenja. Neizrazita varijabla pogreške provjere PP, slika 7.5, predstavlja subjektivnu procjenu projektanta o veličini pogreške određene mjerne opreme pri izvođenju mjerenja čiju vrijednost prema prijedlogu autora treba tražiti u povijesnim podacima. Ipak, s obzirom da je u praksi teško evidentirati sva pojedinačna mjerenja u kojima je mjerni instrument zakazao registrirati ispravno stanje karakteristike proizvoda ili procesa, ovakve subjektivne procjene mogu biti nepouzdana.



slika 7.5 Funkcije pripadnosti varijable „pogreška provjere“, PP (Nada et al., 2006.)

Ovako definirana varijabla pogreške provjere je prilagođena 100%-tnoj kontroli karakteristika izradaka i nikako ne uključuje statističku pogrešku koja se javlja pri statističkoj kontroli. Kako bi se vrijednost varijable pogreške provjere odnosila na stvarnu statističku vrijednost pogreške statističkog zaključivanja, a time i omogućilo optimiranje konceptualnog modela kontrolnog

pod sustava, u ovom se radu predlaže nova varijabla vrijednosti statističke pogreške provjere (STPP) \bar{x} kontrolnih karti koja u sustavu neizrazite logike za izračun vrijednost indeksa sposobnosti konfiguracije sustava mijenja varijablu pogreške provjere.

Ukoliko se ne promatra jedino pogreška mjernog instrumenta, već i statistička kontrola procesa te pogreška statističkog zaključivanja, jasno je da je neizrazita varijabla pogreške provjere uvelike pod utjecajem odluka donesenih pri projektiranju kontrolnog podsustava tj. definiraju veličina uzoraka te učestalosti uzorkovanja za potrebe izvođenja statističkog testa. Kako je opisano u naslovu 5.2.4, pojava pogrešnog signala \bar{x} kontrolnih karti da je proces pod kontrolom kada to nije, odnosno da nije pod kontrolom kada to je, uvelike ovisi o parametrima \bar{x} kontrolnih karti koji se definiraju pri projektiranju kontrolnog podsustava. Pri tome velik utjecaj ima željena veličina pomaka varijable procesa koju je potrebno pri tome detektirati, iz razloga što je pogreška prve vrste (signal kontrolnog podsustava da proces nije pod kontrolom - kada je zapravo pod kontrolom) generalno manja od pogreške druge vrste (signal kontrolnog podsustava da je proces pod kontrolom - kada zapravo nije pod kontrolom).

U periodu kada je sustav pod kontrolom, vjerojatnost pogreške \bar{x} kontrolne karte s 3-sigma kontrolnim granicama iznosi $\alpha = 0,27\%$. Takva veličina vjerojatnosti pogreške mjerenja će vrijediti cijeli period vremena dok je sustav pod kontrolom i sve do pojave pomaka varijable sustav će pogriješiti svaki 370-ti put u prosijeku. Dok je proces pod kontrolom, u procijenjenom periodu IPK sati, svakih h sati vršiti će se uzorkovanje i tom periodu u kontrolnu kartu će se ucrtati ukupno IPK/h točaka od čega će njih $(IPK/h)\alpha$ u prosjeku signalizirati da je sustav izvan kontrole kad je zapravo pod kontrolom. Nakon što se pomak varijable zaista dogodi, u prosjeku će biti potrebno ukupno ARL pojedinačnih uzorkovanja dok se ne signalizira ispravan signal da je sustav "izvan kontrole" i pri tom će u prosjeku ukupno ARL-1 puta kontrolne karte signalizirati krivi signal da je sustav "pod kontrolom". Tako se izraz (7.18) može postaviti u obliku statističke pogreške provjere (STPP)

$$STPP = -\log \left(\frac{\frac{IPK}{h} \cdot \alpha + ARL - 1}{\frac{IPK}{h} + ARL} \right) \quad (7.19)$$

pri čemu je:

- IPK povijesno procijenjeni prosječni vremenski interval u kojem će proces biti pod kontrolom tj. vrijeme između dvije pojave specijalnih uzroka [h],
- h učestalost uzorkovanja tj. interval upisivanja u kontrolnu kartu [h],
- α vjerojatnost nastanka pogreške prve vrste (ovisna o granicama kontrolnih karti),
- ARL prosječna duljina protoka kontrolne karte, broj točaka koje trebaju biti ucrtane u

kontrolnu kartu prije nego se detektira pomak (podatak ovisan o veličini pomaka kojeg je potrebno otkriti i veličini uzorka).

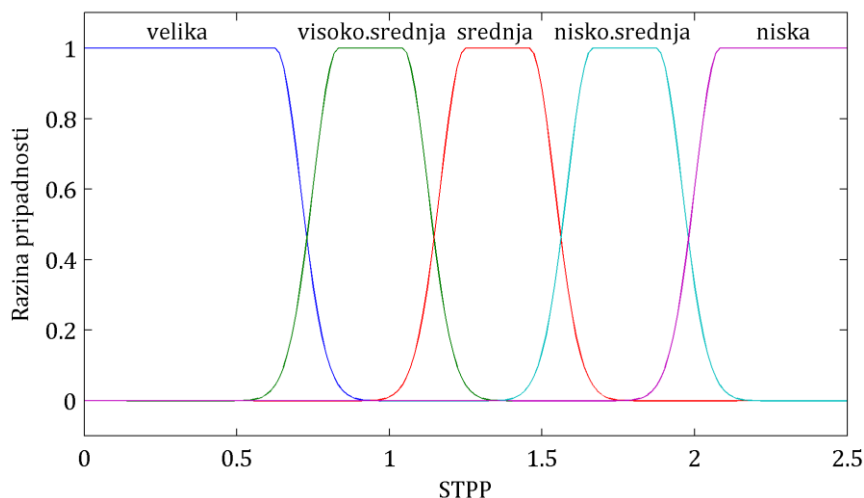
Raspon neizrazite varijable pogreške provjere (PP) od 0 do 6 kakvog su ga predložili Nada et al. (2006.) nije pogodan za varijablu statističke pogreške provjere (STPP) iz razloga što i u stanju procesa pod kontrolom postoji stalna mogućnost pogreške definirana pogreškom prve vrste α . U periodu kada je proces pod kontrolom, najveća vrijednost neizrazite varijable STPP može se izraziti kao

$$STPP_{\max} = -\log(\alpha). \quad (7.20)$$

Tako se vrijednost neizrazite varijable STPP za sustav \bar{x} kontrolnih karti s 3-sigma kontrolnim granicama kreće u rasponu od 0 do 2,569. Raspon vrijednosti neizrazite varijable statističke pogreške provjere i pripadajući stupnjevi ocjena (kategorije) prikazani su u nastavku, tablica 7.3 i slika 7.6.

tablica 7.3 Varijabla statističke pogreške provjere

Naziv varijable	Raspon	Broj kategorija
Statistička pogreška provjere (STPP)	$0-\log(\alpha)$	5

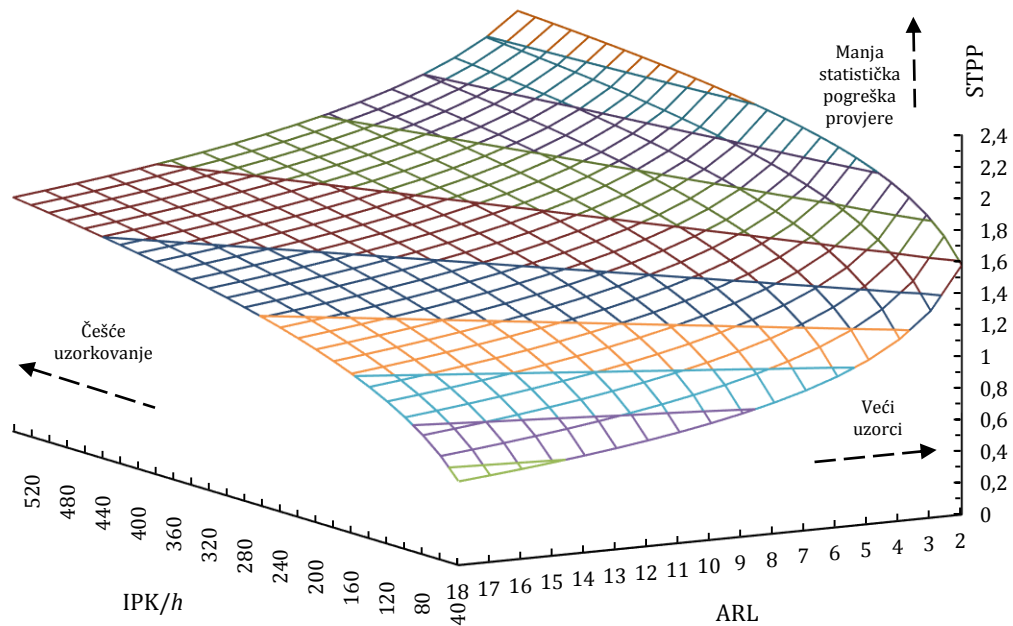


slika 7.6 Funkcije pripadnosti varijable „statistička pogreška provjere“, STPP

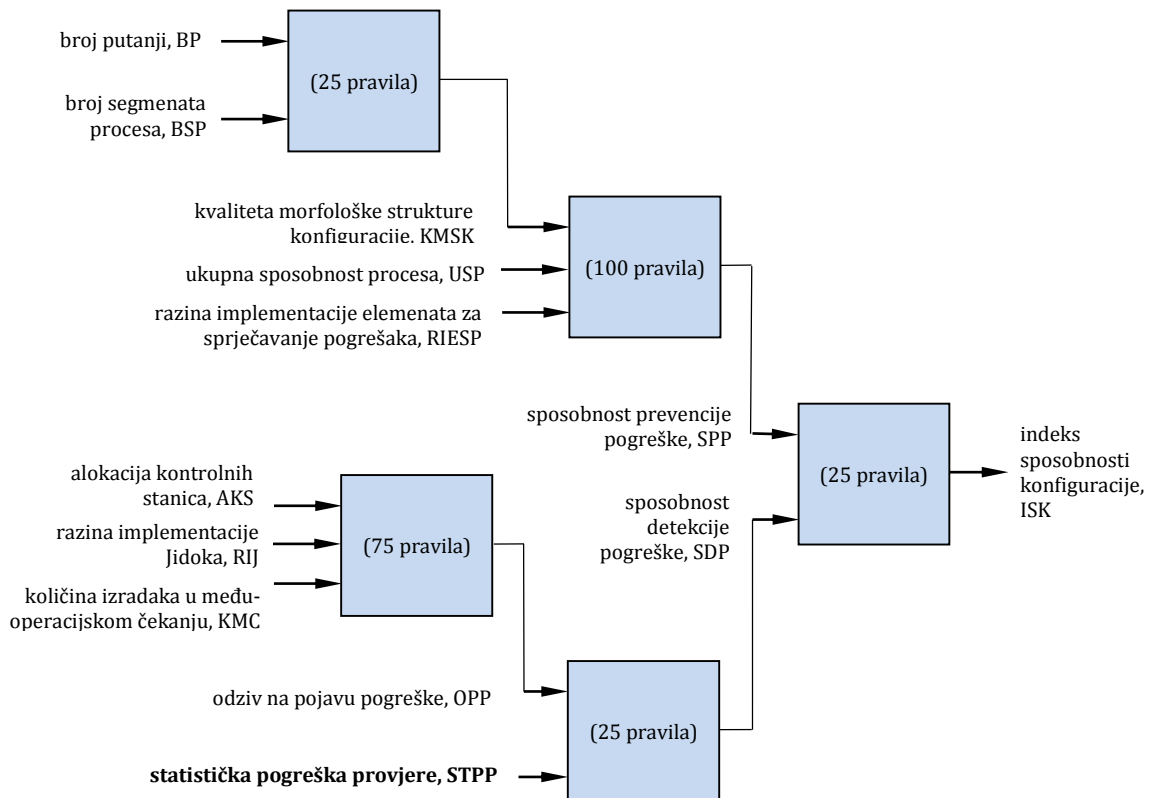
Oblik jednadžbe (7.21) za određivanje pogreške provjere moguće je prikazati grafički, slika 7.7. i tablično, tablica 7.4. Manju statističku pogrešku provjere (veću vrijednost neizrazite varijable STPP) moguće je postići:

- kraćim intervalom uzorkovanja h u odnosu na prosječni interval IPK u kojem se očekuje da će sustav biti pod kontrolom
- manjim vrijednostima prosječne duljine protoka ARL koje je moguće postići većim veličinama uzoraka n .

To znači da povećanje vrijednosti neizrazite varijable STPP, odnosno smanjenje statističke pogreške provjere izravno zahtijeva i više potrebnih mjerenja.



slika 7.7 Raspon vrijednosti neizrazite varijable statističke pogreške provjere (STPP) za x -potez kontrolne karte s 3-sigma kontrolnim granicama



slika 7.8 Predloženi sustav neizrazite logike za izračun vrijednosti ISK

tablica 7.4 Vrijednosti neizrazite varijable statističke pogreške provjere (STPP)

ARL	IPK/h																									
	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500	520	540
2	1,58	1,73	1,83	1,90	1,96	2,01	2,05	2,09	2,12	2,14	2,17	2,19	2,21	2,22	2,24	2,25	2,26	2,28	2,29	2,30	2,31	2,31	2,32	2,33	2,34	2,34
3	1,31	1,46	1,57	1,66	1,72	1,78	1,83	1,87	1,90	1,93	1,96	1,99	2,01	2,03	2,05	2,07	2,09	2,10	2,12	2,13	2,14	2,15	2,17	2,18	2,19	2,20
4	1,15	1,31	1,42	1,50	1,57	1,63	1,68	1,72	1,76	1,79	1,83	1,85	1,88	1,90	1,92	1,94	1,96	1,98	2,00	2,01	2,03	2,04	2,05	2,06	2,08	2,09
5	1,04	1,19	1,30	1,39	1,46	1,52	1,57	1,62	1,65	1,69	1,72	1,75	1,78	1,80	1,82	1,85	1,87	1,88	1,90	1,92	1,93	1,95	1,96	1,97	1,99	2,00
6	0,95	1,11	1,22	1,30	1,37	1,43	1,49	1,53	1,57	1,61	1,64	1,67	1,70	1,72	1,75	1,77	1,79	1,81	1,82	1,84	1,86	1,87	1,89	1,90	1,91	1,93
7	0,89	1,04	1,15	1,23	1,30	1,36	1,41	1,46	1,50	1,54	1,57	1,60	1,63	1,65	1,68	1,70	1,72	1,74	1,76	1,78	1,79	1,81	1,82	1,84	1,85	1,87
8	0,83	0,98	1,09	1,17	1,24	1,30	1,35	1,40	1,44	1,48	1,51	1,54	1,57	1,60	1,62	1,64	1,66	1,68	1,70	1,72	1,74	1,75	1,77	1,78	1,80	1,81
9	0,78	0,93	1,03	1,12	1,19	1,25	1,30	1,35	1,39	1,43	1,46	1,49	1,52	1,54	1,57	1,59	1,61	1,63	1,65	1,67	1,69	1,71	1,72	1,74	1,75	1,76
10	0,74	0,88	0,99	1,07	1,14	1,20	1,26	1,30	1,34	1,38	1,41	1,44	1,47	1,50	1,52	1,55	1,57	1,59	1,61	1,63	1,65	1,66	1,68	1,69	1,71	1,72
11	0,70	0,84	0,95	1,03	1,10	1,16	1,21	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40	1,43	1,46	1,48	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59	1,61	1,62	1,64	1,65	1,67	1,68
12	0,67	0,81	0,91	1,00	1,07	1,13	1,18	1,22	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40	1,42	1,45	1,47	1,49	1,51	1,53	1,55	1,57	1,59	1,60	1,62	1,63	1,65
13	0,64	0,78	0,88	0,96	1,03	1,09	1,14	1,19	1,23	1,27	1,30	1,33	1,36	1,39	1,41	1,44	1,46	1,48	1,50	1,52	1,54	1,55	1,57	1,58	1,60	1,61
14	0,61	0,75	0,85	0,93	1,00	1,06	1,11	1,16	1,20	1,24	1,27	1,30	1,33	1,36	1,38	1,41	1,43	1,45	1,47	1,49	1,51	1,52	1,54	1,55	1,57	1,58
15	0,59	0,72	0,82	0,91	0,97	1,03	1,08	1,13	1,17	1,21	1,24	1,27	1,30	1,33	1,35	1,38	1,40	1,42	1,44	1,46	1,48	1,49	1,51	1,53	1,54	1,56
16	0,57	0,70	0,80	0,88	0,95	1,01	1,06	1,10	1,14	1,18	1,21	1,24	1,27	1,30	1,33	1,35	1,37	1,39	1,41	1,43	1,45	1,47	1,48	1,50	1,51	1,53
17	0,55	0,68	0,78	0,86	0,92	0,98	1,03	1,08	1,12	1,15	1,19	1,22	1,25	1,28	1,30	1,32	1,35	1,37	1,39	1,41	1,42	1,44	1,46	1,47	1,49	1,50
18	0,53	0,66	0,76	0,83	0,90	0,96	1,01	1,05	1,09	1,13	1,16	1,20	1,22	1,25	1,28	1,30	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40	1,42	1,43	1,45	1,47	1,48

7.4.2.1 Očekivani indeks sposobnosti konfiguracije sustava

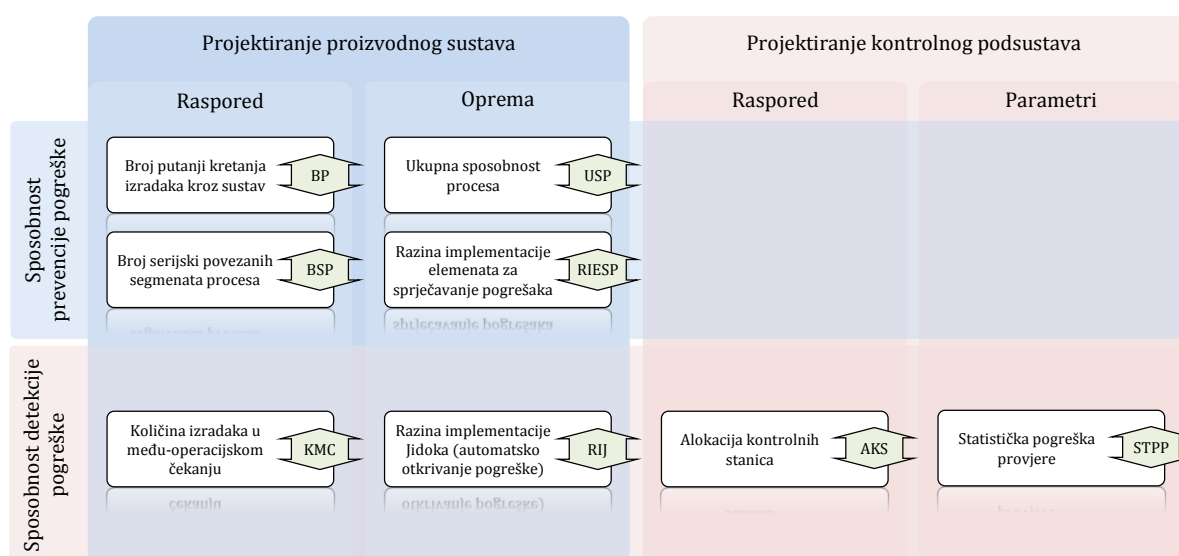
Vrijednost indeksa sposobnosti konfiguracije sustava funkcija je dvije neizrazite varijable - sposobnosti prevencije pogreške i sposobnosti detekcije pogreške. Kako su te dvije varijable pod utjecajem odluka donesenih pri projektiranju proizvodnog sustava i projektiranju kontrolnog podsustava, za postizanje željenog indeksa sposobnosti potrebno je postići povoljnu ravnotežu između ulaznih neizrazitih varijabli sustava. Raspon vrijednosti indeksa sposobnosti konfiguracije prikazan je u nastavku, tablica 7.5.

tablica 7.5 Varijabla sustava neizrazite logike koja predstavlja indeks sposobnosti konfiguracije

Naziv varijable	Raspon	Broj kategorija
Indeks sposobnosti konfiguracije (ISK)	0-6	5

7.4.3 Oblikovanje optimalnog konceptualnog modela kontrolnog podsustava

Očito je da su tri ulazne varijable sustava neizrazite logike koje su posljedica odluka donesenih pri projektiranju proizvodnog sustava: ukupna sposobnost proizvodnog procesa USP, razina implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka RIESP i razina implementacije Jidoka RIJ uvjetovane izborom opreme sustava. Ukupna sposobnost procesa, razina implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka i razina implementacije Jidoka ne mijenjaju vrijednost samo s promjenom konfiguracije sustava. Preostale tri neizrazite varijable koje su posljedica odluka donesenih pri projektiranju proizvodnog sustava: broj putanji BP, broj segmenata procesa BSP i količina izradaka u među-operacijskom čekanju KMC mogu mijenjati svoje vrijednosti pri promjeni konfiguracije sustava, slika 7.9.



slika 7.9 Ulazne varijable sustava neizrazite logike za određivanje indeksa sposobnosti konfiguracije sustava

Broj putanji i broj segmenata procesa su cjelobrojne vrijednosti, dok neizrazita varijabla količine izradaka u među-operacijskom čekanju može biti posljedica razlike u taktovima segmenata proizvodnog procesa što je vrijednost koja može biti promjenjiva s promjenom konfiguracije sustava. Kako je indeks sposobnosti konfiguracije ISK funkcija svih navedenih varijabli, prikladna formulacija sustava neizrazite logike glasi

$$ISK = f(SPP, SDP) = f(BP, BSP, USP, RIESP, KMC, RIJ, AKS, STPP). \quad (7.21)$$

Navedeno ukazuje da će kod konfiguracija s nepovoljnijim varijablama BP, BSP i KMC ukupni indeks sposobnosti morati biti kompenziran povoljnijim varijablama kontrolnog podsustava: AKS i STPP, a kako bi se dosegnuo ciljani potrebni indeks sposobnosti konfiguracije ISK_{cilj} definiran politikom projektiranja.

U praksi to znači sljedeće: konfiguracije sa složenim hodogramom kretanja izradaka (velikim brojem putanji i segmenata procesa) te one s vrlo neujednačenim trajanjima operacija - moraju imati intenzivnije postavljene kontrolne stanice i snažnije sustave kontrolnih karti s manjom vjerojatnosti pogrešnog statističkog zaključivanja o stanju procesa kako bi kompenzirale nedostatke i kako bi konačan indeks sposobnosti konfiguracije bio zadovoljavajući. Rješavanje ovako složenih sustava neizrazite logike s višestrukim ulaznim varijablama zahtjeva korištenje nekih od gotovih računalnih programa s podrškom za neizrazitu logiku. Funkcija cilja optimizacije kontrolnog podsustava je postizanje željene, ciljane vrijednosti indeksa sposobnosti konfiguracije

$$F = ISK_{cilj} \quad (7.22)$$

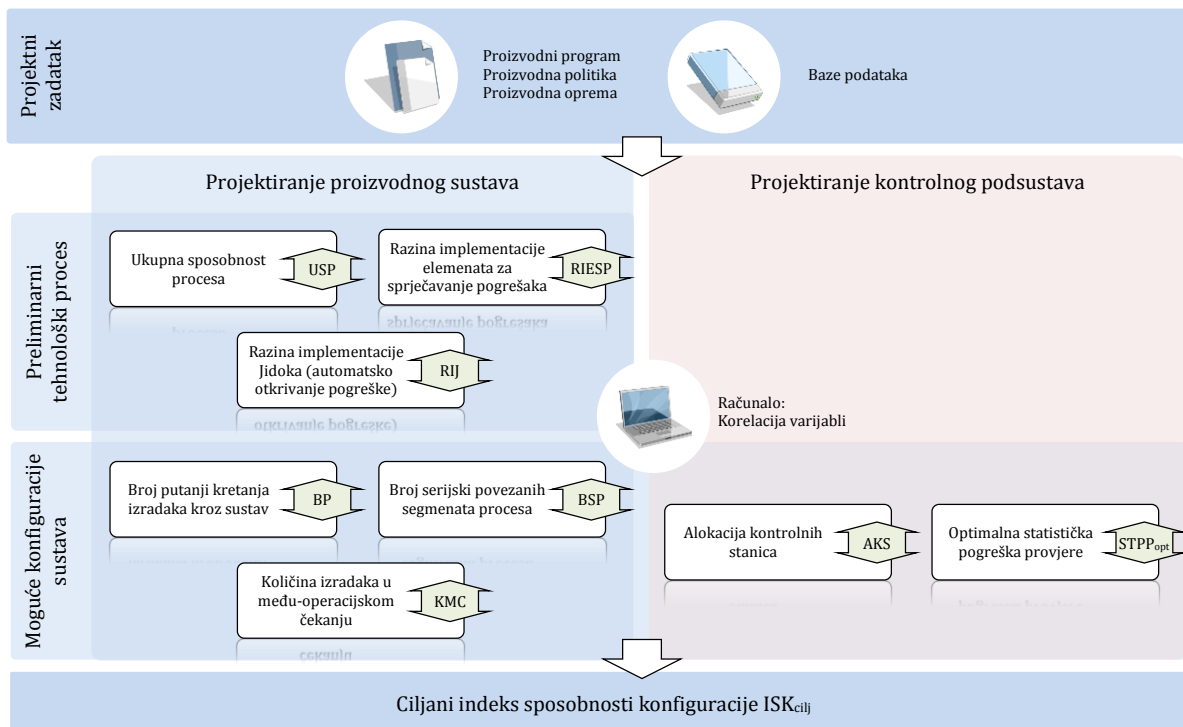
pri čemu su varijable USP, RIESP i RIJ određene odlukama donesenim pri kreiranju preliminarnog tehnološkog procesa i kao takve su konstantne u slučajevima rekonfiguracije proizvodnog sustava, slika 7.10.

No, za svaku moguću konfiguraciju sustava za očekivati je drugačije vrijednosti BP, BSP i KMC čije je potencijalno negativne efekte potrebno kompenzirati intenzivnijom alokacijom kontrolnih stanica (AKS) u sustavu i povoljnijom varijablom statističke pogreške provjere (STPP) koji tada trebaju biti upravo onoliki koliko je potrebno da se postigne ciljane vrijednost indeksa sposobnosti konfiguracije ISK_{cilj} . Za svaku vrijednost alokacije kontrolnih stanica AKS tada postoji jedna vrijednost statističke pogreške provjere $STPP_{opt}$ koja karakterizira optimalni konceptualni model kontrolnog podsustava.

To u praksi znači da će konfiguracije s nepovoljnijim varijablama sposobnosti prevencije pogreške iziskivati veća ulaganja u kontrolnu opremu zbog intenzivnijeg potrebnog postavljanja kontrolnih stanica ili učestalijeg uzorkovanja/većih veličina uzoraka kojima bi se takav sustav održavao pod kontrolom. Nakon što se sustavom neizrazite logike odredi potrebna optimalna statistička

pogreška provjere $STPP_{opt}$ koja uz pripadajuću varijablu AKS osigurava povoljnu izlaznu varijablu indeksa sposobnosti konfiguracije ISK_{cilj} , potrebno je:

1. odrediti učestalost uzorkovanja h
2. očitati potrebnu vrijednost prosječne duljine protoka ARL za pojedine vrijednosti učestalosti uzorkovanja ISK/h kojim se postiže potrebna vrijednost $STPP_{opt}$ (tablica 7.4)
3. iz ARL- ξ krivulja kontrolnih karti očitati potrebnu veličinu uzorka kako bi se otkrila željena veličina pomaka varijable.

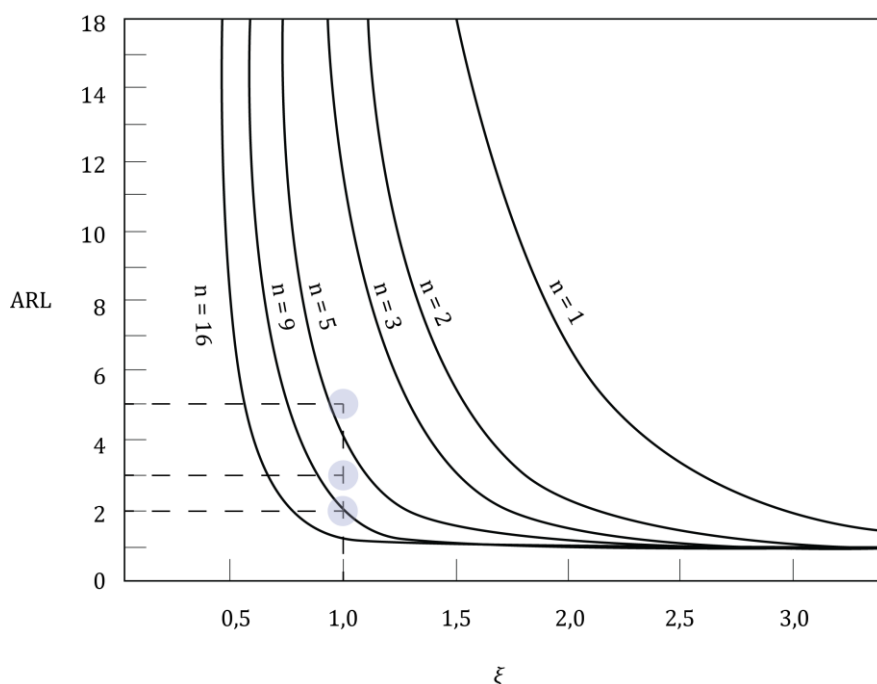


slika 7.10 Ulazne varijable sustava neizrazite logike za određivanje indeksa sposobnosti konfiguracije sustava u kontekstu redoslijeda projektiranja

Konceptualni model kontrolnog podsustava se u ovom radu smatra optimalnim ukoliko za određenu vrijednost alokacije kontrolnih stanica AKS, parametri \bar{x} kontrolnih karti pružaju upravo onoliko statističku pogrešku provjere $STPP_{opt}$ kolika je dovoljna da se postigne ciljani indeks sposobnosti konfiguracije ISK_{cilj} .

Kako bi se ilustrirao ovakav postupak oblikovanja parametara optimalnog kontrolnog podsustava, promatra se slučaj u kojem je za postizanje ciljane vrijednosti indeksa sposobnosti konfiguracije ISK_{cilj} , uz intenzivnu alokaciju kontrolnih stanica nakon svake operacije ($AKS = 0$) optimalna vrijednost varijable statističke pogreške provjere iznosi $STPP_{opt} = 1,57$. Povijesno očekivani, prosječni interval kad je proces pod kontrolom iznosi $IPK = 320$ h.

Očito je (tablica 7.4) kako je s nizom vrijednosti IPK/h moguće zadovoljiti vrijednost $STPP_{opt} = 1,57$, ovisno o željenoj frekvenciji uzorkovanja h . Primjerice, ako je planirana učestalost uzorkovanja 2 h, tada je $IPK/h = 160$, a potrebna vrijednost $STPP_{opt} = 1,57$ se postiže pri vrijednosti prosječne duljine protoka $ARL = 5$. Iz krivulja $ARL-\xi$ (slika 7.11) je očito da je takvu prosječnu duljinu protoka za otkrivanje željenog pomaka varijable (primjerice 1σ) moguće postići \bar{x} kontrolnom kartom s uzorcima veličine $n = 5$. U nastavku su prikazane moguće strategije uzorkovanja za pojedine frekvencije izvođenja statističkog testa (uzorkovanja) za navedeni primjer, tablica 7.6.



slika 7.11 Prosječna duljina protoka (uzoraka) ARL x -potez kontrolne karte potreban da bi se detektirao pomak veličine $\xi\sigma$ kontrolnom kartom s 3σ granicama

tablica 7.6 Moguće strategije uzorkovanja optimalnog kontrolnog podsustava

h	IPK/h	ARL (tablica 7.4)	Veličina uzorka n za otkrivanje pomaka 1σ (slika 7.11)
2 h	160	5	5 kom.
4 h	80	3	7 kom.
8 h	40	2	9 kom.

7.5 Vrednovanje konfiguracija sustava

Za svaku konfiguraciju rekonfigurabilnog proizvodnog sustava realno je očekivati značajke koje su različite od značajki ostalih konfiguracija. To podrazumijeva vjerojatne razlike u veličinama investicijskih ulaganja, promjenjivosti, opterećenosti kontrolnog podsustava i sl. Zbog toga je

vrednovanje pojedinih konfiguracija potrebno izvršiti na osnovi pogodnih kriterija čiji je fond u ovoj fazi oblikovanja koncepta proizvodnog sustava relativno sužen ograničavajućim brojem informacija (Mikac, 1994.)

Na osnovi poznatih podataka, mogu se odrediti komparativne značajke pojedinih konfiguracija sustava (Koren i Shiptalni, 2010.):

- najveća moguća proizvodnost sustava
- investicijska ulaganja
- promjenjivost
- potrebne efektivne površine.

No, ukoliko se kao jedan od ciljeva projektiranja procesa promatra i kvaliteta, potrebno je uzeti i dodatne komparativne vrijednosti u obzir:

- opterećenost kontrolnog podsustava zbog distribucija varijabilnosti
- sposobnost prevencije pogreške sustava.

7.5.1 Najveća moguća proizvodnost sustava

Jedno od značajnih pitanja koje si projektant pri odabiru konfiguracije sustava može postaviti je: „Koliko je najveća moguća proizvodnost sustava koju je moguće postići s promatranom konfiguracijom bez dodavanja ikakvih elemenata u sustav i dodatnih investicija?“ To je pitanje značajno kad se u obzir uzmu moguće fluktuacije potražnje za proizvodom na promjenjivom tržištu. Ograničavajući faktor koji definira najveću moguću proizvodnost sustava je segment procesa koje predstavlja usko grlo sustava. Za očekivati je da će različite konfiguracije imati različite taktove operacija na segmentu uskog grla sustava i time imati različiti potencijal povećanja proizvodnosti. Upravo razlika takta operacije na segmentu uskog grla i takta sustava predstavlja potencijal povećanja proizvodnosti konfiguracije. Najveća dnevna proizvodnost sustava za proizvodnjom j-tog izratka jednaka je

$$q_{j, \text{dn}, \text{max}} = \frac{K_{i, \text{dn}}}{T_{\text{op}, j, \text{max}}} \quad (7.16)$$

pri čemu je

- $K_{i, \text{dn}}$ raspoloživ dnevni kapacitet proizvodne opreme,
- $T_{\text{op}, j, \text{max}}$ takt operacije na segmentu uskog grla proizvodnog procesa j-tog izratka.

7.5.2 Promjenjivost

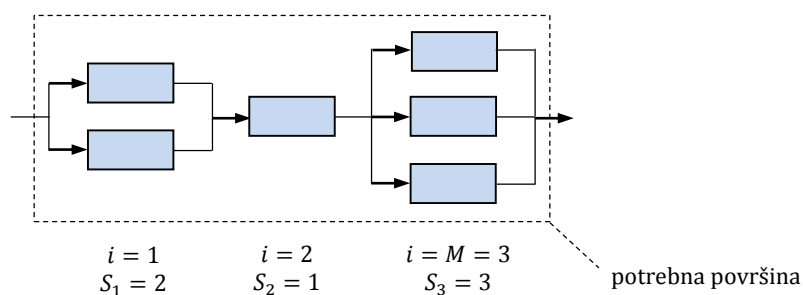
Modularnost, prilagodljivost i konvertibilnost kao svojstva rekonfigurabilnih proizvodnih sustava osiguravaju se na razini sustava implementiranjem fleksibilne proizvodne opreme koja ima mogućnost brzog i troškovno učinkovitog premještanja na drugu poziciju u sustavu ako se za to

pokaže potreba. Skalabilnost pojedine konfiguracije pak uvelike ovisi o njenom obliku i vremenskim značajkama. Zanimljivo je promotriti za koliki je inkrement moguće povećati proizvodnost sustava dodavanjem samo jednog proizvodnog kapaciteta u sustav. Logično, idealan segment za dodavanje dodatnog proizvodnog kapaciteta u cilju povećanja proizvodnosti je segment uskog grla sustava. Nakon dodavanja jednog proizvodnog kapaciteta potrebno je provjeriti koji je segment proizvodnog procesa na kojem se nalazi novo usko grlo procesa i zatim provjeriti proizvodnost sustava putem izraza (7.16).

Integrabilnost sustava osigurava se integracijom sve opreme u sustav na način da su svi kapaciteti u istom segmentu proizvodnog procesa povezani pokretnim postoljem ili pokretnom trakom, a svi segmenti proizvodnog procesa integrirani u sustav glavnim pokretnim postoljem ili pokretnom trakom. Dijagnostibilnost kao preostalo svojstvo promjenjivosti ovisi o odlukama donesenim pri projektiranju kontrolnog podsustava. S obzirom na razinu implementacije svojstava koja omogućuju rekonfigurabilnost proizvodnog sustava, konfiguracije imaju različite stupnjeve ocjene promjenjivosti.

7.5.3 Potrebne efektivne površine

Neposredna relativna potrebna površina jedne konfiguracije rekonfigurabilnog proizvodnog sustava može se grubo izračunati kao umnožak konačnog broja segmenata proizvodnog sustava M i najvećeg broja istovjetnih strojeva u pojedinom segmentu sustava $S_{i,\max}$ (Koren i Shiptalni, 2010.).



slika 7.12 Potrebna površina konfiguracije sustava

$$P = M \cdot S_{i,\max} \quad (7.17)$$

Ukoliko se pri izradi preliminarnog plana obrade u obzir uzmu točni podaci o dimenzijama opreme, ovaj se podatak može točnije izračunati, no već i u ovakvom obliku predstavlja dobar pokazatelj relativnog odnosa veličina potrebne efektivne površine pojedinih konfiguracija.

7.5.4 Modeli distribucija varijabilnosti kroz sustav

Kako je opisano u naslovu 6.5.1, obzirom na morfološku različitost konfiguracija koncepta

proizvodnog sustava, za očekivati je različiti ukupan broj varijabilnosti (naslijeđenih i novonastalih) u pojedinim konfiguracijama koncepta proizvodnog sustava. Veliki broj varijabilnosti opterećuje kontrolni podsustav te iziskuje povećane napore za praćenjem pojedinih putanji kretanja materijala, a time i veliki broj kontrolnih karti u procesu što iziskuje veću potrebu za raspoloživom opremom kontrolnog podsustava. Stoga, svaku je konfiguraciju iz formiranog fonda mogućih konfiguracija potrebno vrednovati formiranjem modela distribucije varijabilnosti s nasljednom komponentom kako bi se odredio potreban broj kontrolnih karti potrebnih za pojedinu strategiju kontrole kvalitete.

7.5.5 Sposobnost prevencije pogreške

Kako je opisano u naslovu 7.4.3, ukoliko se varijabla odziva na pojavu pogreške OPP promatra kao konstanta, sposobnost prevencije pogreške SPP proizvodnog sustava izravno utječe na vrijednost optimalne statističke pogreške provjere $STPP_{opt}$ za postizanje ciljanog indeksa sposobnosti konfiguracije sustava ISK_{cilj} , a time i na opterećenost kontrolnog podsustava. Sposobnost statističke provjere pogreške tako izravno predstavlja komparativnu vrijednost svake konfiguracije sustava kroz koju se očituju razlike u potrebnim naporima za održavanje povoljne razine kvalitete i potrebnim veličinama investicijskih ulaganja u opremu kontrolnog podsustava.

7.5.6 Investicijska ulaganja

S obzirom da sve konfiguracije sadrže jednak broj istovjetne proizvodne opreme po segmentima proizvodnog procesa, investicijska ulaganja u proizvodnu opremu su jednaka među svim konfiguracijama. Međutim, razlike postoje u sustavu upravljanja materijalom. Kako su investicijska ulaganja u transportni sustav posvećenih proizvodnih linija daleko niža od onog kod RPS konfiguracija, konfiguracije koje imaju izraženiji oblik transfer linije, bez složenih križanja materijala između segmenata proizvodnog procesa, zahtijevaju u principu manja investicijska ulaganja od ostalih konfiguracija (Koren i Shiptalni, 2010.).

7.6 Odabir optimalne konfiguracije sustava

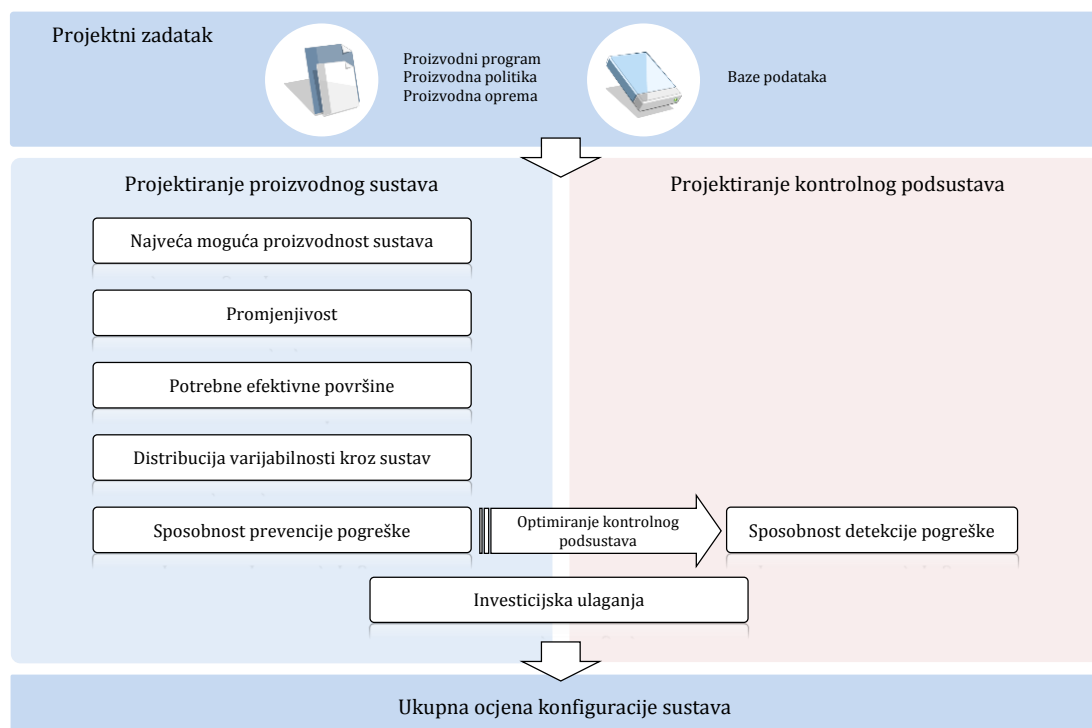
Definiranjem načina vrednovanja relevantnih značajki pojedinih konfiguracija, moguće je stvoriti podloge za konačan izbor rješenja koncepta konfigurabilnog proizvodnog sustava koji zadovoljava ciljeve formulirane projektnim zadatkom. Donošenje ocjene o ukupnoj vrijednosti svakog pojedinog alternativnog rješenja i odabir optimalnog, neophodno je relativizirati pokazatelje vrijednosti konfiguracija i svesti ih na oblik u kojem ih je moguće komparirati. Kod toga je relativizaciju moguće provesti na nekoliko načina:

- u odnosu na rubne uvjete koji mogu biti zadani projektnim zadatkom

- u odnosu na najpovoljnije podatke (najmanje ili najveće) pojedine varijante koncepta proizvodnog sustava
- rangiranjem varijanti po svakoj značajki te odabirom prema hijerarhijski definiranom redoslijedu značajki.

S obzirom na navedene komparativne vrijednosti konfiguracija sustava, pogodnim se čini razmatrati ih sve u cjelini.

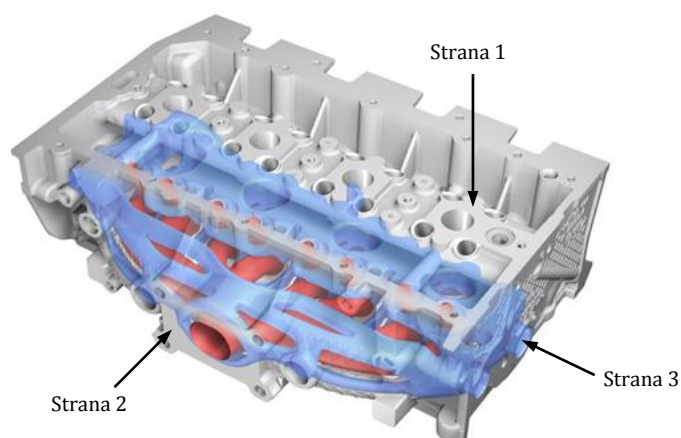
Hijerarhijski redoslijed važnosti pojedinih značajki konfiguracija proizvodnog sustava pretpostavljeno je određen proizvodnom politikom proizvodne organizacije koja je odgovorna za izvođenje proizvodnje. Projektanti sustava tako, s obzirom na proizvodnu politiku organizacije, vrše vrednovanje svih konfiguracija sustava, slika 7.13 te vrše konačan odabir koncepta proizvodnog sustava s pripadajućim kontrolnim podsustavom. Odabir koncepta predstavlja osnovu daljnjih aktivnosti projektiranja te uvođenja proizvodnog sustava u eksploataciju.



slika 7.13 Vrednovanje pojedine konfiguracije sustava

8 PRIMJER PROJEKTIRANJA KONCEPTA PROIZVODNOG SUSTAVA

Valjanost i primjenjivost metode projektiranja proizvodnog sustava sa značajkama rekonfigurabilnosti i optimalnim kontrolnim podsustavom koja je detaljno obrađena u poglavlju 7, provjerena je na konkretnom primjeru. Osnovu za prikaz metode predstavlja tipični složeni izradak automobilske industrije - glava motora, slika 8.1. Glava motora je dio pogonskog stroja s unutarnjim izgaranjem koji se nalazi na bloku, iznad cilindara. Njome se zatvaraju cilindri čime se oblikuju komore za izgaranje. Glava motora osigurava prostor za prolaz usisnih i ispušnih kanala, a njezina je uloga i u smještaju ventila, svjećica, brizgalica goriva, ležajeva bregastih vratila i drugih dijelova motora. Ovi izradci su uglavnom izrađeni od nekih vrsti aluminijskih legura koji bolje podnose termička opterećenja. Tipični dijelovi automobilskih motora kao što je glava motora obično zahtijevaju strojnu obradu s nekoliko strana te vrlo često više od 200 manjih zadataka obrade potrebnih kako bi se potpuno obradio izradak. No, zbog praktičnosti prikaza samog zadatka, promatrati će se skupovi takvih zadataka formirani u diferencijacije operacija.



slika 8.1 Tipični oblik glave automobilskog motora prikazan zajedno s integriranim usisnim i ispušnim sustavom (izvor Audi AG)

Promatra se samo proizvodni sustav za strojnu obradu ovakvog izratka. Pretpostavlja se da se poluproizvodi u proces strojne obrade dopremaju u obliku odljevaka. Opremu sustava trebaju činiti CNC strojevi koji mogu izvršiti obradu svih potrebnih vrsta: glodanje, bušenje, urezivanje navoja i sl. Radi jednostavnosti prikaza, promatrati će se samo tri strane obrade makar ih u određenim slučajevima može biti i više. Ovako pojednostavljen zadatak zahtjeva ukupno sedam zadataka obrade raspoređenih na ukupno tri strane izratka. Inicijalno potrebne količine su 450 komada dnevno iako je za očekivati da se, ovisno o potražnji za ovakvim motorom na tržištu potražnja poveća. S obzirom na trendove uvođenja motora s automatskim paljenjem inače ugašenih cilindara (eng. *cylinder on demand*) očekuje se da će ovakav proizvodni sustav s vremenom postepeno smanjivati proizvodnju ovog modela i uvoditi dva slična novije generacije. Bez detaljne analize operacija s obzirom na dostupnu opremu i proizvodnu politiku, odabrani koncept tehnološkog procesa prikazan je pripadajućim Preliminarnim popisom operacija, slika 8.2.

Projektom zadatkom je definirano radno vrijeme u dvije smjene po osam sati. Ciljana vrijednost indeksa sposobnosti konfiguracije iznosi $ISK_{cilj} = 3,5$. Proizvodnu opremu čine 3-osne vertikalne glodalice modela za kojeg organizacija posjeduje podatke očekivanih sigma razina izvođenja diferencijacija operacija dobivene praćenjem sličnih procesa unutar organizacije. Iz preliminarnog popisa operacija (slika 8.2) mogu se iščitati sljedeći ključni podaci, tablica 8.1.


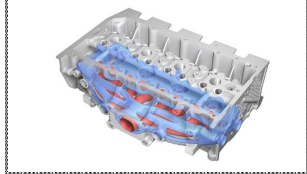
tablica 8.1 Ključni podaci preliminarnog popisa operacija

Operacija r	Diferencijacija operacije r_d	Naziv diferencijacije operacije (skup zadataka)	Vrijeme t (min)	Tehnološka baza	Očekivana sigma razina R_{σ, r_d}^*	Pokryoka
1	1 ₁	Obrada zone A	2,60	odljevak	4,20	-
1	1 ₂	Obrada zone B	1,25	odljevak	4,05	DA
1	1 ₃	Obrada rupa i navoja zone C	1,65	odljevak	3,60	DA
2	2 ₁	Obrada zone D	1,45	zona A	4,05	-
2	2 ₂	Obrada rupa i navoja zone E	2,75	zona A	4,50	DA
2	2 ₃	Obrada zone F	1,35	zona A	4,20	-
3	3 ₁	Obrada zone G	1,40	zona D	4,20	-

* očitano iz baze podataka

Ukupna sigma razina sustava može se prikazati putem matrice veza pa iz izraza (7.2) slijedi

$$R_{\sigma ri} = \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 4,20 \\ 4,05 \\ 3,60 \\ 4,05 \\ 4,50 \\ 4,20 \\ 4,20 \end{bmatrix}. \quad (8.1)$$

 <p>SVEUČILIŠTE U RIJECI TEHNIČKI FAKULTET</p>	<p>Naziv izratka:</p> <p style="text-align: center;">Glava cilindra</p>	<p>Skica izratka:</p> 
	<p>Oznaka izratka:</p> <p>EA9045-S01</p> <p>Dnevne količine: 450</p> <p>Oznaka materijala: AISi9Cu3</p>	
<p>PRELIMINARNI POPIS OPERACIJA</p>		

KONSTRUKCIJSKO PREDGRUPIRANJE IZRADAKA

Grupa mat.:	L	Laki metali	Ocjena varijabilnosti proizvodnog programa:	Varijabilan
Grupa dimenzija:	Velike	Preko 630x400x400m	Ocjena značajki tehn. procesa i opreme:	B
Ocjena količina:	V	Velike		

RAZRADA PRELIMINARNOG PLANA OBRADJE

Operacija:	Diferencijacija:	Naziv diferencijacije operacije:	Baza:	Paralal. procesa:	Vrijeme (min)	Očekivana sigma razina:
1	1	Obrada zone A	-	1	2,6	4,20
		Oznaka opreme: M14 Vrsta: CNC Vrijedn.: 106.800 €			Amortiz. vrijeme (god.): 6	P.-Y.: NE
1	2	Obrada zone B	-	1	1,25	4,05
		Oznaka opreme: M14 Vrsta: CNC Vrijedn.: 106.800 €			Amortiz. vrijeme (god.): 6	P.-Y.: DA
1	3	Obrada rupa i navoja zone C	-	1	1,65	3,60
		Oznaka opreme: M14 Vrsta: CNC Vrijedn.: 106.800 €			Amortiz. vrijeme (god.): 6	P.-Y.: DA
2	1	Obrada zone D	1-1	1	1,45	4,05
		Oznaka opreme: M14 Vrsta: CNC Vrijedn.: 106.800 €			Amortiz. vrijeme (god.): 6	P.-Y.: NE
2	2	Obrada utora i navoja zone E	1-1	1	2,75	4,50
		Oznaka opreme: M14 Vrsta: CNC Vrijedn.: 106.800 €			Amortiz. vrijeme (god.): 6	P.-Y.: DA
2	3	Obrada zone F	1-1	1	1,35	4,20
		Oznaka opreme: M14 Vrsta: CNC Vrijedn.: 106.800 €			Amortiz. vrijeme (god.): 6	P.-Y.: NE
3	1	Obrada zone G	2-1	1	1,4	4,20
		Oznaka opreme: M14 Vrsta: CNC Vrijedn.: 106.800 €			Amortiz. vrijeme (god.): 6	P.-Y.: NE

REZULTATI RAZRADE PRELIMINARNOG PLANA OBRADJE

Ukupni broj stezanja:	3	Razina implement. elem. za spriječavanje pogrešaka (0-1):	0,429
Razina implementacije Jidoka (0-1):	0,0		

Datum: 7.6.2014. Izradio: Odobrio:

slika 8.2 Preliminarni popis operacija za promatrani izradak

Pod pretpostavkom da su mjerljive karakteristike koje karakteriziraju sposobnost izvođenja pojedine diferencijacije operacija normalno distribuirane, moguće je formirati matricu veza koja prikazuje doprinose pojedinih diferencijacija operacija tehnološkom procesu. Vrijednosti doprinosa moguće je očitati iz tablica standardne normalne distribucije ili Excel funkcijom

NORMSDIST(R_σ) nakon čega se prema izrazu (7.3) može formirati matrica doprinosa

$$D_{ri} = \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0,9999867 \\ 0,9999744 \\ 0,9998410 \\ 0,9999744 \\ 0,9999966 \\ 0,9999867 \\ 0,9999867 \end{bmatrix}. \quad (8.2)$$

Ukupni doprinos sustava D_{uk} moguće izračunati prema izrazu (7.5)

$$D_{uk} = \prod_{r=1}^R D_r = 0,9997466 \quad (8.3)$$

Pod pretpostavkom da su promatrane karakteristike koje opisuju sposobnost procesa normalno distribuirane, moguće je iz izraza D_{uk} odrediti pripadajuću dugoročnu sigma razinu izvođenja procesa putem izraza (7.6) ili Excel funkcije NORMSINV:

$$R_{\sigma,pd} = \Phi^{-1}(D_{uk}) = 3,48. \quad (8.4)$$

Kako bi se izračunala kratkoročna sigma razina cijelog procesa $R_{\sigma,pk}$, takvoj dugoročnoj sigma razini procesa pribrojiti vrijednost 1,5 putem jednadžbe (7.7)

$$R_{\sigma,pk} = \Phi^{-1}(D_{uk}) + 1,5 = 4,98. \quad (8.5)$$

Iz navedenog slijedi da je neizrazita varijabla ukupne sposobnosti procesa, prema jednadžbi (7.16) jednaka

$$USP = \frac{R_{\sigma,pk}}{6} = 0,83. \quad (8.6)$$

Iz preliminarnog popisa operacija je vidljivo da je od ukupno $d_{uk,j} = 7$ diferencijacija operacija, na njih $d_{py,j} = 3$ postoje poka-yoka elementi pa je neizrazita varijabla razine implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka jednaka, prema (7.17)

$$RIESP = \frac{d_{py,j}}{d_{uk,j}} = \frac{3}{7} = 0,43. \quad (8.7)$$

Odabranim preliminarnim popisom operacija nisu predviđeni Jidoka elementi u proizvodnom procesu pa je neizrazita varijabla razine implementacije Jidoka elemenata jednaka

$$RIJ = 0. \quad (8.8)$$

S obzirom na iskustveno procijenjena vremena trajanja pojedinih operacija može se formirati matrica veza izradaka i opreme putem vremenskog opterećenja pojedinih diferencijacija

operacija. Iz izraza (7.1) slijedi

$$M_{t,rij} = \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 2,60 \\ 1,25 \\ 1,65 \\ 1,45 \\ 2,75 \\ 1,35 \\ 1,40 \end{bmatrix}. \quad (8.9)$$

S obzirom na odabranu proizvodnu opremu, iskustveni tehnički stupanj iskoristivosti bruto raspoloživog vremena iznosi $\eta_{bt} = 0,7875$. Neto raspoloživo dnevno vrijeme korištenja proizvodne opreme tada iznosi, prema (4.1)

$$K_{i,dn,sus} = 60 \cdot h \cdot s_{dn} \cdot \eta_{bt} = 60 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 0,7875 = 756 \text{ [min]}. \quad (8.10)$$

Potreban broj proizvodne opreme po pojedinoj diferencijaciji operacije iznosi, prema izrazu (7.8)

$$M_{S,rij} = \frac{[M_{t,rij}] \cdot [q_{j,dn}]}{[K_{i,dn}]} = \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1,5476 \\ 0,7440 \\ 0,9821 \\ 0,8631 \\ 1,6369 \\ 0,8036 \\ 0,8333 \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

što pretvoreno u cjelobrojne izraze iznosi, prema (7.9)

$$M_{S,rij,int} = \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

što znači da je za skupinu diferencijacija operacija u prvom stezanju potrebno ukupno četiri stroja, kao i za skupinu u drugom stezanju. U trećem stezanju je samo jedna diferencijacija operacije s jednim potrebnim strojem. U prvom i drugom stezanju postoje po tri diferencijacije operacija, pa iz Pascalovog trokuta slijedi da se ukupno četiri stroja mogu raspodijeliti u dodatnih najviše 3 segmenta u ukupno sedam kombinacija (1+3+3) tablica 8.2. Ukupni broj konfiguracija moguće je izračunati putem broja kombinacija slaganja pojedinih stezanja (operacija). Iz izraza (7.10) slijedi da je ukupan broj konfiguracija sustava

$$\mathcal{K}_{sus} = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 7 \\ 7 \\ 1 \end{bmatrix} = 49 \text{ konfiguracija}. \quad (8.13)$$

No, ograničavajući uvjet pri oblikovanju sustava u navedeni broj konfiguracija predstavlja takt linije sustava koji mora biti zadovoljen u svakoj operaciji, prema jednadžbi (7.11).

tablica 8.2 Pascalov trokut

\mathcal{K}		raspoređena u ukupno l segmenata									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Količina proizvodne opreme S	1	1									
	2	1	1								
	3	1	2	1							
	4	1	3	3	1						
	5	1	4	6	4	1					
	6	1	5	10	10	5	1				
	7	1	6	15	20	15	6	1			
	8	1	7	21	35	35	21	7	1		
	9	1	8	28	56	70	56	28	8	1	
	10	1	9	36	84	126	126	84	36	9	1

Taj uvjet je potrebno provjeriti za svih navedenih 49 konfiguracija sustava kako bi se eliminirale konfiguracije koje ga ne zadovoljavaju. Takt sustava za navedeni primjer može se prikazati putem izraza (7.13)

$$T_{\text{sus},j} = \frac{K_{i,\text{dn},\text{sus}}}{q_{j,\text{dn}}} = \frac{756}{450} = 1,68 \text{ min.} \quad (8.14)$$

Ukoliko se promotri prva moguća konfiguracija sustava koja sadrži po tri operacije u prva dva stezanja (u kombinaciji 1+2+1 stroj) te jednu u trećem stezanju, matricni oblik takvog uvjeta moguće je prikazati na sljedeći način, jednadžba (8.15). Jednadžba pokazuje da nije zadovoljen uvjet $T_{\text{op},jr} \leq T_{\text{sus},j}$ u prvom segmentu proizvodnog procesa pa se takva konfiguracija mora eliminirati.

$$T_{\text{op},jr} = \frac{t_{jr}}{S_{jr}} = \frac{\begin{matrix} 1 & [2,60] \\ 1 & [1,25] \\ 1 & [1,65] \\ 2 & [1,45] \\ 2 & [2,75] \\ 2 & [1,35] \\ 3 & [1,40] \end{matrix}}{\begin{matrix} 1 & [1] \\ 1 & [2] \\ 1 & [1] \\ 2 & [1] \\ 2 & [2] \\ 2 & [1] \\ 3 & [1] \end{matrix}} = \frac{\begin{matrix} 1 & [2,600] \\ 1 & [0,625] \\ 1 & [1,650] \\ 2 & [1,450] \\ 2 & [1,375] \\ 2 & [1,350] \\ 3 & [1,400] \end{matrix}}{\begin{matrix} 1 & [1,680] \\ 1 & [1,680] \\ 1 & [1,680] \\ 2 & [1,680] \\ 2 & [1,680] \\ 2 & [1,680] \\ 3 & [1,680] \end{matrix}} \not\leq \quad (8.15)$$

Konfiguracije koje zadovoljavaju uvjet takta linije mogu se prikazati na sljedeći način, tablica 8.3. Broj pogodnih konfiguracija sveden je s 49 na 16 što predstavlja značajno smanjenje. Broj

operacija (segmenata proizvodnog procesa) variraju od 3 do 7, a njihovi oblici konfiguracija se kreću od onih kakve su karakteristične za posvećene proizvodne linije pa sve do čistih RPS konfiguracija.

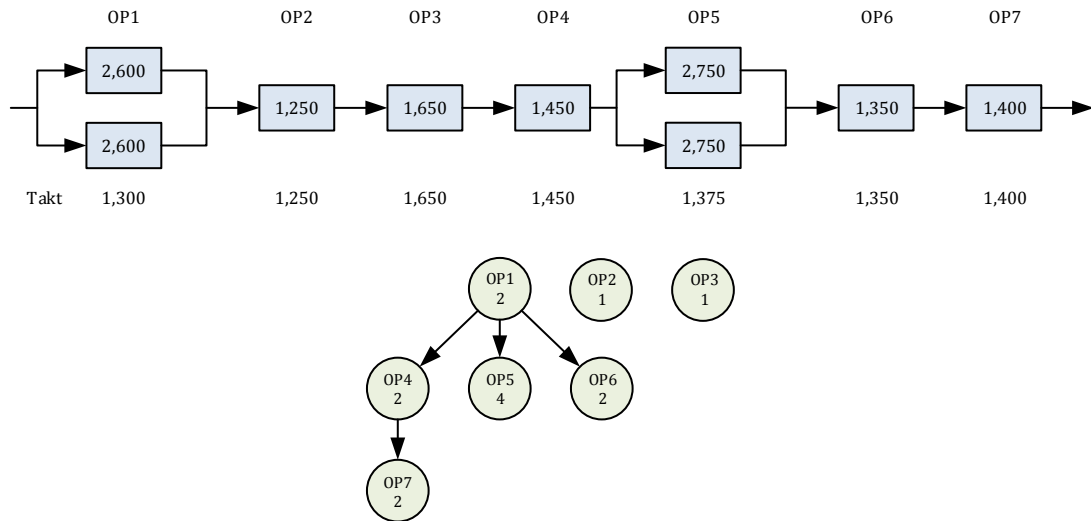
tablica 8.3 Broj strojeva po operacijama za moguće konfiguracije sustava

		Konfiguracija															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Diferencijacije operacija	1	2			2	2	2	2							2	2	2
	2	1	3			1	1	1	3	3	3		4	4	4		
	3	1	1		2		1	1	1	1	1				2	2	2
	4	1	1	1	1			1			1			1			1
	5	2	2	2	2		3		3			3			3		
	6	1	1	1	1	1			3		4		4			4	
	7	1	1	1	1	1		3	1		3		4	3			3
BP	4	6	8	8	6	8	6	9	12	9	12	16	12	12	16	12	
BSP	7	6	5	6	6	5	6	5	4	5	4	3	4	5	4	5	

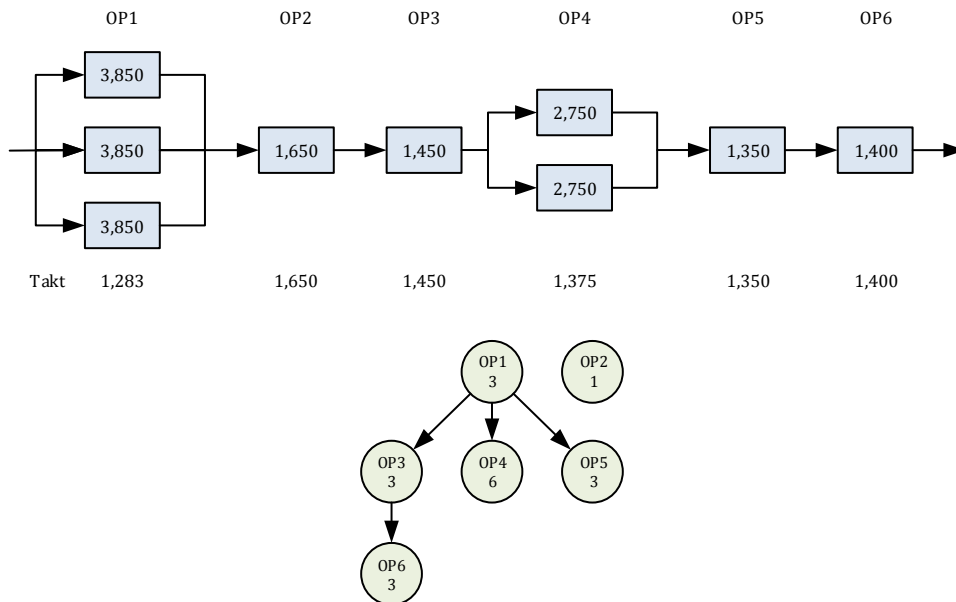
Grafički prikaz mogućih konfiguracija prikazan je u nastavku. Preliminarni popis operacija sadrži i podatke tehnoloških bazi pojedinih operacija pa je time omogućeno formiranje modela distribucije varijabilnosti. Sve konfiguracije sadrže jednak ukupan broj proizvodne opreme pa se za sve konfiguracije može odrediti tehnički stupanj iskoristivosti, prema jednadžbi (4.6)

$$\eta_{\text{teh,sus}} = \frac{\sum_{i=1}^M \eta_{\text{teh},i} \cdot S_{i,\text{int}}}{\sum_{i=1}^M S_{i,\text{int}}} = \frac{7,4107}{9} = 0,8233.$$

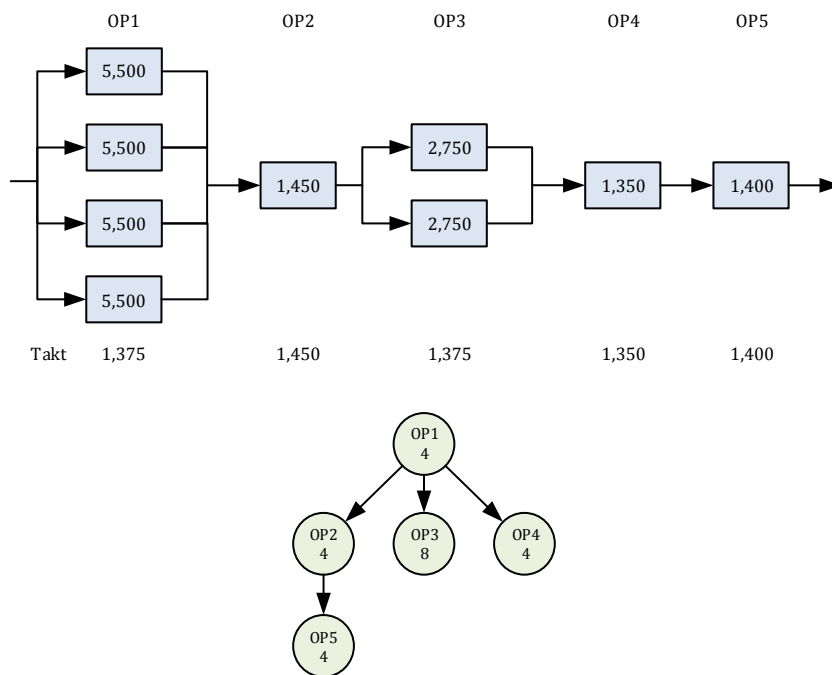
Kako se promjenom konfiguracije mijenja samo struktura sustava, sva proizvodna oprema ostaje identična, za očekivati je da je stupanj ekonomske iskoristivosti opreme jednak za sve konfiguracije, neovisno o konfiguraciji. Ukoliko se pojavi potreba za proizvodnjom veće količine proizvoda od količine koja je inicijalno predviđena (450 kom./d), proizvodni sustav će moći brzo i bez strukturalnih promjena u konfiguraciji povećati proizvodnost onoliko koliko je to dozvoljeno vremenom izvođenja operacije koja predstavlja usko grlo sustava. Pri 100% pouzdanosti opreme sustava, najveću proizvodnost sustava moguće je izračunati putem (7.16), za svaku konfiguraciju posebno, čime se svakoj konfiguraciji daje određena vrijednost, tablica 8.4. Očito je da jedanaesta i dvanaesta konfiguracija imaju mogućnost povećanja proizvodnosti za dodatnih čak 90 kom./d, s potrebnih 450 na mogućih 540. To znači da ukoliko se tržišne potrebe povećaju za toliku količinu, sustav može bez ikakvih dodatnih investicija i bez potrebne rekonfiguracije, gotovo odmah odgovoriti na takve potrebe.



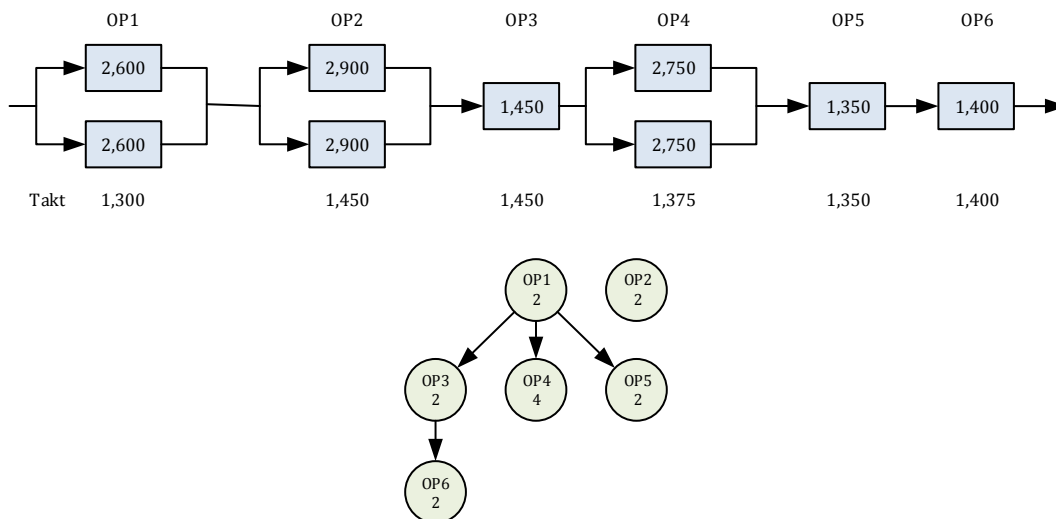
slika 8.3 Prva konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



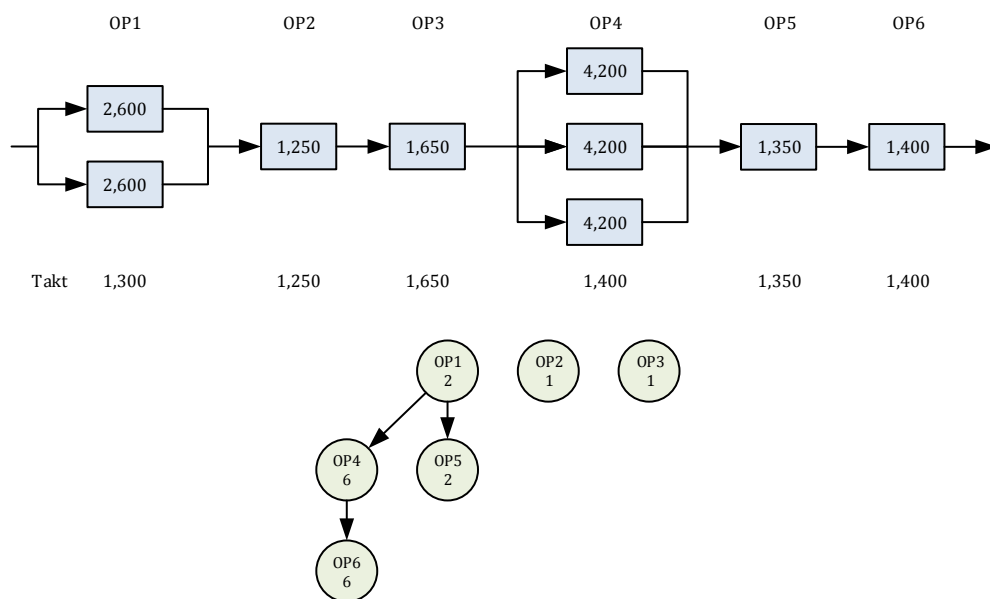
slika 8.4 Druga konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



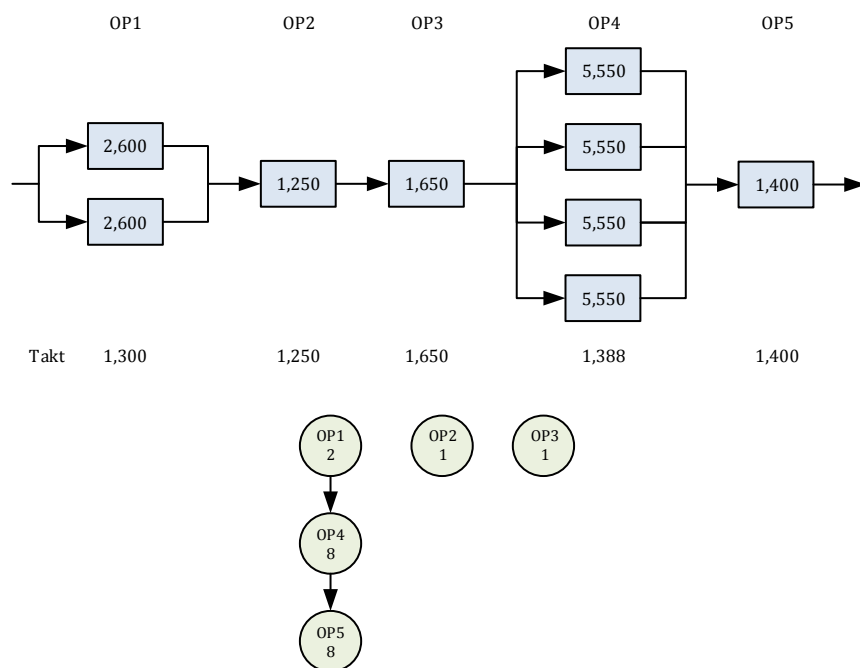
slika 8.5 Treća konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



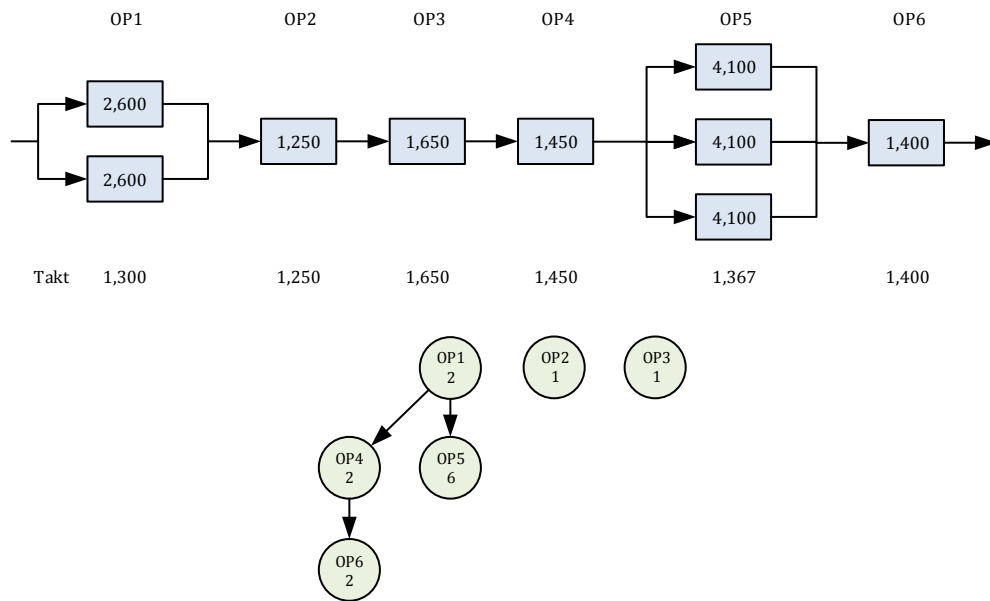
slika 8.6 Četvrta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



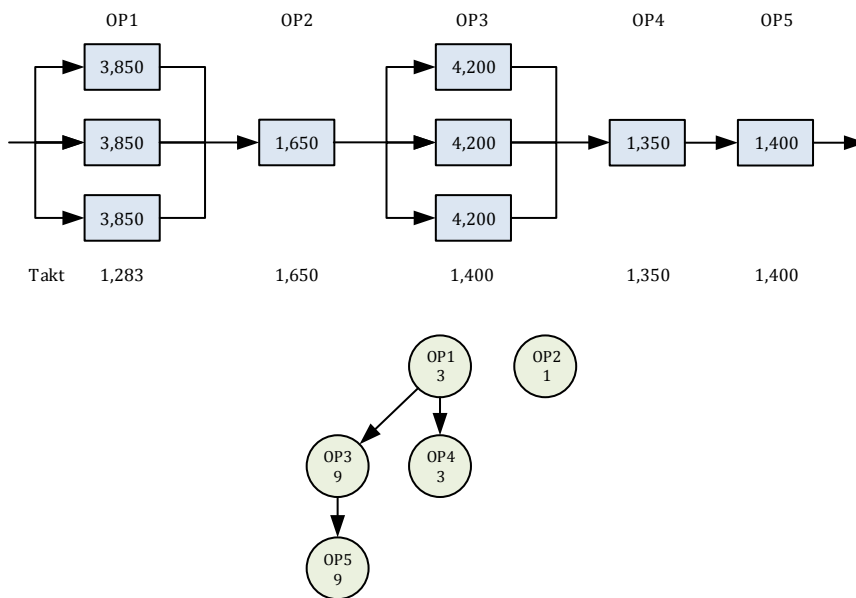
slika 8.7 Peta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



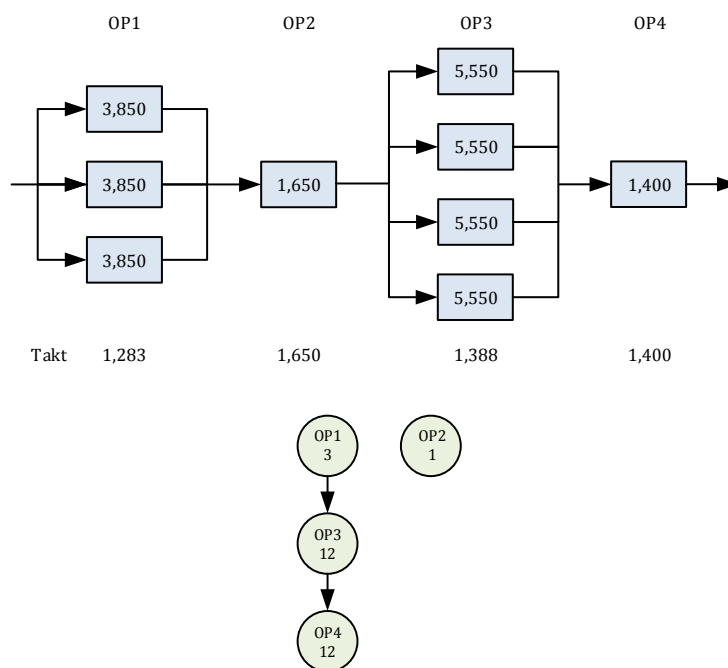
slika 8.8 Šesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



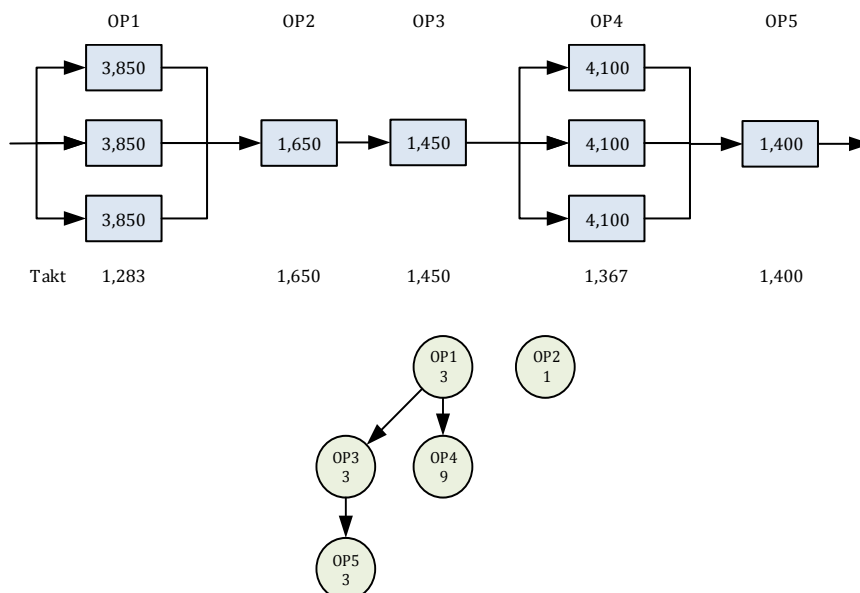
slika 8.9 Sedma konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



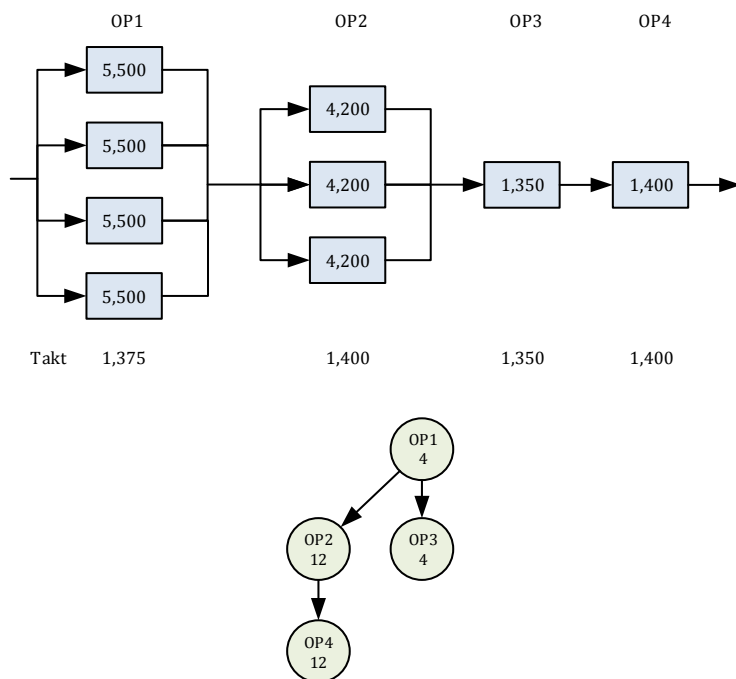
slika 8.10 Osma konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



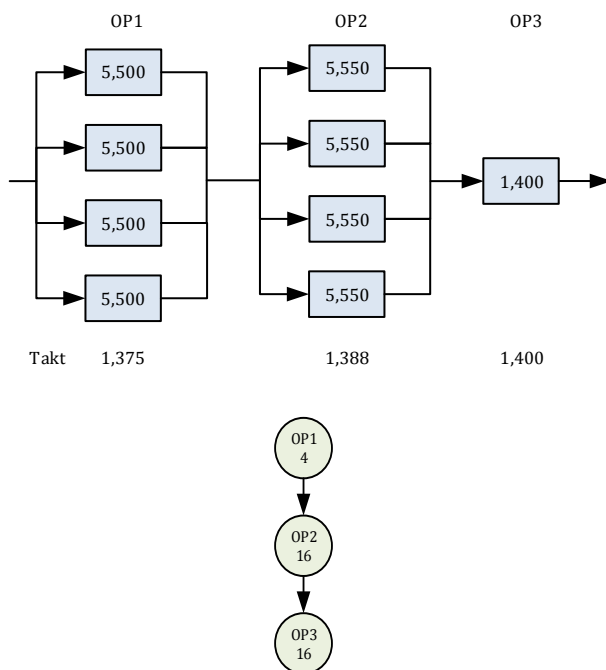
slika 8.11 Deveta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



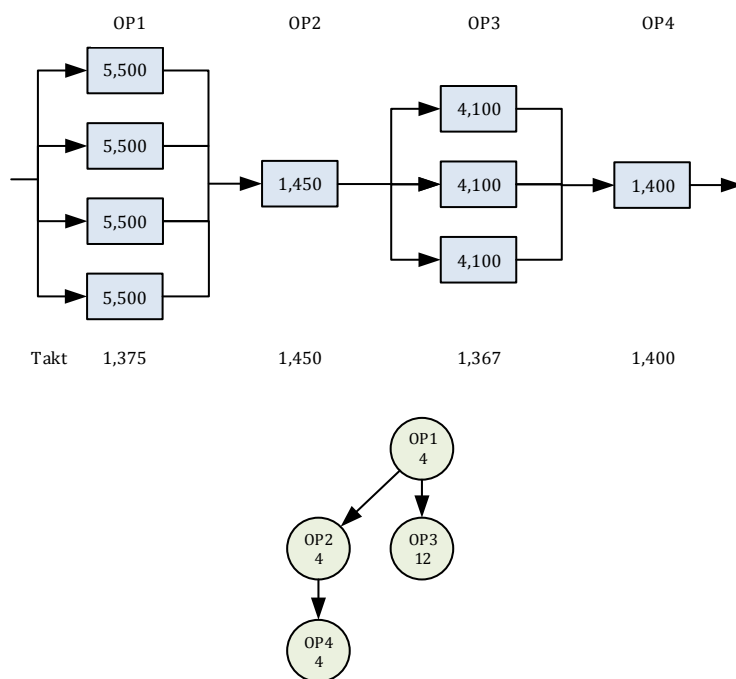
slika 8.12 Deseta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



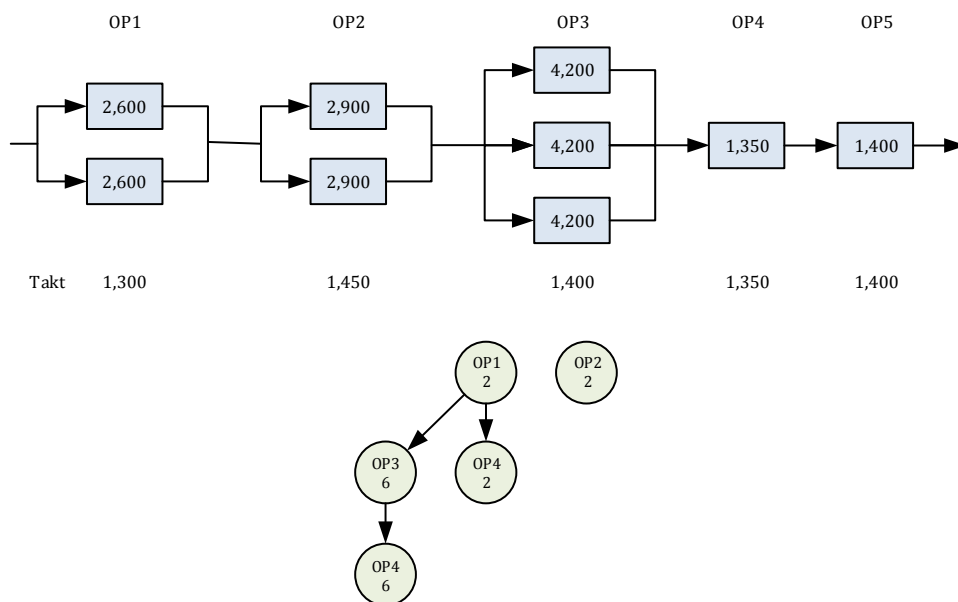
slika 8.13 Jedanaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



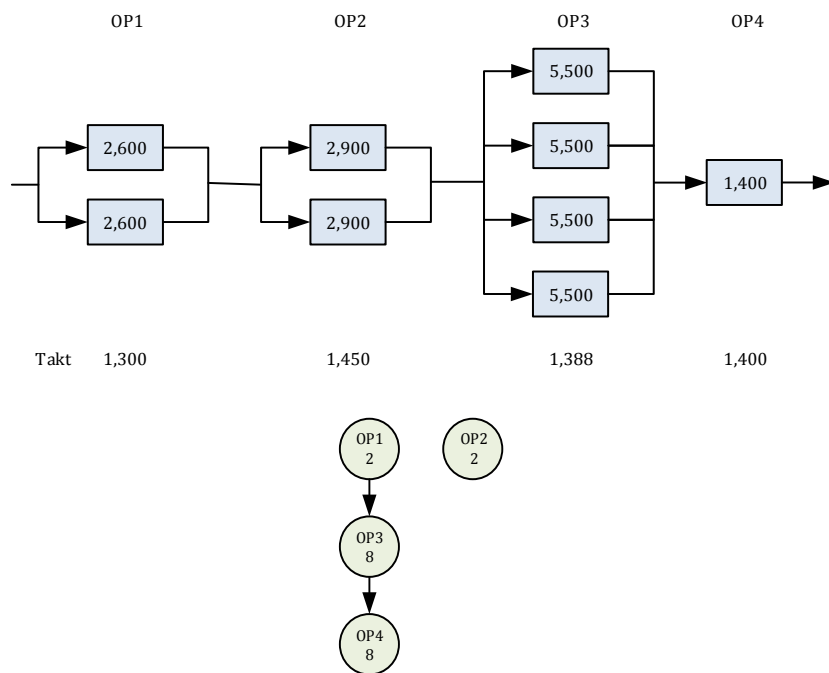
slika 8.14 Dvanaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



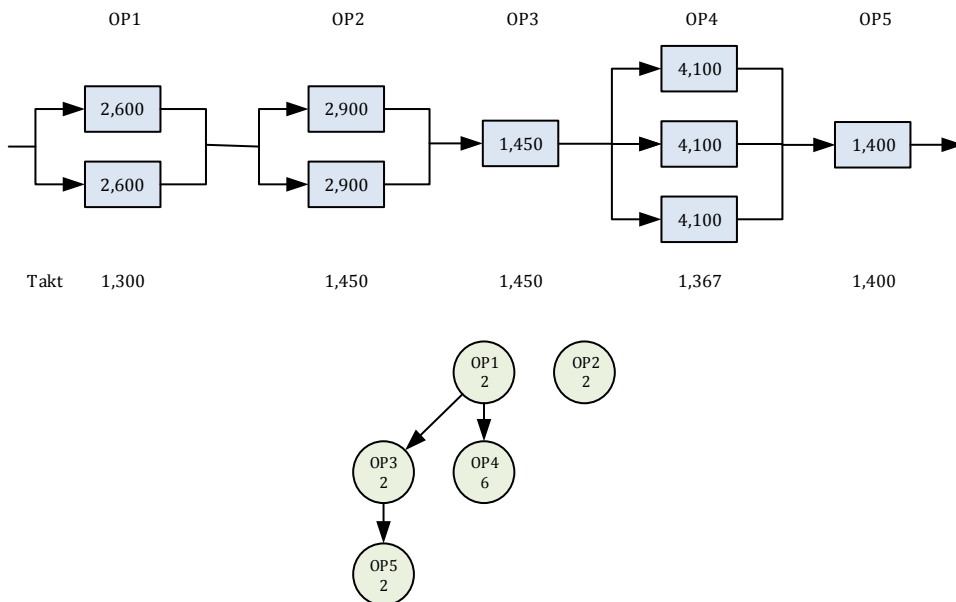
slika 8.15 Trinaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



slika 8.16 Četrnaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



slika 8.17 Petnaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti



slika 8.18 Šesnaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti

tablica 8.4 Vrijednosti konfiguracija

Konfiguracija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Broj putanji kretanja izradaka	4	6	8	8	6	8	6	9	12	9	12	16	12	12	16	12
Broj segmenata procesa (operacija)	7	6	5	6	6	5	6	5	4	5	4	3	4	5	4	5
Trajanje najkraće operacije (min)	1,25	1,28	1,35	1,30	1,25	1,25	1,25	1,28	1,28	1,28	1,35	1,38	1,37	1,30	1,30	1,30
Trajanje najduže operacije (min)	1,65	1,65	1,45	1,45	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,40	1,40	1,45	1,45	1,45	1,45
Broj strojeva na operaciji najduljeg vremena trajanja	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	2	2
Najveća moguća proizvodnost (kom./d)	458	458	521	521	458	458	458	458	458	458	540	540	521	521	521	521
Relativni odnos prema najpovoljnijoj proizvodnosti	85%	85%	96%	96%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	100%	100%	96%	96%	96%	96%
Trajanje najduže operacije nakon dodavanja jednog stroja u sustav (min)	1,45	1,45	1,40	1,45	1,40	1,40	1,45	1,40	1,45	1,45	1,40	1,39	1,40	1,40	1,40	1,45
Proizvodnost nakon dodavanja jednog stroja u sustav (kom./min)	521	521	540	521	540	540	521	540	540	521	540	544	540	540	540	521
Povećanje proizvodnosti dodavanjem jednog stroja	13,8%	13,8%	3,6%	-	17,9%	17,9%	13,8%	17,9%	17,9%	13,8%	-	0,7%	3,6%	3,6%	3,6%	-
Relativni pokazatelj potrebnih prostornih površina	14	18	20	12	18	20	18	15	16	15	16	12	16	15	16	15

Promjenjivost iskazana skalabilnošću očituje se kroz povećanje proizvodnosti dodavanjem jednog stroja na segment uskog grla proizvodnog procesa. Očito je da neke konfiguracije ne dostižu najveću proizvodnost koje iskazuju jedanaesta i dvanaesta konfiguracija čak niti s dodavanjem jednog stroja u sustav, dok dvanaesta konfiguracija ima tek neznatno povećanje proizvodnosti dodavanjem samo jednog stroja iz razloga što su vremena taktova segmenata procesa vrlo ujednačena.

Četvrta i dvanaesta konfiguracija iskazuje najmanju potrebnu efektivnu površinu dok treća i šesta zbog velikih razlika u broju paralelno povezanih strojeva u jednom segmentu proizvodnog procesa iskazuju najveću potrebnu prostornu površinu.

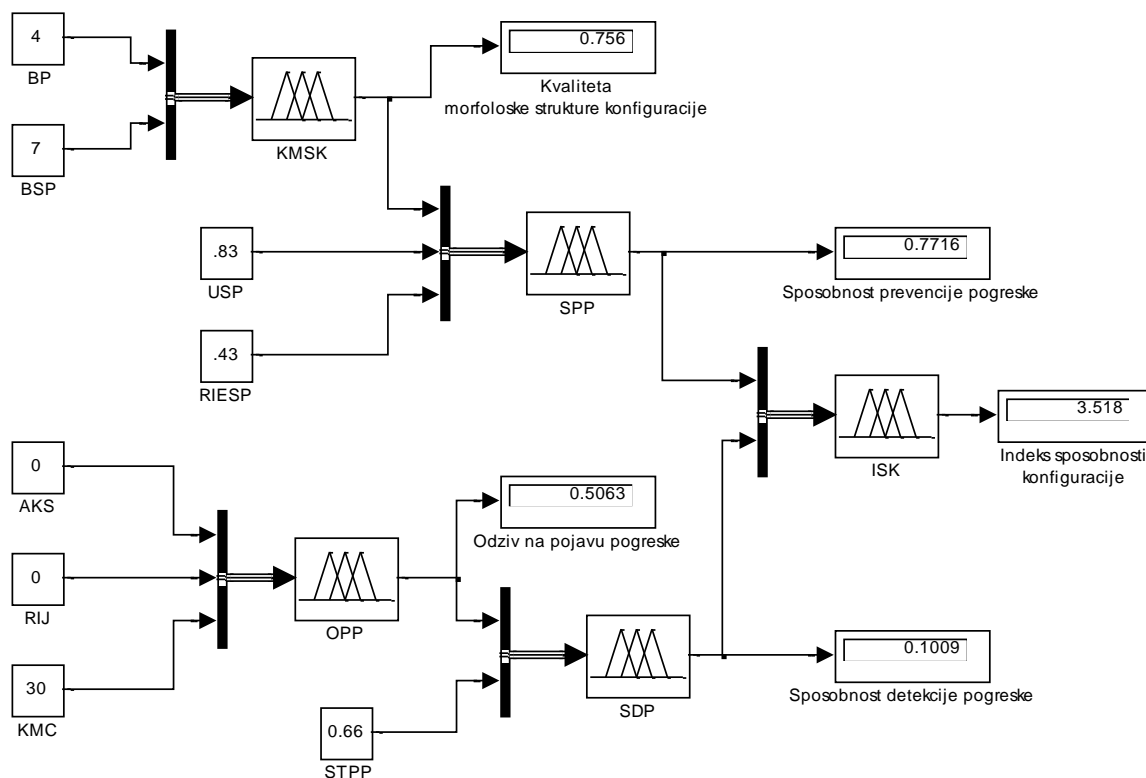
Određene razlike u konfiguracijama postoje i u vidu ukupnog broja teoretskih distribucija varijabilnosti prikazanim modelima distribucije varijabilnosti. Prema tom kriteriju najpovoljnije konfiguracije se čine prva, sedma i šesnaesta koje na operacijama u kojima se obrađuju tehnološke baze za iduće operacije imaju minimalan potreban broj strojeva. Na taj način se u tim konfiguracijama najmanje distribuiraju eventualni pomoci dalje kroz sustav. Pored njih, sve konfiguracije koje imaju najmanje potreban broj strojeva u prvoj diferencijaciji operacija koncepta tehnološkog procesa s kojeg se varijabilnosti mogu distribuirati na oba iduća stezanja, predstavljanju vrijedna rješenja koncepta – četvrta, peta, šesta, četrnaesta i petnaesta.

Za izračun indeksa sposobnosti konfiguracija sustava modelom neizrazite logike korišten je *Matlab* softver te *Simulink* grafičko okruženje u kojem se vizualno jednostavno mogu interpretirati modeli neizrazite logike. Model kakav su predložili Nada et al. (2006.) korišten je kao okvir za izračun povoljnih parametara kontrolnog podsustava kojima je moguće doseći vrijednost ciljanog indeksa sposobnosti konfiguracije $ISK_{cilj} = 3,5$, slika 8.19.

Ukupna sposobnost procesa USP, razina implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka RIESP i razina implementacije Jidoka kao varijable definirane odabranim tehnološkim procesom identične su za sve konfiguracije te stoga varijabla kvalitete morfološke strukture KMSK izravno diktira vrijednost sposobnosti prevencije pogreške SPP.

Prvi set provjera konfiguracija u kojima su kontrolne stanice postavljene nakon svake operacije prikazan je u nastavku, tablica 8.6. Konfiguracije s velikim brojem paralelnih obrada, od jedanaeste do šesnaeste, očekivano pokazuju lošiju kvalitetu svoje morfološke strukture KMSK dok one oblika sličnijeg modelu proizvodne ćelije, poput prve, druge, pete i sedme pokazuju znatno bolje vrijednosti. Iste te konfiguracije zbog povoljne morfološke strukture pokazuju vrlo dobru sposobnost prevencije pogreške ($SPP = 0,77$) pa u slučajevima kad su kontrolne stanice postavljene na svaku operaciju ($AKS = 0$) statistička pogreška provjere optimalnog kontrolnog

pod sustava iznosi $STPP_{opt} = 0,66$ što znači manje opterećenje kontrolnog pod sustava u navedenim konfiguracijama. Ostale konfiguracije iziskuju statističku pogrešku provjere optimalnog kontrolnog pod sustava $STPP_{opt} = 2,05$.



slika 8.19 Model sustava neizrazite logike za izračun Indeksa sposobnosti prve konfiguracije (Matlab, Simulink)

S obzirom na potrebnu veličina pomaka srednje vrijednosti karakteristike koju kontrolni sustav treba registrirati, moguće je odrediti parametre plana kontrole (učestalost uzorkovanja h i veličinu uzoraka n) optimalnog kontrolnog pod sustava za svaku konfiguraciju posebno. Ako je povijesno procijenjeni prosječni interval u kojem proizvodni proces može biti pod kontrolom $IPK = 160$ h, mogu se očitati sljedeći podaci, tablica 8.5.

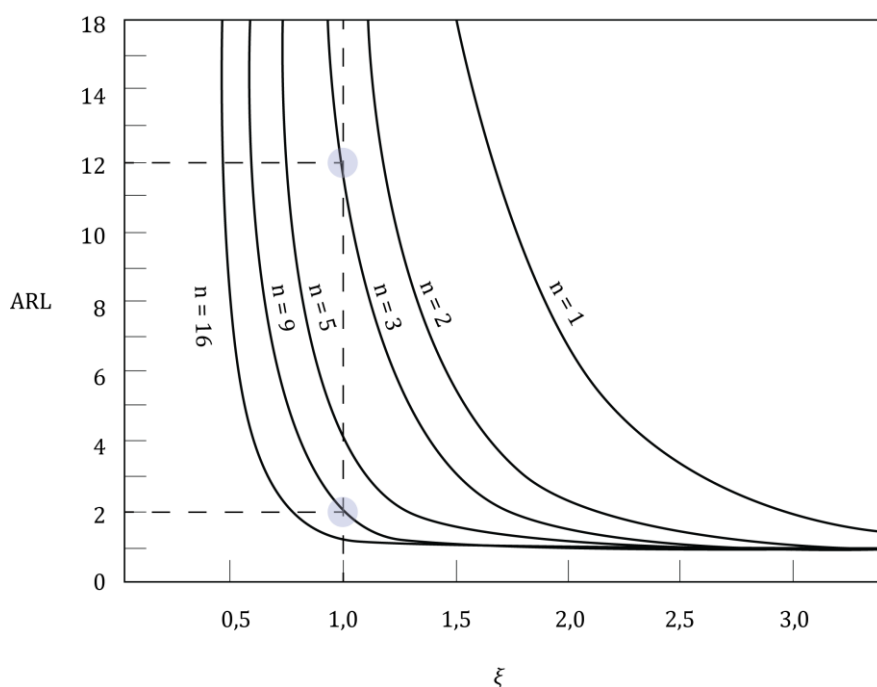
tablica 8.5 Parametri uzorkovanja x -potez kontrolne karte za sve konfiguracije pri $AKS=0$ potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ

	h (h)	IPK/h	ARL (tablica 7.4)	Veličina uzorka n za otkrivanje pomaka 1σ (slika 8.20)
Konfiguracije 1, 2, 5 i 7 ($STPP_{opt} = 0,66$)	1	160	>18	3 kom.
	4	40	12	3 kom.
Konfiguracije 3, 4, 6, 8 ÷ 16 ($STPP_{opt} = 2,05$)	1	160	2	9 kom.
	2	80	<2	>9 kom.

tablica 8.6 Vrijednosti konfiguracija sustava

Konfiguracija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Kvaliteta morfološke strukture konfiguracije, KMSK (Matlab)	0,76	0,51	0,32	0,32	0,51	0,32	0,51	0,23	0,04	0,23	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04
Ukupna sposobnost procesa, USP								0,83								
Razina implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka, RIESP								3 / 7 = 0,43								
Sposobnost prevencije pogreške, SPP (Matlab)	0,77	0,77	0,56	0,56	0,77	0,56	0,77	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Alokacija kontrolnih stanica (AKS)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Razina implementacije Jidoka (RIJ)								0								
Količina izradaka u među-operacijskom čekanju (KMC)	30	20	10	10	30	30	30	20	20	20	7	7	7	10	10	10
Odziv na pojavu pogreške (OPP)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Statistička pogreška provjere (STPP)	0,66	0,66	2,05	2,05	0,66	2,05	0,66	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05
Sposobnost detekcije pogreške (SDP)	0,10	0,10	0,65	0,65	0,10	0,65	0,10	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,66	0,66	0,66	0,66
Indeks sposobnosti konfiguracije (ISK)	3,52	3,52	3,53	3,53	3,52	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53	3,53
Ukupan broj teoretskih distribucija varijabilnosti (iz modela distribucija varijabilnosti)	14	19	24	14	18	20	14	25	28	19	32	36	24	18	20	14

Podaci ukazuju na to da optimalni konceptualni modeli kontrolnih podsustava konfiguracija s većom sposobnosti prevencije pogreške (kao što su prva, druga, peta i sedma), uz učestalost uzorkovanja u intervalima od 4 sata i alokaciju kontrolnih stanica nakon svake operacije $AKS = 0$, iziskuju prosječnu duljinu protoka \bar{x} kontrolne karte $ARL = 12$. To znači da postoji dobra mogućnost da se sa standardnim veličinama uzorka od $n = 3$ otkrivaju pomaci veličine 1σ , slika 8.20. S druge strane, optimalni konceptualni modeli kontrolnih podsustava ostalih konfiguracija uz puno kraći interval uzorkovanja od samo 1 sat iziskuju potrebnu prosječnu duljinu protoka $ARL = 2$ te je za detektiranje istog pomaka potrebno koristiti uzorke reda veličine $n = 9$, slika 8.20.

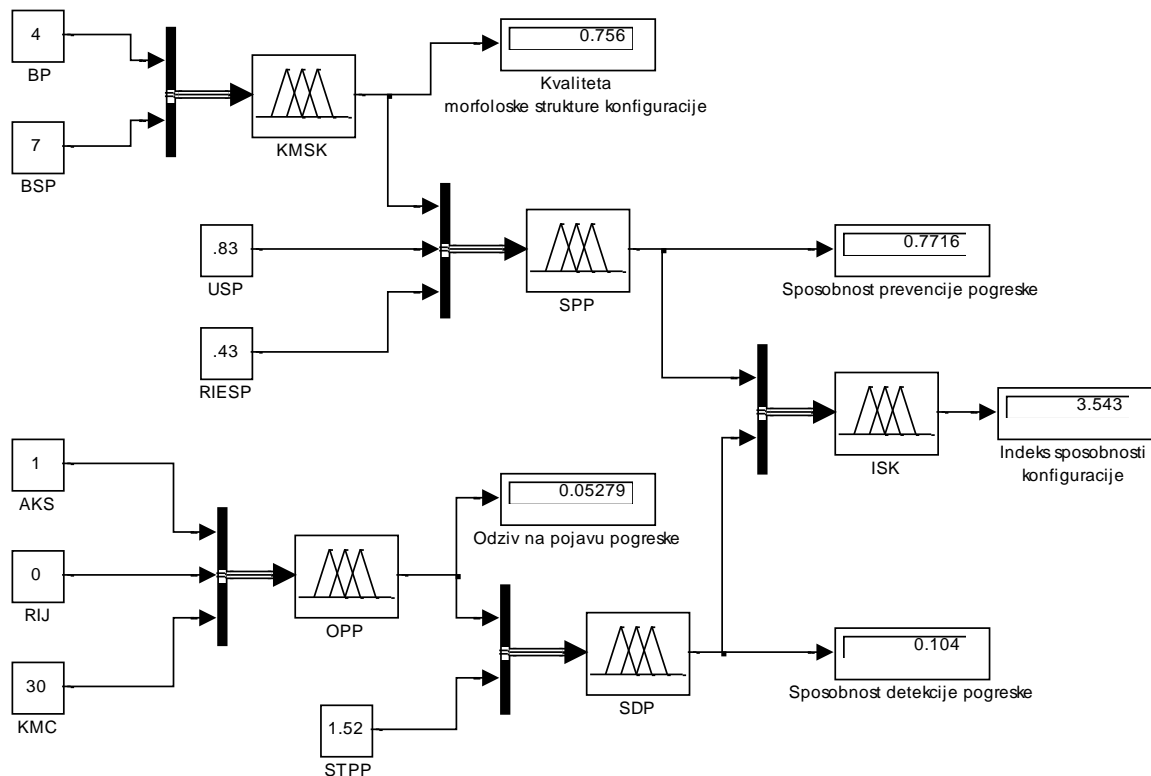


slika 8.20 Prosječna duljina protoka (uzoraka) ARL x -potez kontrolne karte s 3-sigma granicama potreban da bi se detektirao pomak veličine 1σ

Ukoliko se implementira prva ili treća strategija kontrole kvalitete (kontrola svih putanji kretanja izradaka nakon svake operacije), ukupan broj teoretskih distribucija varijabilnosti očitani iz modela distribucija varijabilnosti predstavlja potreban broj kontrolnih karti pojedine konfiguracije. Promotri li se veličina uzorka i učestalost izvođenja statističkog testa moguće je odrediti količinu izradaka koje je potrebno kontrolirati. Primjerice, optimalni konceptualni model kontrolnog podsustava za prvu konfiguraciju pokazuje kako je potrebno održavati ukupno 14 kontrolnih karti u cijelom proizvodnom sustavu. Kako bi se otkrio pomak veličine 1σ , u kontrolne karte je potrebno svaka 4 sata (dva puta na smjenu) upisivati rezultate statističkog testa na osnovi uzorka veličine 3 što predstavlja potrebu za $2 \times 3 \times 14 = 84$ mjerenja u toku jedne osam-satne smjene. Za usporedbu, treća konfiguracija zbog zahtjeva za većom vrijednosti varijable $STPP_{opt}$

optimalnog kontrolnog podsustava tj. manjom vjerojatnosti pogreške provjere bi imala potrebu za čak $8 \times 9 \times 24 = 1728$ mjerenja u toku smjene što zapravo znači 100%-tnu kontrolu za procijenjeni interval kada proces može biti pod kontrolom $IPK = 160$ h. Ovakvi rezultati ukazuju kako bi za konfiguracije poput četvrte prikladan oblik opreme bila neka vrsta posvećene kontrolne opreme, specijalizirane za mjerenje potrebnih karakteristika izradaka. U cilju izbjegavanja takve 100%-tne kontrole procesa moguće je povećati razinu implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka kako bi se povećala sposobnost prevencije pogreške ili razinu Jidoka u kako bi se povećala sposobnost detekcije pogreške. Obje intervencije u sustav predstavljaju dodatna investicijska ulaganja u opremu.

Promotrite li se slučajevi u kojem se samo nakon posljednje operacije nalazi kontrolna stanica, tj. $AKS = 1$, samo prva, druga, peta i sedma konfiguracija uz statističku pogrešku provjere optimalnog kontrolnog podsustava $STPP_{opt} = 1,52$ mogu ostvariti dovoljan indeks sposobnosti konfiguracije $ISK = 3,54$, slika 8.21. Ostale konfiguracije zbog lošeg odziva na pojavu pogreške uzrokovanog takvom nepovoljnom alokacijom kontrolnih stanica ne mogu osigurati ciljani indeks sposobnosti konfiguracije $ISK_{cilj} = 3,5$.

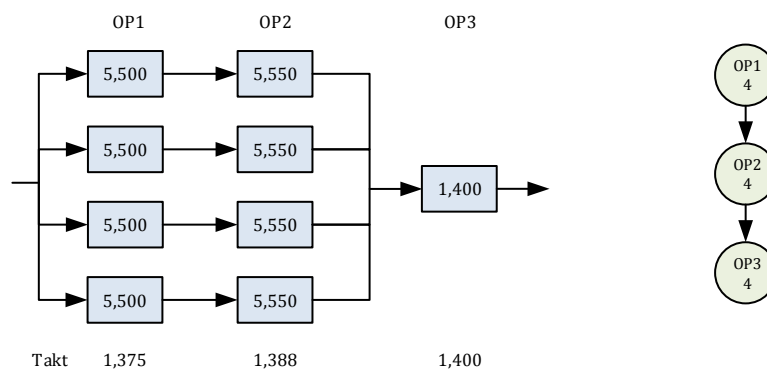


slika 8.21 Model sustava neizrazite logike za izračun Indeksa sposobnosti prve konfiguracije (*Matlab, Simulink*)

Kako bi se ipak osigurala dovoljna vrijednost indeksa sposobnosti konfiguracije ISK, preostalim je konfiguracijama potrebno osigurati veći broj kontrolnih stanica ili povećati razinu implementacije

Jidoka što ponovno predstavlja dodatna investicijska ulaganja u opremu sustava. Između dva krajnja slučaja alokacije kontrolnih stanica, alokacija može biti onolika kolika je dovoljna za praćenje za kvalitetu posebno važnih operacija, primjerice onih na kojima se formiraju tehnološke baze izradaka na operacijama koje slijede.

Implementacija četvrte strategije kontrole kvalitete kojom se kontroliraju sve putanje sustava ali samo onoliko njih koliko je potrebno da se njima obuhvati sva paralelno povezana proizvodna oprema čini se vrlo pogodnom za dvanaestu konfiguraciju. Ta je konfiguracija posebna po tome što sadrži samo tri operacije, a u prve dvije operacije postoji jednak broj od ukupno 4 paralelno povezanih proizvodnih kapaciteta. Ukoliko se te dvije operacije povežu serijski tako da na bilo koju proizvodnu opremu koja izvodi operaciju OP2 uvijek stižu izradci s pripadajuće proizvodne opreme koja izvodi operaciju OP1 dvanaesta konfiguracija može poprimiti sljedeći oblik, slika 8.22.



slika 8.22 Dvanaesta (a) konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti

Na taj način je smanjen broj putanji sa 16 na samo 4 pa kvaliteta morfološke strukture ove konfiguracije iznosi relativno visokih $KMSK = 0,79$. Time je omogućeno da statistička pogreška provjere optimalnog kontrolnog podsustava iznosi $STPP_{opt} = 0,66$ što je identična vrijednost onima za konfiguracije 1, 2, 5 i 7. No, ovakva je konfiguracija osjetljiva na skalabilnost jer se na eventualne zahtjeve za povećanjem proizvodnosti mora odgovarati na način da se dodaju po jedan proizvodni kapacitet na prve dvije operacije istodobno, kako bi se zadržala prednost visoke kvalitete morfološke strukture.

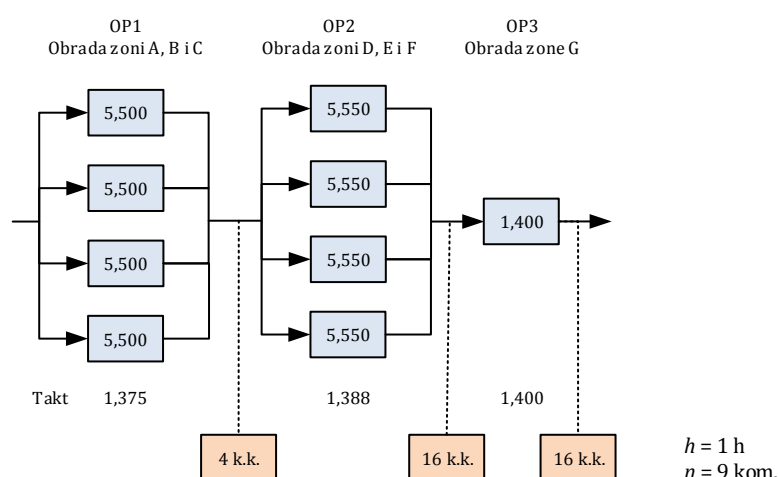
8.1 Odabir konfiguracije i usporedba rezultata

Pristupi li se vrednovanju svih konfiguracija prema njihovim komparativnim značajkama na način kakav su predložili Koren i Shiptalni (2010.) iste se mogu rangirati na sljedeći način, tablica 8.7. Ovakva rangiranja su subjektivna i ovise o tome koliko su projektantima, sukladno politici

proizvodne organizacije, važne pojedine značajke. Ukoliko su proizvodnost i potrebne površine prioritet, moguć odabir prema Korenu i Shiptalnju bila bi dvanaesta (i alternativno četvrta, jedanaesta i četrnaesta) konfiguracija iako ista ima relativno slabu vrijednost promjenjivosti i zahtjeva nešto veća investicijska ulaganja zbog složenog sustava upravljanja materijalom između operacija. S te dvije konfiguracije je moguće povećati proizvodnost do čak 540 kom./d bez ikakvih dodatnih ulaganja u sustav što može biti velika prednost ukoliko se procijeni da bi potrebe tržišta mogle varirati u tolikoj mjeri. Dvanaesta konfiguracija s pripadajućim kontrolnim podsustavom prikazana je u nastavku, slika 8.23 i slika 8.24.

tablica 8.7 Rang konfiguracija po pojedinim značajkama

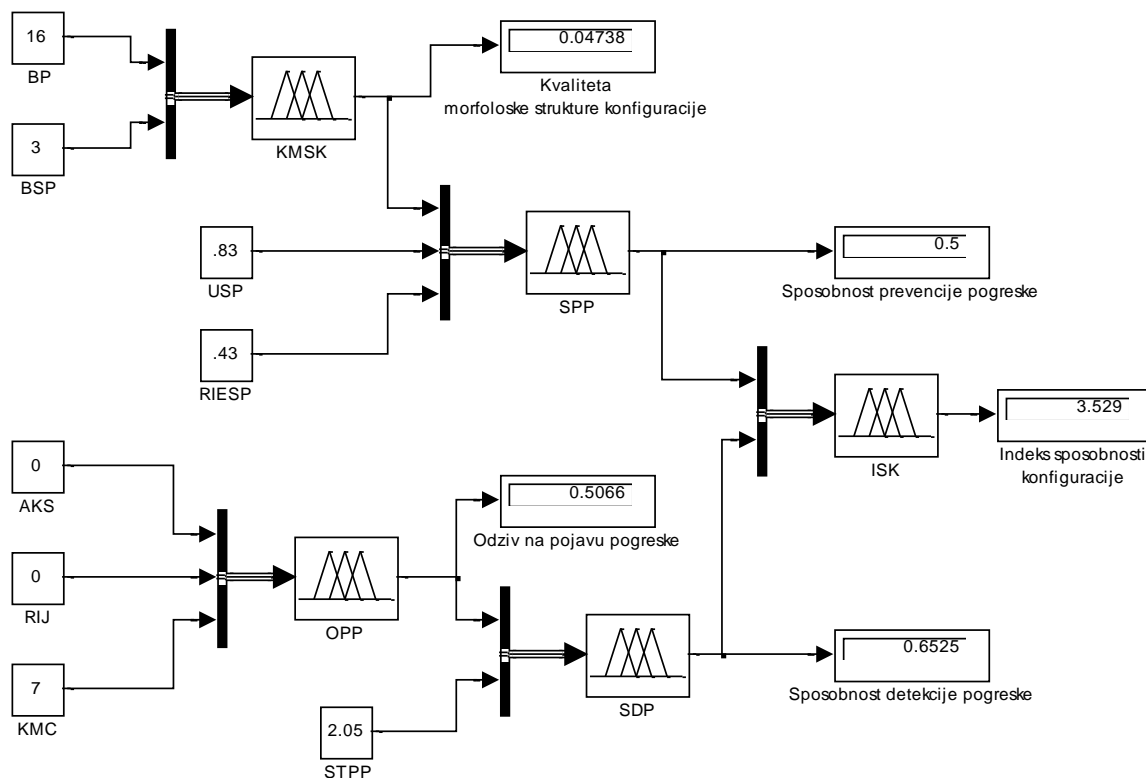
Konfiguracija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12a	13	14	15	16
Najveća proizvodnost	9	9	3	3	9	9	9	9	9	9	1	1	1	3	3	3	3
Investicijska ulaganja	1	1	2	1	1	2	2	3	3	2	3	3	3	3	2	3	3
Promjenjivost (skalabilnost)	5	5	9	14	1	1	5	1	1	5	14	13	13	9	9	9	14
Potrebne površine	3	12	15	1	12	15	12	4	8	4	8	1	1	8	4	8	4



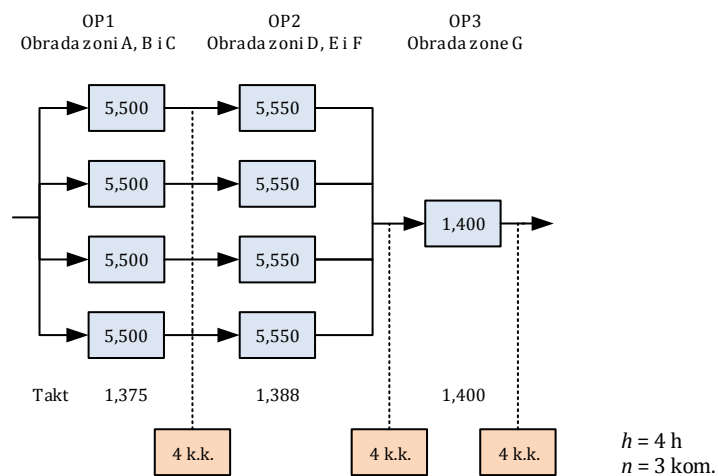
slika 8.23 Dvanaesta konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava za IPK = 160 h, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x-potez kontrolnom kartom s 3-sigma granicama

Značajke dvanaeste konfiguracije u modificiranom obliku s oznakom (a) (slika 8.25) obuhvaćaju najbolje ukupne vrijednosti jer zadržavajući sve prednosti proizvodnosti i minimalne potrebne površine pokazuju nisko opterećenje kontrolnog podsustava kao i vrlo malu distribuciju varijabilnosti kroz sustav. Svojstvo skalabilnosti je uvjetno zadržano jer je najdulji takt operacije na posljednjoj, trećoj operaciji. Dodavanjem dodatnog proizvodnog kapaciteta na taj segment proizvodnje povećala bi se proizvodnost s 540 na 544 kom./d što predstavlja povećanje od samo 0,7%, iz razloga što su taktovi preostalih operacija (1,388 min i 1,375 min) trajanjem vrlo blizu

najduljem taktu operacija (1,40 min) pa bi za svako daljnje povećanje proizvodnosti bilo potrebno osigurati još dodatna dva proizvodna kapaciteta za te dvije operacije. Ovakav poseban oblik konfiguracije predstavlja kombinaciju tradicionalnih linijskih oblika konfiguracija proizvodnih sustava i paralelnih konfiguracija sustava.

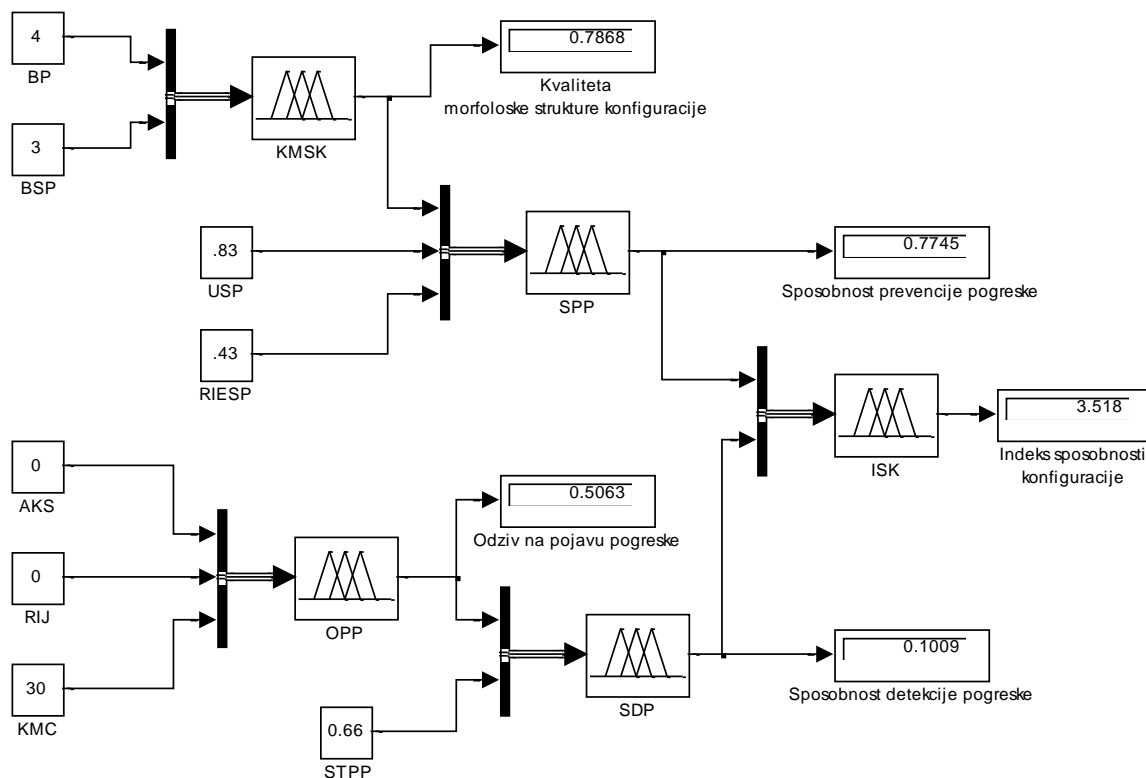


slika 8.24 Model sustava neizrazite logike za izračun Indeksa sposobnosti dvanaeste konfiguracije (Matlab, Simulink)



slika 8.25 Dvanaesta (a) konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava za IPK =160 h, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x -potez kontrolnim kartama s 3-sigma granicama

Kako se modifikacijom dvanaeste konfiguracije četverostruko smanjuje broj putanji kretanja izradaka kroz sustav ($BP_{12a} = 4$), a time i povećava sposobnost prevencije pogreške, uz postavljanje kontrolne stanice nakon svake operacije ($AKS = 0$) statistička pogreška provjere optimalnog kontrolnog podsustava iznosi $STPP_{opt} = 0,66$ čime se postiže indeks sposobnosti konfiguracije $ISK_{12a} = 3,52$, slika 8.26. Takva vrijednost $STPP_{opt}$ omogućuje da optimalni kontrolni podsustav bude manje opterećen od onog nemodificirane dvanaeste konfiguracije, osiguravajući ciljani indeks sposobnosti konfiguracije $ISK_{cilj} > 3,5$ uz izvođenje statističkog testa svakih 4 sata uzorcima veličine 3.



slika 8.26 Model sustava neizrazite logike za izračun Indeksa sposobnosti modificirane, dvanaeste (a) konfiguracije (*Matlab, Simulink*)

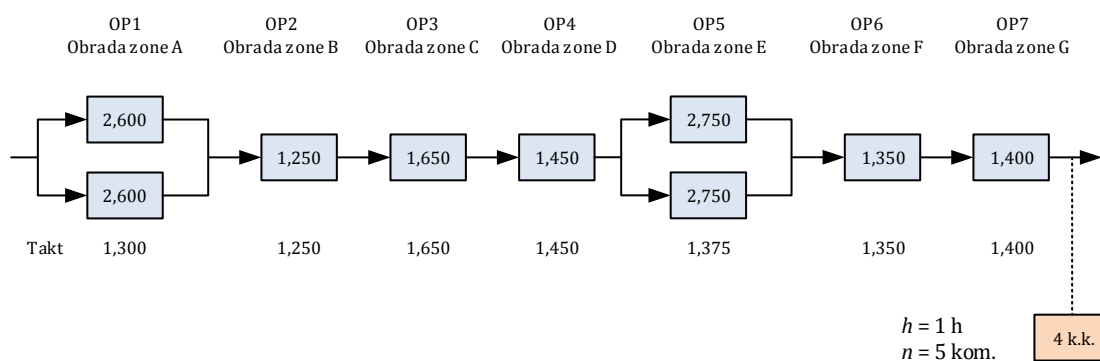
Promotrite li se dodatne značajke koje su u ovom radu razmatrane, poput sposobnosti prevencije pogreške i distribucije varijabilnosti kroz sustav, ističu se prva i sedma konfiguracija, koje zbog minimalnog potrebnog broja paralelno povezanih proizvodnih kapaciteta na segmentima u kojima se formiraju tehnološke baze na idućim operacijama, omogućavaju nižu opterećenost kontrolnog podsustava zbog manjeg potrebnog broja kontrolnih karti, tablica 8.8.

Kako je navedeno, prva, druga, peta i sedma konfiguracija omogućavaju postavljanje samo jedne kontrolne stanice na kraju proizvodnog procesa tj. $AKS = 1$ pri čemu je statistička pogreška provjere optimalnog kontrolnog podsustava $STPP_{opt} = 1,52$. Potrebna vrijednost ARL može se

očitati tablično (tablica 7.4) te za uzorkovanje svakog sata ($h = 1$ h) iznosi $ARL = 5$. Očitana potrebna veličina uzorka za navedenu vrijednost ARL pri otkrivanju pomaka 1σ iznosi $n = 5$ (slika 8.20). Primjer takvog slučaja prve konfiguracije sa samo jednom kontrolnom stanicom prikazan je u nastavku, slika 8.27.

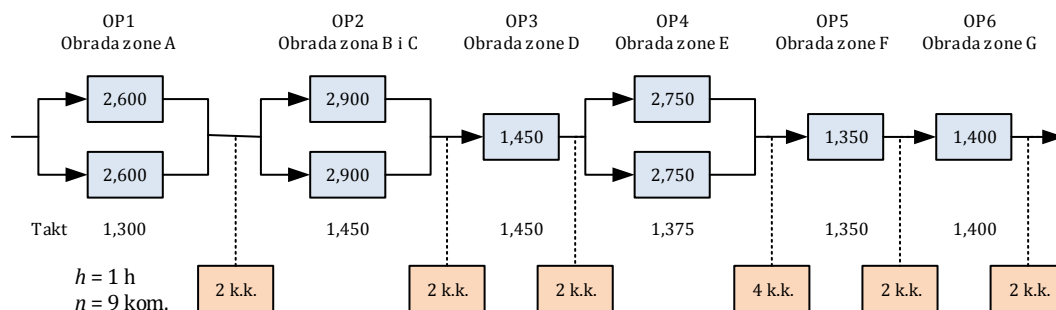
tablica 8.8 Rang konfiguracija po pojedinim značajkama

Konfiguracija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12a	13	14	15	16
Sposobnost prevencije pogreške	1	1	5	5	1	5	1	8	8	8	8	8	1*	8	8	8	8
Distribucija varijabilnosti	1	7	11	1	5	9	1	13	14	7	15	16	1*	11	5	9	1



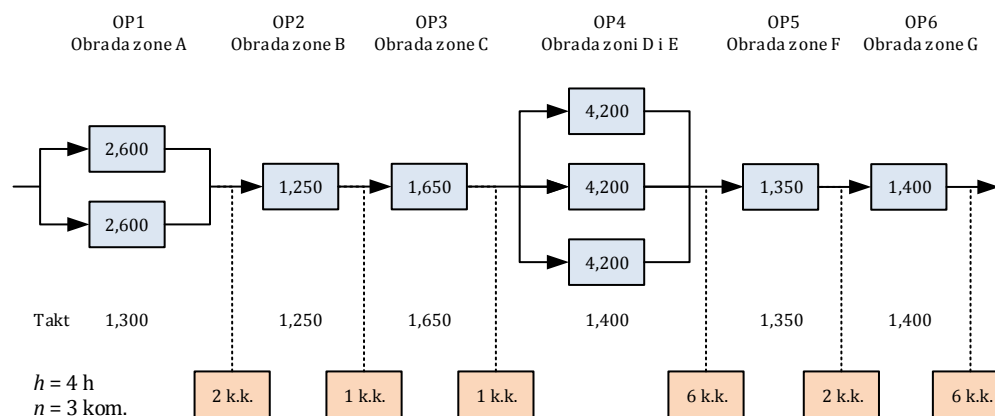
slika 8.27 Prva konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava kojeg čini samo jedna kontrolna stanica, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x-potez kontrolnom kartom s 3-sigma granicama (uz $IPK=160$ h)

Ako se uzmu sve značajke u obzir, četvrta konfiguracija posjeduje određene kvalitete. Primjerice, iako nema najveću moguću proizvodnost, ona je tek neznatno manja od najveće proizvodnosti koju pružaju jedanaesta i dvanaesta konfiguracija (521 kom./d umjesto 540 kom./d). Investicijska ulaganja su među najmanjima kao i potrebna efektivna prostorna površina. Distribucija varijabilnosti pri tome je minimalna, slika 8.28.



slika 8.28 Četvrta konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava za $IPK = 160$ h, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x-potez kontrolnom kartom s 3-sigma granicama

Peta konfiguracija isto pokazuje određene prednosti. Iako nema najpovoljniju značajku proizvodnosti, njena značajka skalabilnosti omogućava da se dodavanjem jednog stroja u sustav proizvodnost poveća za gotovo 18%. Povoljna varijabla statističke pogreške provjere optimalnog kontrolnog podsustava $STPP_{opt} = 0,66$ pokazuje nižu opterećenost kontrolnog podsustava uz relativno prihvatljivu distribuciju varijabilnosti kroz sustav.



slika 8.29 Peta konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava za $IPK = 160$ h, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x-potez kontrolnom kartom s 3-sigma granicama

Metoda vrednovanja pojedinih konfiguracija sustava kakvu su predstavili Koren i Shiptalni (2010.) na ovaj je način obogaćena trećim ciljem projektiranja proizvodnih sustava - kvalitetom, kako su to predložili Inman et al. (2003.). U kojoj mjeri uključivanje dodatnog cilja projektiranja utječe na odabir konfiguracije sustava ilustrirano je u nastavku, tablica 8.9.

tablica 8.9 Usporedba rezultata odabira konfiguracija (● – primarni odabir, ○ - alternative)

Konfiguracija	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12a	13	14	15	16
Koren i Shiptalni				○							○	●					
Novorazvijena metoda					○								●				

Konačna odluka o odabiru konfiguracije na osnovi predloženih značajki leži u strategiji poduzeća/proizvodne organizacije, ovisno o njihovim potrebama i ciljevima, no navedeni rezultati daju naslutiti da se predloženom metodom broj konfiguracija između kojih se vrši izbor znatno sužava.

9 ZAKLJUČAK

Provedeno znanstveno istraživanje zasnovano je na spoznajama objavljenim u stručnoj i znanstvenoj literaturi iz područja projektiranja proizvodnih sustava i upravljanja kvalitetom. Pri tome su korištena iskustva koja su objavili relevantni teoretičari i praktičari iz navedenih područja.

Uspostavljanje jednog novog proizvodnog sustava obično zahtijeva vrlo visoku kapitalnu investiciju. Stoga su sistematike njihovog ranog projektiranja vrlo bitne kako bi se u ranoj fazi procijenile određene značajke pojedinih varijanti proizvodnog sustava. Pri tome se rana procjena značajki ne odnosi samo na vrijednost investicije, već i ostalih očekivanih značajki novoprojektiranog sustava kao što su proizvodnost, promjenjivost i kvaliteta. Pri tome je posljednjih godina vrlo značajan postao utjecaj promjenjivog i što je još važnije - nepredvidivog tržišta koje fluktuacijama potreba za različitim modelima proizvoda i njihovim potrebnim količinama predstavlja pravi izazov za projektante. Pred projektantima je često zadatak projektiranja proizvodnog sustava koji će proizvoditi ne samo proizvod koji se trenutno planira plasirati na tržište, nego vjerojatno i nekoliko generacija proizvoda koji će slijediti nakon njega, uz vremenski promjenjive tržišne količine. U takvom je okruženju važno projektirati proizvodne sustave oko jedne obitelji proizvoda koje povezuju njihove tehnološke sličnosti te oko tih tehnoloških sličnosti projektirati sustav.

Rana procjena razine kvalitete kao jedne od izlaznih značajki proizvodnog sustava može pomoći pri sprječavanju naknadnih troškova popravaka izradaka, smanjenju internih i vanjskih troškova proizvodnje i isporuke izradaka nesukladnih s njihovim tehničkim specifikacijama. Tradicionalnim pristupima projektiranja, odluka o strategiji kontrole kvalitete proizvodnog sustava uglavnom je rezervirana za kasnije faze projektiranja koje slijede nakon odabira koncepta proizvodnog sustava. Nepoznavanje očekivane razine kvalitete projektiranog sustava, odnosno

čekanje da se sustav implementira i pusti u pogon prije nego li se formiraju strategije njegove statističke kontrole može dugoročno rezultirati povećanim troškovima ali i duljim ukupnim vremenom projektiranja.

9.1 Osvrt na provedeno istraživanje i rezultate

U radu je napravljen pregled dominantnih modela proizvodnih sustava s posebnim naglaskom na rekonfigurabilne proizvodne sustave. Intenzivna istraživanja rekonfigurabilnih proizvodnih sustava kao modela kakvim je moguće odgovoriti na nepredvidive i promjenjive tržišne zahtjeve pokazuju kako je fokus tih istraživanja uglavnom na značajkama proizvodnosti i promjenjivosti sustava te investicijskim ulaganjima. Osiguranje potrebnih vrijednosti promjenjivosti sustava, prvenstveno skalabilnosti, često nameće potrebu za projektiranjem sustava koji sadrže više potpuno identičnih, paralelno povezanih proizvodnih kapaciteta na istoj operaciji proizvodnog procesa. Svi takvi proizvodni sustavi se zbog oblika putanji kretanja materijala kroz sustav zajednički nazivaju serijsko-paralelnim višesegmentnim proizvodnim sustavima. Kao posljedica toga, karakteristike proizvoda su često pod utjecajem efekta paralelnih obrada s čime se povećava vjerojatnost da će ključne karakteristike proizvoda imati veću varijabilnost od onih proizvedenih u sustavu bez paralelnih obrada. S druge strane, moderna definicija poboljšanja kvalitete koja definira poboljšanje kvalitete kao smanjenje varijabilnosti u procesima i proizvodima nameće zaključak kako su promjenjivost i kvaliteta međusobno konkurirajući ciljevi projektiranja proizvodnog sustava.

Statistička kontrola kvalitete je široko obuhvaćeno područje u literaturi koje je u potpunosti rezervirano za kasnu fazu projektiranja proizvodnih sustava. Znanja iz tog područja, točnije o načinu određivanja vjerojatnosti pogrešnog statističkog zaključivanja, u ovom su radu korištena kako bi se formirala metoda projektiranja optimalnog kontrolnog podsustava. Oblikovanje optimalnog konceptualnog modela kontrolnog podsustava zasniva se na sustavu neizrazite logike za izračun indeksa sposobnosti konfiguracije proizvodnog sustava, kojeg su predložili Nada et al. (2006.), a koji je u svojoj osnovi prilagođen 100%-tnoj kontroli karakteristika proizvoda i predviđa subjektivnu procjenu projektanta o vjerojatnosti pogreške mjernog uređaja. U radu je predloženo uvođenje nove ulazne varijable u takav sustav neizrazite logike čime je omogućeno povezivanje parametara plana kontrole (veliĉine uzoraka, učestalosti uzorkovanja i veliĉine pomaka kojeg je potrebno otkriti) s vjerojatnošću pogrešnog statističkog zaključivanja o stanju procesa, a time i određivanje potrebnih parametara plana kontrole za dostizanje ciljanog indeksa sposobnosti konfiguracije koji je definiran projektnim zadatkom. Predložena metoda optimiranja konceptualnog modela kontrolnog podsustava pretpostavlja da se kontrolnim podsustavom prate

karakteristike proizvoda Shewhartovim kontrolnim kartama što je česta praksa u prvoj fazi implementacije statističke kontrole procesa. CUSUM i EWMA kontrolne karte su prikladnije za otkrivanje manjih pomaka karakteristika i kao takve se koriste u drugoj fazi implementacije statističke kontrole procesa kad se proizvodni sustav nalazi pod kontrolom značajno duži period, a veličine pomaka karakteristike koje je potrebno otkriti su manje od onih u prvoj fazi.

Predloženom metodom projektiranja optimalnog konceptualnog modela kontrolnog podsustava moguće je stvoriti širu sliku o konceptu proizvodnog sustava koju se na sistematski način može prikazati kroz njegove značajke. Promjenom konfiguracije proizvodnog sustava mijenjaju se i određene značajke sustava, poput broja putanji kretanja izradaka kroz sustav i ukupnog broja segmenata sustava, čime se utječe na razinu sposobnosti takvog sustava da spriječi nastanak pogreške, najčešće zbog efekata paralelnih obrada. U slučajevima smanjene sposobnosti prevencije pogreške potrebno je povećati sposobnost detekcije pogreške, putem intenzivnije alokacije kontrolnih stanica i povoljnije vrijednosti pogreške statističke provjere, a kako bi se dostigao ciljani indeks sposobnosti konfiguracije. Na taj način opisana metoda definira princip po kojem koncepti proizvodnih sustava s niskom sposobnošću prevencije pogreške trebaju biti kompenzirani pripadajućim kontrolnim podsustavom koji pruža veću sposobnost detekcije pogreške tj. ima manju vjerojatnost pogrešnog statističkog zaključivanja o stanju procesa.

Pored sposobnosti prevencije pogreške, značajan utjecaj na opterećenost kontrolnog podsustava ima i distribucija varijabilnosti kroz sustav. Složene distribucije varijabilnosti obično su posljedica višestrukih paralelnih obrada ključnih karakteristika proizvoda ili karakteristika koje predstavljaju tehnološke baze u operacijama proizvodnog procesa koje slijede. Na taj se način varijabilnost u sustavu višestruko povećava i predstavlja dodatno opterećenje za kontrolni podsustav. U radu su predstavljene i strategije kontrole kvalitete te njihove specifičnosti. Iako često (neprikladno) korištena za praćenje procesa, druga strategija kontrole kvalitete u kojoj su potpuno nepoznate putanje kretanja izradaka kroz sustav nije obuhvaćena radom jer ju karakterizira nasumičnost odabira izradaka za mjerenje čime se potpuno onemogućuje praćenje i statistička analiza karakteristika proizvoda obrađenih u serijsko-paralelnim višesegmentnim proizvodnim sustavima.

Novo razvijena metoda projektiranja praktično je primjenjiva kod projektiranja novih proizvodnih sustava ali i kod rekonfiguracija postojećih sustava. Dodatne značajke koncepta proizvodnog sustava dobivene predloženom metodom projektiranja zajedno sa ranije poznatim značajkama pružaju potpuniju, bolju sliku o konceptu proizvodnog sustava u cjelini. Valjanost i primjenjivost novo razvijene metode provjerena je na konkretnom primjeru. Rezultati projektiranja proizvodnog sustava za priloženi primjer pokazuju određena odstupanja od

rezultata projektiranja kad se kao ciljevi promatraju jedino proizvodnost, fleksibilnost i potrebne proizvodne površine no konačna odluka o odabiru koncepta proizvodnog sustava koji će se detaljnije razrađivati u kasnijim fazama projektiranja isključivo ovise o ciljevima i proizvodnoj politici poslovnog sustava odgovornog za proizvodni sustav.

9.2 Smjerovi daljnjih istraživanja

Jedan od smjerova daljnjeg istraživanja rane faze projektiranja proizvodnih sustava koje za cilj ima i kvalitetu očekivano može biti istraživanje utjecaja parametara kontrolnog podsustava na proizvodni proces i upravljivost proizvodnjom. Remećenje proizvodnog ciklusa i potencijalno ugrožena najveća proizvodnost sustava potencijalno se mogu pojaviti u slučajevima kada su postupci provjere dugotrajni, a kontrolni podsustav visoko opterećen.

Rezultati istraživanja optimalne alokacije kontrolnih stanica u proizvodnom sustavu i mjesta pogodnih za nastanak pogreški u ranoj fazi projektiranja očekivano bi mogla upotpuniti ovakvu metodu projektiranja optimalnog konceptualnog modela kontrolnog podsustava. Takva saznanja su potencijalno primjenjiva pri oblikovanju konceptualnog modela kontrolnog podsustava koji je optimiran po parametrima statističke pogreške provjere i alokacije kontrolnih stanica.

Istraživanje utjecaja ljudskih pogreški još je jedno područje potencijalno vrijedno istraživanja. Očekivana razina aktivnosti u proizvodnom procesu podložnih ljudskoj pogrešci može biti značajna za ukupnu sposobnost pojedinog koncepta proizvodnog sustava. Inman et al. (2013.) su preložili dva dodatna smjera ovog istraživanja: utjecaj kulture na kvalitetu i donošenje odluka pri niskoj razini automatizacije sustava te ergonomiju radnog okruženja.

LITERATURA

- Abad, A. G., Paynabar, K., Jin, J. J.: „Modeling and analysis of operator effects on process quality and throughput in mixed model assembly systems“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 133(2), 021016, 2011.
- Abellan-Nebot, J. V., Liu, J.: „Variation propagation modeling for multi-station machining processes with fixtures based on locating surfaces“, *International journal of Production Research*, 51(15), 4667-4681, 2013.
- Almannai, B., Greenough, R., Kay, J.: „A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(4), 501–507, 2008.
- Ball, P. D., Roberts, S., Natalicchio, A., Scorzafave, C.: „Modeling production ramp-up of engineering products“, *Journal of Engineering Manufacture*, 225(6), 959-971, 2011.
- Belmansour, A.-T., Nourelfath, M.: „An aggregation method for performance evaluation of a tandem homogenous production line with machines having multiple failure modes“, *Reliability Engineering & System Safety*, 95(11), 1193–1201.
- Black, J. T.: „The design of a factory with a future“, *McGraw-Hill*, New York, 1991.
- Bode, J., Fung, R. Y. K.: „Cost engineering with quality function deployment“, *Computers & Industrial Engineering*, 35, 3-4, 587-590, 1998.
- Bottani, E.: „A fuzzy QFD approach to achieve agility“, *International Journal of Production Economics*, 119, 380–391, 2009.
- Bozarth, C. C., Warsing, D. P., Flynn, E. J.: „The impact of a supply chain complexity on manufacturing plant performance“, *Journal of Operations Management*, 27(1), 78–93, 2009.
- Budenbender, W., Scheller, T.: „Flexible Fertigungssysteme in der Praxis“, *VDI-Z*, 129(10), 22-28, 1987.
- Cao, D., Defersha, F. M., Chen, M.: „Grouping operations in cellular manufacturing considering alternative routings and the impact of run length on product quality“, *International Journal of Production Research*, 47(4), 989–1013, 2009.
- Carnevalli, J. A., Miguel, A. C., Calarge, F. A.: „Axiomatic design application for minimizing the difficulties of QFD usage“, *International Journal of Production Economics*, 125, 1–12, 2010.
- Ceglarek D., Huang W., Zhou S., Ding Y., Kumar R., Zhou Y.: „Time based competition in multistage manufacturing: Stream of variation analysis (SOVA) methodology - review“, *International*

- Journal of Flexible Systems*, 16, 11-44, 2004.
- Chen, Y., Fung, R. Y. K., Tang, J.: „Rating technical attributes in fuzzy QFD by integrating fuzzy weighted average method and fuzzy expected value operator“, *European Journal of Operational Research*, 174(3), 1553–1566, 2006.
- Clarke, C.: „Automotive production systems and standardization: From Ford to the Case of Mercedes-Benz“, *Physica-Verlag Heidelberg, New York*, 2005.
- Cochran, W. G.: "Sampling techniques", *Wiley, New York*, 1977.
- Cochran, D. S., Dobbs, D. C.: „Evaluating manufacturing system design and performance using the manufacturing system design decomposition approach“, *Journal of Manufacturing Systems*, 20(6), 2001.
- Cochran D. S., Arinez J. F., Duda J. W., Linck J.: „A decomposition approach for manufacturing system design“, *Journal of Manufacturing Systems*, 20(6), 371–389, 2002.
- Colledani, M., Tolio, T.: „Impact of quality control on production system performance“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), 453–456, 2006.
- Colledani, M.: „Integrated analysis of quality and production logistics performance in asynchronous manufacturing lines“, *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, 8368–8374, 2008.
- Colledani, M., Tolio, T.: „Performance evaluation of production systems monitored by statistical process control and off-line inspections“, *International Journal of Production Economics*, 120(2), 348–367, 2009.
- Colledani, M., Tolio, T.: „Integrated analysis of quality and production logistics performance in manufacturing lines“, *International Journal of Production Research*, 49(2), 485–518, 2011.
- Colledani, M., Tolio, T.: „Integrated quality, production logistics and maintenance analysis of multi-stage asynchronous manufacturing systems with degrading machines“, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1), 455–458, 2012.
- Dallery, Y., Gershwin, S. B.: „Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results“, *Queueing Systems*, 12(1–2), 3–94, 1992.
- Dashchenko, A. I.: „Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories“, *Springer, New York*, 2006.
- De Toni, A., Tonchia, S.: „Manufacturing flexibility: a literature review“, *International Journal of Production Research*, 36(6), 1587-1617, 1998.
- Deming, W. E.: "Some theory of sampling", *Dover, New York*, 1950.
- Dhouib, K., Gharbi, A., Ben Aziza, M. N.: „Joint optimal production control/preventive maintenance policy for imperfect process manufacturing cell“, *International Journal of Production Economics*, 137, 126-136, 2012.
- Early, J. F., Coletti, O. J.: „The quality planning process“, *Juran's Quality Handbook*, Juran, J. M. I Godfrey, A. B. (eds), *McGraw-Hill, New York, NY*, 3.1–3.50., 1999.
- ElMaraghy, H. A.: „Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms“, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 17, 261-276, 2006.
- ElMaraghy, H. A., Wiendahl, H.-P.: „Changeability – An introduction“, *Changeable and reconfigurable manufacturing systems*, *Springer*, 2009.
- Epprecht, E. K., Aparisi, F., Ruiz, O., Veiga, Á.: „Reducing sampling costs in multivariate SPC with a double-dimension T^2 control chart“, *International Journal of Production Economics*, 144, 90-

104, 2013.

- Fine, C. H.: „Clockspeed: Winning industry control in the age of temporary advantage“, *Perseus Books*, 1998.
- Fricke E., Schulz A.-P.: „Design for changeability (DfC): Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle“, *Systems Engineering*, 8(4), 342–359, 2005.
- Garvin, D. A.: „Competing on the eight dimensions of quality“, *Harvard Business Review*, 87 (6), 101-109, 1987.
- Greimel, H.: „Glitch-hunting Hyundai sweats the details“, *Automotive News*, July 18, 2011.
- Guh, R.-S., Zorriassatine, F., Tannock, J. T. D., O'Brien, C.: „On-line control chart pattern detection and discrimination – a neural network approach“, *Artificial Intelligence in Engineering*, 13, 413-425, 1999.
- Hallgren, M., Olhager, J., Schroeder, R. G.: „A hybrid model of competitive capabilities“, *International Journal of Operations & Production Management*, 31(5), 511-526, 2011.
- Han, M.-S., Park, D.-J.: „Optimal buffer allocation of serial production lines with quality inspection machines“, *Computers & Industrial Engineering*, 42, 75-89, 2002.
- Harry, M. J., Lawson, J. R.: „Six sigma producibility analysis and process characterization“, *Motorola University Press*, Schaumburg, 1992.
- Hassan, A., Siadat, A., Dantan, J.-Y., Martin, P.: „Conceptual process planning an improvement approach using QFD, FMEA, and ABC methods“, *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 26(4), 392–401, 2010.
- Hayes, R. H., Pisano, G. P.: „Beyond world class: the new manufacturing strategy“, *Harvard Business Review*, 72 (10), 77-86, 1994.
- Ho, L. L., Quinino, R. C.: „Integrating on-line process control and imperfect corrective maintenance: An economical design“, *European Journal of Operational Research*, 222, 253-262, 2012.
- Hong, Y. S., Chang, T. C.: "A comprehensive review of tolerance research", *International Journal of Production Research*, 40(11), 2425-2459, 2002.
- Horch, A., Isaksson, A. J.: „Assessment of the sampling rate in control systems“, *Control Engineering Practice*, 9, 533-544, 2001.
- Huang, Q., Shi, J.: „Stream of variation modeling and analysis of serial-parallel multistage manufacturing systems“, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126, 611-618, 2004.
- Huang, S. H., Liu, Q.: „Rigorous application of tolerance analysis in setup planning“, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21(3), 196-207, 2003.
- Huang, S. H., Liu, Q., Musa, R.: „Tolerance-based process plan evaluation using Monte Carlo simulation“, *International Journal of Production Research*, 42(23), 4871–4891, 2004.
- Huang, S. H., Inman, R. R.: „Product quality and plant build complexity“, *International Journal of Production Research*, 48(11), 3105-3128, 2010.
- Inman, R. R., Blumenfeld, D. E., Huang, N., Li, J.: „Designing production systems for quality: research opportunities from an automotive industry perspective“, *International Journal of Production Research*, 41 (9), 1953-1971, 2003.
- Inman, R. R., Blumenfeld, D. E., Huang, N., Li, Jingshan, Li, Jing: „Survey of recent advances on the interface between production system design and quality“, *IEE Transactions*, 45, 557-574, 2013.

- Karsak, E. E., Sozer, S., Alptekin, S. E.: „Product planning in quality function deployment using a combined analytic network process and goal programming approach“, *Computers & Industrial Engineering*, 44, 171–190, 2002.
- Kaya, I., Kahraman, C.: „Fuzzy process capability indices with asymmetric tolerances“, *Expert Systems with Applications*, 38, 14882-14890, 2011.
- Khouja, M., Rabinowitz, G., Mehrez, A.: „Optimal robot operation and selection using quality and output trade-off“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 10(5), 342-355, 1995.
- Kim, J. K., Han, C. H., Choi, S. H., Kim, S. H.: „A knowledge-based approach to the quality function deployment“, *Computers & Industrial Engineering*, 35, 1-2, 233-236, 1998.
- Kim, J., Gershwin, S. B.: „Integrated quality and quantity modeling of a production line“, *OR Spectrum*, 27(2-3), 287-314, 2005.
- Kim, J.: „Integrated quality and quantity modeling of a production line“, *Massachusetts Institute of Technology*, 2005.
- Kim, J., Gershwin, S. B.: „Analysis of long flow lines with quality and operational failures“, *IIE Transactions*, 40(3), 284–296, 2008.
- Kochan, A.: „BMW uses even more robots for both flexibility and quality“, *The Industrial Robot*, 32(4), 318-320, 2005.
- Koren, Y., Ulsoy, A. G.: „Vision, principles and impact of reconfigurable manufacturing systems“, *Powertrain International*, 14-21, 2002.
- Koren, Y., Ulsoy, A. G.: „Reconfigurable manufacturing system having a production capacity method for designing same and method for changing its production capacity“, *United States Patent*, Patent No. US 6,349,237 B1, 2002.
- Koren, Y.: „General RMS characteristics. Comparison with dedicated and flexible systems“, *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*, Springer, New York, 2006.
- Koren, Y.: „The global manufacturing revolution: Product-process integration and reconfigurable systems“, *Wiley*, 2010.
- Koren, Y., Shiptalni, M.: „Design of reconfigurable manufacturing systems“, *Journal of manufacturing Systems*, 29, 130-141, 2010.
- Krafcik, J. F.: „Triumph of the Lean Production System“, *Massachusetts institute of Technology, Sloan Management Review*, 30(1), 41-52, 1988.
- Lau, R. S. M.: "A synergistic analysis of joint JIT-TQM implementation", *International Journal of Production Research*, 38(9), 2037-2049, 2000.
- Lee, H. F., Stecke, K. E.: „An integrated design support method for flexible assembly systems“, *Journal of manufacturing systems*, 15 (1), 13-32, 1996.
- Li, J., Blumenfeld, D. E.: „Quantitative analysis of a transfer production line with Andon“, *IIE Transactions*, 38(10), 837–846. 2006.
- Li, J., Huang, N.: „Quality evaluation in flexible manufacturing systems: A Markovian approach“, *Mathematical Problems in Engineering*, 57128, 2007.
- Li, J., Blumenfeld, D. E., Marin, S. P.: „Production system design for quality robustness“, *IIE Transactions*, 40(3), 162–176. 2008.
- Li, L., Warfield, J. N.: „Perspectives on quality coordination and assurance in global supply chains“,

- International Journal of Production Research*, 49(1), 1-4, 2011.
- Liu, J., Shi, J., Hu, S. J.: „Quality assured setup planning based on the stream-of-variation model for multistage machining processes“, *IIE Transactions*, 41(4), 323–334, 2009.
- Lo, V. H. Y., Yeung, A.: „Managing quality effectively in supply chain: a preliminary study“, *Supply Chain Management*, 11(3), 208-215, 2006.
- Lowe, A., Ridgway, K., Atkinson, H.: „QFD in new production technology evaluation“, *International Journal of Production Economics*, 67(2), 103–112, 2000.
- Ljubetić, J.: „Optimizacija postupaka pri projektiranju višepredmetnih proizvodnih sistema“, *Disertacija*, Tehnički fakultet Rijeka, Rijeka, 1991.
- Mandrolji, S. S., Shrivastava, A. K., Ding, Y.: „A survey of inspection strategy and sensor distribution studies in discrete-part manufacturing processes“, *IIE Transactions*, 38(4), 309–328, 2006.
- Mantripragada, R., Whitney, D. E.: „The datum flow chain: A systematic approach to assembly design and modeling“, *Research in Engineering Design*, 10, 150-165, 1998.
- Mayne, E., Murphy, T., Winter, D.: „Quality crunch“, *WARDS's auto world*, 32-37, 2001.
- Mehrez, A., Hu, M., Offodile, O. F.: „Multivariate economic analysis of robot performance repeatability and accuracy“. *Journal of Manufacturing Systems*, 15(4), 215–225, 1996.
- Mikac, T.: „Optimizacija koncepta proizvodnog sustava“, *Tehnički fakultet Rijeka*, 1994.
- Mikac, T.: „Projektiranje proizvodnih sustava“, *Tehnički fakultet Rijeka*, 2004.
- Miltenburg, J.: „Manufacturing Strategy: How to Formulate and Implement a Winning Plan, Second Edition“, *Productivity Press*, 2005.
- Monden, Y.: „Toyota production system: an integrated approach to just-in-time“, *Industrial Engineering and Management Press*, 1993.
- Monden, Y.: „Toyota production system: practical approach to production management“, *Industrial Engineering and Management Press, Institute of Industrial Engineers*, 1983.
- Montgomery D.C.: „Introduction to statistical quality control“, Sixth edition, *John Wiley & Sons Inc.*, 2009.
- Mortel, R. R., Runger, G. C.: „Statistical process control of multiple stream process“, *Journal of Quality Technology* 27, 1-12, 1995.
- Nada, O. A., ElMaraghy, H. A., ElMaraghy, W. H.: „Quality prediction in manufacturing system design“, *Journal of Manufacturing Systems*, 25 (3), 153-171, 2006.
- Ou Y., Wu Z., Tsung F.: „A comparison study and robustness of control charts for monitoring process mean“, *International Journal of Production Economics*, 135 (2012), 479-490, 2012.
- Padiyar, A., Sawhney, R., Lee, T.-R., Koh, S. C. L.: „Development of an information system to integrate the manufacturing firm and its supplier base for reduced non-conforming parts“, *International Journal of Value Chain Management*, 1(2), 159–174, 2006.
- Palmer, K., Tsui, K.-L.: „A review and interpretations of process capability indices“, *Annals of Operations Research*, 87, 31-47, 1999.
- Putnik, G., Sluga, A., ElMaraghy, H., Teti, R., Koren, Y., Tolio, Y., 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.
- Prasad, B.: „Review of QFD and related deployment techniques“, *Journal of Manufacturing Systems*, 17 (3), 1998.

- Radhoui, M., Rezg, N., Chelbi, A.: „Integrated model of preventive maintenance, quality control and buffer sizing for unreliable and imperfect production systems“, *International Journal of Production Research*, 47(2), 389–402, 2009.
- Reynal, V. A.: „Production system design and its implementation in the automotive and aircraft industry“, *Massachusetts Institute of Technology*, 1998.
- Rooda, J. E., Vervoort, J.: „Analysis of Manufacturing Systems“, *Technische Universiteit Eindhoven*, 2007.
- Ruben, R. A., Mahmoodi, F.: „Scheduling cellular manufacturing systems“, *Handbook of cellular manufacturing systems*, 141-154, *Wiley*, 1999.
- Runger, G. C., Alt, F. B., Montgomery, D. C.: „Controlling multiple stream processes with principal components“, *International Journal of Production Research*, 34 (11), 2991-2999, 2000.
- Schilling, E. G., Nelson, P. R.: “The effect of non-normality on the control limits of charts.”, *Journal of Quality Technology*, 8, 183-188, 1976.
- Shah, R.: „Flexible Fertigungssysteme in Europa: Erfahrungen der Anwender, VDI-Z, 133 (6), 16-30, 1991.
- Shetwan, Ali G., Vitanov, V. I., Tjahjono, B.: „Allocation of quality control stations in multistage manufacturing systems“, *Computers & Industrial Engineering*, 60, 473-484, 2011.
- Shi, J.: „Stream of Variation Modeling and Analysis for Multistage Manufacturing Processes“, *CRC Press*, 2010.
- Spicer, P., Yip-Hoi, D., Koren, Y.: „Scalable reconfigurable equipment design principles“, *International Journal of Production Research*, 43 (22), 4839-4852, 2005.
- Taguchi, G.: „Introduction to Quality Engineering“, *Asian Productivity Organization, New York, NY*, 1986.
- Tang, L. C., Than, A. S. E.: „Computing process capability indices for non-normal data, A review and comparative study“, *Quality and Reliability Engineering International*, 15, 339-353, 1999.
- Tennant, G.: „Six Sigma: SPC and TQM in Manufacturing and Services“, *Gower Publishing*, 2000.
- Tolio, T., Matta, A.: „A method for performance evaluation of automated flow lines“, *Annals of the CIRP*, 47 (1), 1998.
- Tsou, J.-C.: „The impact of preventive activities on the economics of production systems: Modeling and application“, *Applied Mathematical Modeling*, 32, 1056-1065, 2008.
- Vaughn, A., Fernandes, P., Shields, J. T.: „Manufacturing System Design Framework Manual“, *Massachusetts Institute of Technology*, 2002.
- Venkatesan, G.: „Process control of product quality“, *ISA Transactions*, 42, 631-641, 2003.
- Wang, J., Li, J.: „Bottleneck sequence with respect to quality in flexible manufacturing systems: a systems approach“, in *Advances Systems Theory: Control, Communication Networks, Production Systems and Rational Behavior*, Kabamba, P.T. and Li, J. (eds), *WingSpan Press, Livermore, CA*, 263–282, 2009.
- Wang, J., Li, J., Arinez, J., Biller, S.: „Product Sequencing With Respect to Quality in Flexible Manufacturing Systems With Batch Operations“, *IEEE Transactions On Automation Science And Engineering*, 7(4), 2010.
- Wang, K., Rao, Y., Wang, M.: „Modeling impact of choice complexity on production rate in mixed-model assembly system“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(9-12), 2010.

- Warner, S., Anderson, G.: „Putting it On the Line at Mercedes-Benz U.S. International with the Mercedes Production System“, *Mercedes-Benz Club of America*, <http://www.mbca.org>, 2013.
- Wazed, A., Ahmed, S., Nukman, Y.: „Application of Taguchi method to analyze the impacts of common process and batch size in multistage production system under uncertain conditions“, *European Journal of Industrial Engineering*, 5(2), 215–231, 2011.
- Webbink, R. F., Hu, S. J.: „Automated generation of assembly system-design solutions“, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2(1), 32–39, 2005.
- Weber, A.: „Is flexibility a myth?“, *Assembly*, 47(5), 50-59, 2004.
- 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, 2003
- Wu Z., Lam Y. C., Zhang S., Shamsuzzaman M.: „Optimization design of control chart systems“, *IIE Transactions*, 36, 447-455, 2004.
- Wu, C.-W., Pearn, W. L., Kotz, S.: „An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance“, *International Journal of Production Economics*, 117, 338-359, 2009.
- Xu, L. D.: „Information architecture for supply chain quality management“. *International Journal of Production Research*, 49(1), 183–198, 2011.
- Yang, J., Wang, J., Wu, Z., Anwer, N.: „Statistical tolerancing based on variation of point-set“, *CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing*, 10 (2013), 9-16, 2013.
- Zantek P. F., Wright G. P., Plante R. D.: „Process and product improvement in manufacturing systems with correlated stages“, *Management Science*, 48 (5), 591-606, 2002.
- Zhang M., Djurdjanovic D., Ni J.: „Diagnosibility and sensitivity analysis for multi-station machining processes“, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 636-657, 2007.
- Zholi, M.: „Fuzzy logic and optimization models for implementing QFD“, *Computers & Industrial Engineering*, 35, 1-2, 237-240, 1998.
- Zhong, W.: „Modelling and optimization of quality and productivity for machining systems with different configurations“, *University of Michigan*, 2002.
- <http://www.epa.gov/lean/environment/methods/threep.htm>
- <http://www.mbca.org/star-article/july-august-2013/putting-it-line-mercedes-benz-us-international-mercedes-production-sys>
- <http://www.siliconfareast.com/cpkppm.htm>
- <http://www.ocot.ca/articles/cssbb3.html>
- <http://www.zscorecalculator.com>

POPIS SLIKA

slika 1.1	Komponente odstupanja kvalitete (Early i Coletti, 1999.)	2
slika 1.2	Konkurirajući ciljevi projektiranja proizvodnih sustava (Inman et al., 2003.).....	4
slika 1.3	Primjena tehnika za poboljšanje kvalitete tijekom nekih od osnovnih procesa plasiranja novog proizvoda na tržište (Inman et al., 2003.).....	4
slika 2.1	Popunjavanje područja vrijednog istraživanja na diobi projektiranja proizvodnih sustava i kontrole kvalitete (Inman et al., 2013.)	10
slika 2.2	Procesi rane faze projektiranja proizvodnog sustava i projektiranja kontrolnog podsustava (Inman et al., 2013.).....	11
slika 2.3	Istraživanja mogućnosti simultanog projektiranja.....	18
slika 3.1	Tržišne i društvene potrebe kao pokretači proizvodnih promjena (Koren, 2010.)....	20
slika 3.2	Evolucija proizvodnih sustava (ELMaraghy i Wiendal, 2009.).....	21
slika 3.3	Strategija proizvoda kao instrument za usklađivanje četiriju funkcija organizacije (Vaughn et al., 2002.).....	32
slika 3.4	Radni okvir projektiranja proizvodnog sustava (Vaughn et al., 2002.).....	33
slika 3.5	Sistematika projektiranja i uvođenja kompleksnih proizvodnih sustava (Mikac, 1994.).....	39
slika 3.6	Dekompozicija projektiranja proizvodnog sustava, MSDD (Cochran i Dobbs, 2001.)	40
slika 3.7	Sistematika projektiranja Toyotinog proizvodnog sustava (Monden, 1983.).....	41
slika 4.1	Proizvodne paradigme i njihove karakteristike (Koren, 2010.).....	43
slika 4.2	Hodogram obrade u tipičnoj posvećenoj proizvodnoj liniji (PPL).....	43
slika 4.3	Fleksibilna posvećena proizvodna linija Mikron Multistep XT-200 (www.mikron.com).....	44
slika 4.4	Fleksibilni proizvodni sustav, FPS (www.fastems.com)	45
slika 4.5	Hodogram obrade u tipičnoj radioničkoj ćeliji	46
slika 4.6	Hodogram obrade u ćeliji jednosmjernog kretanja izradaka	47
slika 4.7	Tipična arhitektura rekonfigurabilnog proizvodnog sustava	50

slika 4.8	Rekonfigurabilni alatni stroj (RAS)	50
slika 4.9	Promjenjivi alatni modul	50
slika 4.10	Vrste promjenjivosti	51
slika 4.11	Svojstva koja omogućavaju promjenjivost proizvodnih sustava	52
slika 4.12	Prvi i drugi princip skalabilnosti (Fricke i Schulz, 2005.)	53
slika 4.13	Parametri plana kontrole.....	59
slika 4.14	Struktura investicijskih ulaganja u FPS (Shah, 1991.).....	61
slika 4.15	Univerzalni koordinatni mjerni stroj (www.hexagonmetrology.com).....	62
slika 4.16	Posvećena kontrolna oprema (www.zeiss.com).....	62
slika 4.18	Sustav neizravne logike za određivanje indeksa sposobnosti konfiguracije proizvodnog sustava (Nada et al., 2006.)	64
slika 4.19	Dinamika odziva RPS-a (Koren i Shiptalni, 2010.)	66
slika 4.20	Investicije modela proizvodnih sustava prema kapacitetu proizvodnje (Koren i Shiptalni, 2010.).....	67
slika 4.21	Hodogram obrade jednog proizvoda u serijsko-paralelnom višesegmentnom proizvodnom sustavu.....	70
slika 4.22	Putanje kretanja obradaka proizvoda kroz proizvodni sustav	70
slika 4.23	Različiti primjeri konfiguracija proizvodnih linija (Koren i Shiptalni, 2010.)	71
slika 4.24	Konfiguracije proizvodnih sustava. Tip I (a), tip II (b) i tip III (c) (Koren i Shiptalni, 2010.)	72
slika 5.1	Kontrola proizvodnog procesa (Montgomery, 2009.).....	75
slika 5.2	Vrste pogrešaka (Kim i Gershwin, 2005.).....	76
slika 5.3	Histogram.....	78
slika 5.4	Odnos između populacije i uzorka populacije interpretiranog histogramom.....	79
slika 5.5	Normalna (lijevo) i standardna normalna distribucija (desno)	80
slika 5.6	Primjer kontrolne karte	81
slika 5.7	Kriteriji statističkog testa	84
slika 5.8	Distribucija Z_0 za H_0 i H_1	87
slika 5.9	Krivulje operativnih karakteristika x -potez kontrolne karte s 3-sigma granicama, β - vjerojatnost ne otkrivanja pomaka veličine $\xi\sigma$ s uzorkom veličine n (Montgomery, 2009.)	93
slika 5.10	Krivulje operativnih karakteristika R kontrolne karte s 3-sigma granicama, β - vjerojatnost ne otkrivanja relativnog pomaka standardne distribucije λ s uzorkom veličine n (Montgomery, 2009.)	94
slika 5.11	Prosječna duljina protoka (uzoraka) ARL x -potez kontrolne karte potreban da bi se detektirao pomak veličine $\xi\sigma$ kontrolnom kartom s 3-sigma granicama (Montgomery, 2009.).....	96
slika 5.12	Odnos između C_p i C_{pk}	99
slika 5.13	Dostizanje 6-sigma razine procesa	100

slika 5.14	Dugoročni pomak vrijednosti karakteristike 6-sigma procesa.....	100
slika 6.1	Izvori varijabilnosti izratka u proizvodnim procesima (Abellan-Nebot i Liu, 2013.)	103
slika 6.2	Model propagacija varijabilnosti kroz p -tu putanju proizvodnog sustava (Ceglarek et al., 2004.)	104
slika 6.3	Implementacija kontrolnog podsustava u model propagacije varijabilnosti (Ceglarek et al., 2004.)	105
slika 6.4	Jednostavni model distribucije varijabilnosti	109
slika 6.5	Model distribucije varijabilnosti s nasljednom komponentom	110
slika 6.6	Izradak (Wu et al., 2007.)	110
slika 6.7	Prva moguća konfiguracija sustava za proizvodnju izratka (Wu et al., 2007.)	111
slika 6.8	Druga moguća konfiguracija za proizvodnju izratka	111
slika 6.9	Model distribucije varijabilnosti prve konfiguracije.....	112
slika 6.10	Model distribucije varijabilnosti druge konfiguracije	112
slika 6.11	Grafički prikaz distribucije varijabilnosti	112
slika 7.1	Sistematika aktivnosti projektiranja koncepta proizvodnog sustava.....	115
slika 7.2	Preliminarni popis operacija.....	117
slika 7.3	Vrednovanje alternativnih rješenja koncepta tehnološkog procesa prema njihovoj procijenjenoj sigma razini	119
slika 7.4	Sustav neizrazite logike za izračun vrijednosti ISK (Nada et al., 2006.)	123
slika 7.5	Funkcije pripadnosti varijable „pogreška provjere“, PP (Nada et al., 2006.).....	127
slika 7.6	Funkcije pripadnosti varijable „statistička pogreška provjere“, STPP	129
slika 7.7	Raspon vrijednosti neizrazite varijable statističke pogreške provjere (STPP) za x -potez kontrolne karte s 3-sigma kontrolnim granicama	130
slika 7.8	Predloženi sustav neizrazite logike za izračun vrijednosti ISK	130
slika 7.9	Ulazne varijable sustava neizrazite logike za određivanje indeksa sposobnosti konfiguracije sustava.....	132
slika 7.10	Ulazne varijable sustava neizrazite logike za određivanje indeksa sposobnosti konfiguracije sustava u kontekstu redoslijeda projektiranja	134
slika 7.11	Prosječna duljina protoka (uzoraka) ARL x -potez kontrolne karte potreban da bi se detektirao pomak veličine $\xi\sigma$ kontrolnom kartom s 3-sigma granicama	135
slika 7.12	Potrebna površina konfiguracije sustava.....	137
slika 7.13	Vrednovanje pojedine konfiguracije sustava	139
slika 8.1	Tipični oblik glave automobilskog motora prikazan zajedno s integriranim usisnim i ispušnim sustavom (izvor Audi AG).....	140
slika 8.2	Preliminarni popis operacija za promatrani izradak.....	142
slika 8.3	Prva konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	147
slika 8.4	Druga konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	147

slika 8.5	Treća konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	148
slika 8.6	Četvrta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti	148
slika 8.7	Peta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti	149
slika 8.8	Šesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti	149
slika 8.9	Sedma konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti	150
slika 8.10	Osma konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	150
slika 8.11	Deveta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	151
slika 8.12	Deseta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti	151
slika 8.13	Jedanaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	152
slika 8.14	Dvanaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	152
slika 8.15	Trinaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	153
slika 8.16	Četrnaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	153
slika 8.17	Petnaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti	154
slika 8.18	Šesnaesta konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti.....	154
slika 8.19	Model sustava neizrazite logike za izračun Indeksa sposobnosti prve konfiguracije (<i>Matlab, Simulink</i>).....	157
slika 8.20	Prosječna duljina protoka (uzoraka) ARL x -potez kontrolne karte s 3-sigma granicama potreban da bi se detektirao pomak veličine 1σ	159
slika 8.21	Model sustava neizrazite logike za izračun Indeksa sposobnosti prve konfiguracije (<i>Matlab, Simulink</i>).....	160
slika 8.22	Dvanaesta (a) konfiguracija s pripadajućim modelom distribucija varijabilnosti...	161
slika 8.23	Dvanaesta konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava za IPK =160 h, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x -potez kontrolnom kartom s 3- sigma granicama.....	162
slika 8.24	Model sustava neizrazite logike za izračun Indeksa sposobnosti dvanaeste konfiguracije (<i>Matlab, Simulink</i>).....	163
slika 8.25	Dvanaesta (a) konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava za IPK =160 h, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x -potez kontrolnim kartama s 3-sigma granicama	163
slika 8.26	Model sustava neizrazite logike za izračun Indeksa sposobnosti modificirane, dvanaeste (a) konfiguracije (<i>Matlab, Simulink</i>).....	164
slika 8.27	Prva konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava kojeg čini samo jedna kontrolna stanica, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x -potez kontrolnom kartom s 3-sigma granicama (uz IPK=160 h)	165
slika 8.28	Četvrta konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava za IPK =160 h, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x -potez kontrolnom kartom s 3- sigma granicama.....	165
slika 8.29	Peta konfiguracija s pripadajućim parametrima kontrolnog podsustava za IPK =160 h, potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ x -potez kontrolnom kartom s 3-sigma granicama.....	166

slika 0.1	Funkcije pripadnosti varijable „broj putanji“, $BP = \mathcal{P}$ (Nada et al., 2006.).....	186
slika 0.2	Funkcije pripadnosti varijable „broj segmenata procesa“, $BSP = \mathcal{R}$ (Nada et al., 2006.)	186
slika 0.3	Funkcije pripadnosti varijable „kvaliteta morfološke strukture konfiguracije“, KMSK (Nada et al., 2006.).....	186
slika 0.4	Funkcije pripadnosti varijable „ukupna sposobnost procesa“, USP (Nada et al., 2006.).....	187
slika 0.5	Funkcije pripadnosti varijable „razina implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka“, RIESP (Nada et al., 2006.).....	187
slika 0.6	Funkcije pripadnosti varijable „sposobnost prevencije pogreške“, SPP (Nada et al., 2006.).....	187
slika 0.7	Funkcije pripadnosti varijable „alokacija kontrolnih stanica“, AKS (Nada et al., 2006.)	188
slika 0.8	Funkcije pripadnosti varijable „razina implementacije Jidoka“, RIJ (Nada et al., 2006.).....	188
slika 0.9	Funkcije pripadnosti varijable „količina izradaka u među-operacijskom čekanju“, KMC (Nada et al., 2006.).....	188
slika 0.10	Funkcije pripadnosti varijable „odziv na pojavu pogreške“, OPP (Nada et al., 2006.)	189
slika 0.11	Funkcije pripadnosti varijable „statistička pogreška provjere“, STPP.....	189
slika 0.12	Funkcije pripadnosti varijable „sposobnost detekcije pogreške“, SDP (Nada et al., 2006.).....	190
slika 0.13	Funkcije pripadnosti varijable „indeks sposobnosti konfiguracije“, ISK (Nada et al., 2006.).....	190

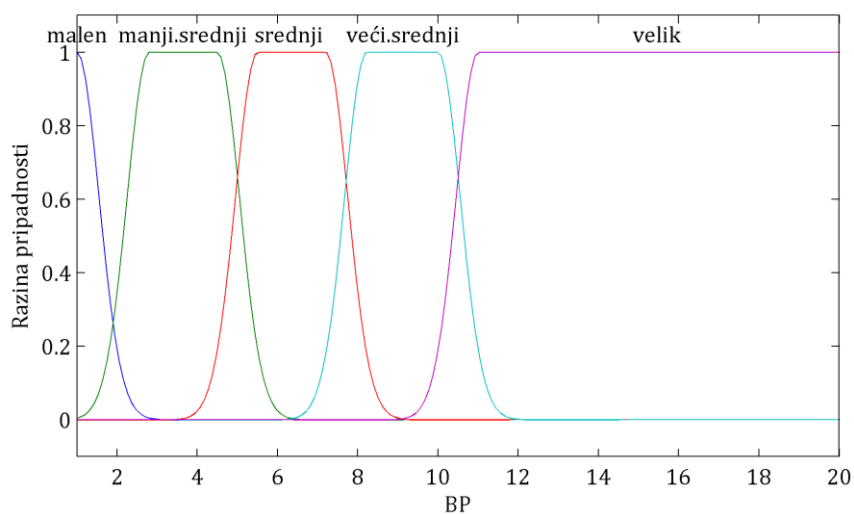
POPIS TABLICA

tablica 3.1	Razmatranja potreba/ciljeva/strategije poduzeća pri projektiranju proizvodnog sustava	35
tablica 3.2	Razmatranja vanjskih čimbenika pri projektiranju proizvodnog sustava	35
tablica 4.1	Usporedba trenutno dominantnih modela proizvodnih sustava (Koren, 2006.).....	47
tablica 4.2	Usporedba mogućnosti i svojstava PPL, RPS i FPS sustava (Koren, 2006.)	49
tablica 4.3	Klasifikacija svojstava koji omogućuju promjenjivost na razini proizvodnog sustava	54
tablica 4.4	Broj mogućih konfiguracija za određeni broj opreme u sustavu (Koren i Shiptalni, 2010.)	73
tablica 4.5	Pascalov trokut, ukupni broj RPS konfiguracija slaganja S strojeva u I segmenata procesa	74
tablica 5.1	Broj nesukladnih izradaka za centriranu, normalno distribuiranu karakteristiku procesa koji je pod kontrolom (Montgomery, 2009.)	98
tablica 5.2	Preporučene minimalne vrijednosti indeksa sposobnosti procesa C_p (Montgomery, 2009.)	98
tablica 5.3	Parametri sigma razina procesa s dugoročnim pomakom za jednostranu toleranciju	101
tablica 6.1	Interpretacija matrica proizvodnog procesa (Ceglarek et al., 2004.).....	103
tablica 6.2	Interpretacija matrice kontrolnog podsustava (Ceglarek et al., 2004.).....	104
tablica 6.3	Spajanje dvaju putanji na jednom segmentu proizvodnog sustava (Huang i Shi, 2004.)	106
tablica 6.4	Posebni slučajevi spajanja putanji (Huang et al., 2004).....	107
tablica 6.5	Efekt paralelnih obrada na varijabilnost karakteristika kvalitete (Zhong, 2002.) ..	109
tablica 6.6	Značajke strategija kontrole kvalitete prve konfiguracije	113
tablica 6.7	Značajke strategija kontrole kvalitete druge konfiguracije.....	113
tablica 7.1	Varijable sustava neizravne logike za određivanje sposobnosti prevencije pogreške	125

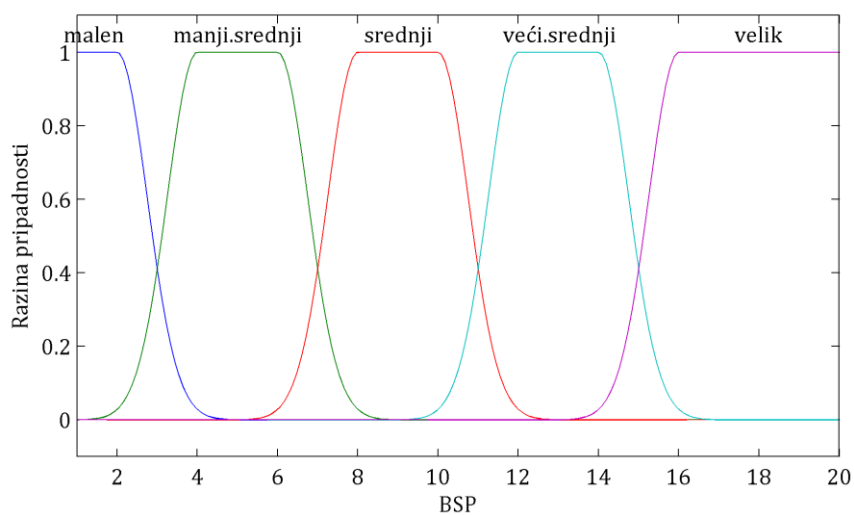
tablica 7.2	Varijable sustava neizrazite logike za određivanje sposobnosti detekcije pogreške	126
tablica 7.3	Varijabla statističke pogreške provjere	129
tablica 7.4	Vrijednosti neizrazite varijable statističke pogreške provjere (STPP).....	131
tablica 7.5	Varijabla sustava neizrazite logike koja predstavlja indeks sposobnosti konfiguracije	132
tablica 7.6	Moguće strategije uzorkovanja optimalnog kontrolnog podsustava	135
tablica 8.1	Ključni podaci preliminarnog popisa operacija.....	141
tablica 8.2	Pascalov trokut.....	145
tablica 8.3	Broj strojeva po operacijama za moguće konfiguracije sustava.....	146
tablica 8.4	Vrijednosti konfiguracija.....	155
tablica 8.5	Parametri uzorkovanja x -potez kontrolne karte za sve konfiguracije pri $AKS=0$ potrebnih za otkrivanje pomaka veličine 1σ	157
tablica 8.6	Vrijednosti konfiguracija sustava.....	158
tablica 8.7	Rang konfiguracija po pojedinim značajkama	162
tablica 8.8	Rang konfiguracija po pojedinim značajkama	165
tablica 8.9	Usporedba rezultata odabira konfiguracija (● – primarni odabir, ∴ - alternative) .	166

PRILOG A

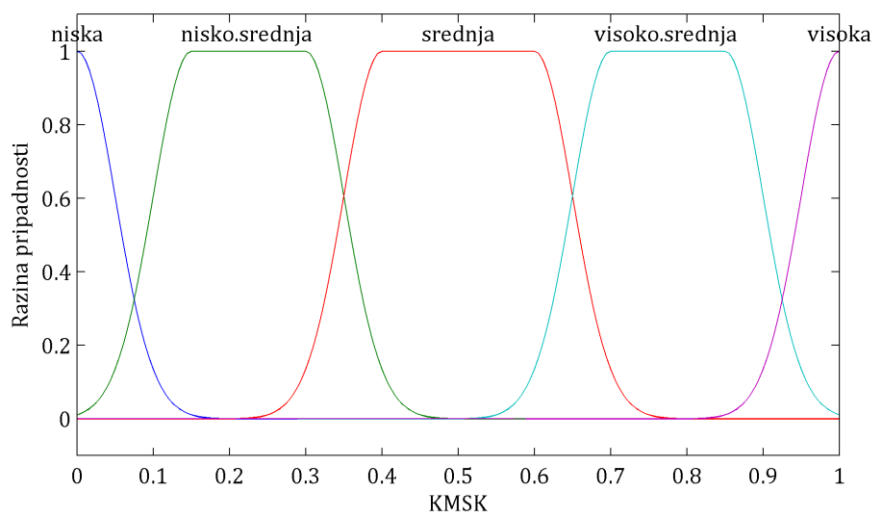
Razine pripadnosti varijabli sustava neizrazite logike



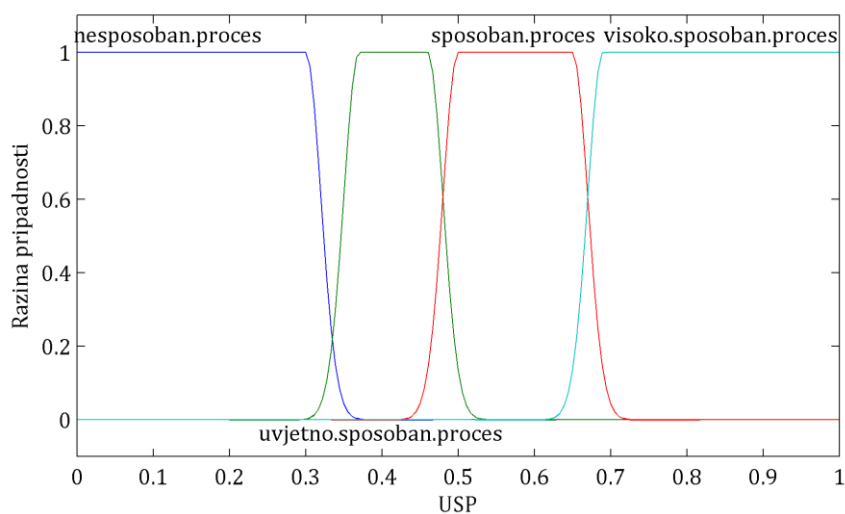
slika 0.1 Funkcije pripadnosti varijable „broj putanji“, $BP = \mathcal{P}$ (Nada et al., 2006.)



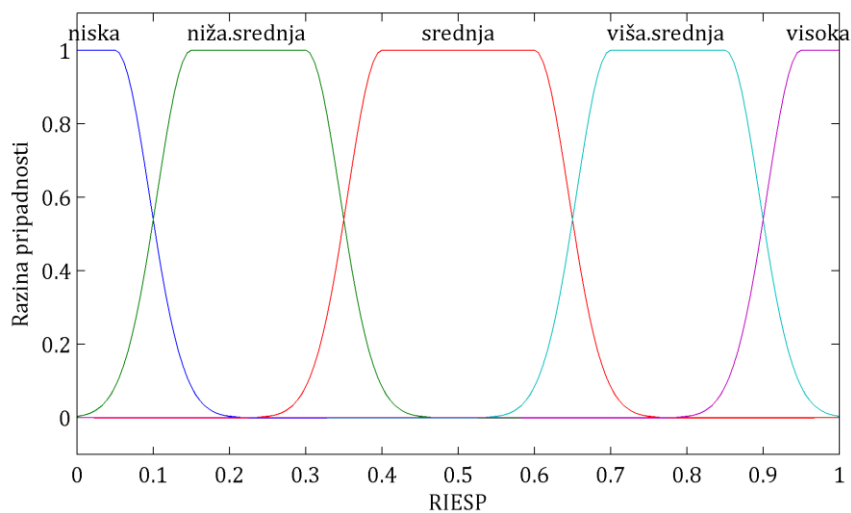
slika 0.2 Funkcije pripadnosti varijable „broj segmenata procesa“, $BSP = \mathcal{R}$ (Nada et al., 2006.)



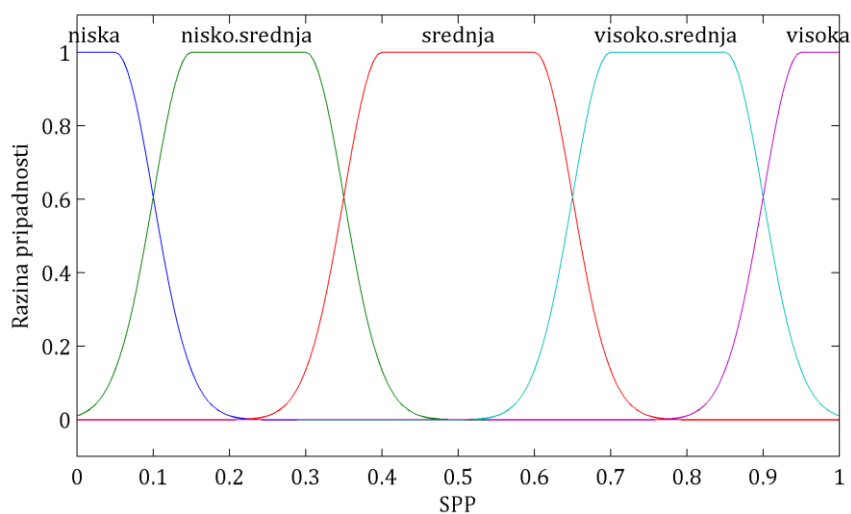
slika 0.3 Funkcije pripadnosti varijable „kvaliteta morfološke strukture konfiguracije“, KMSK (Nada et al., 2006.)



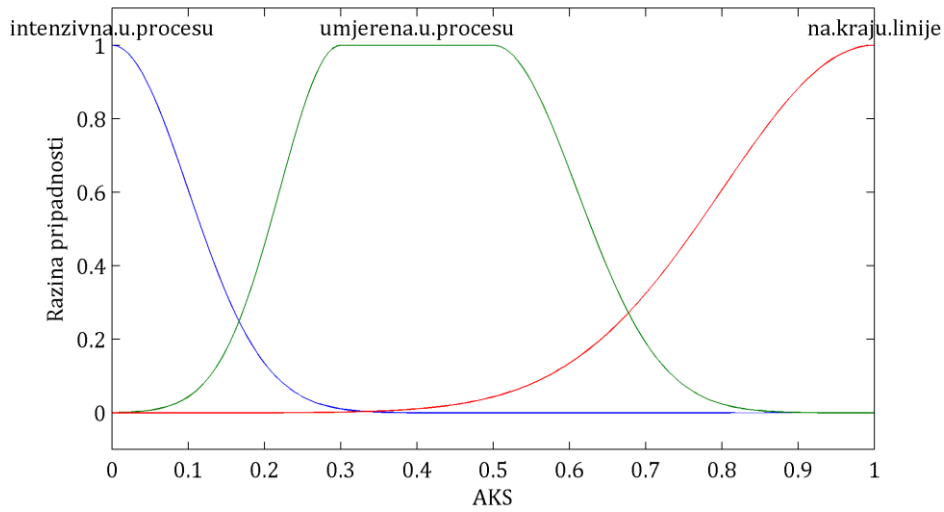
slika 0.4 Funkcije pripadnosti varijable „ukupna sposobnost procesa“, USP (Nada et al., 2006.)



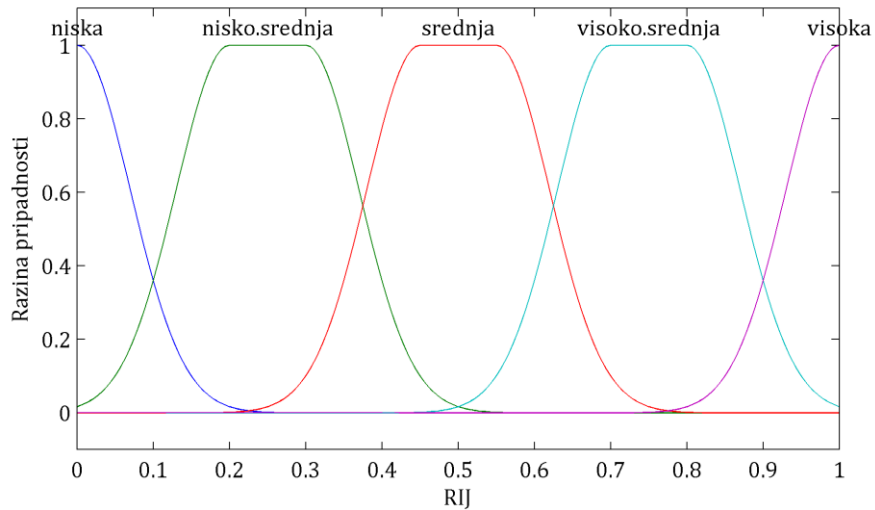
slika 0.5 Funkcije pripadnosti varijable „razina implementacije elemenata za sprječavanje pogrešaka“, RIESP (Nada et al., 2006.)



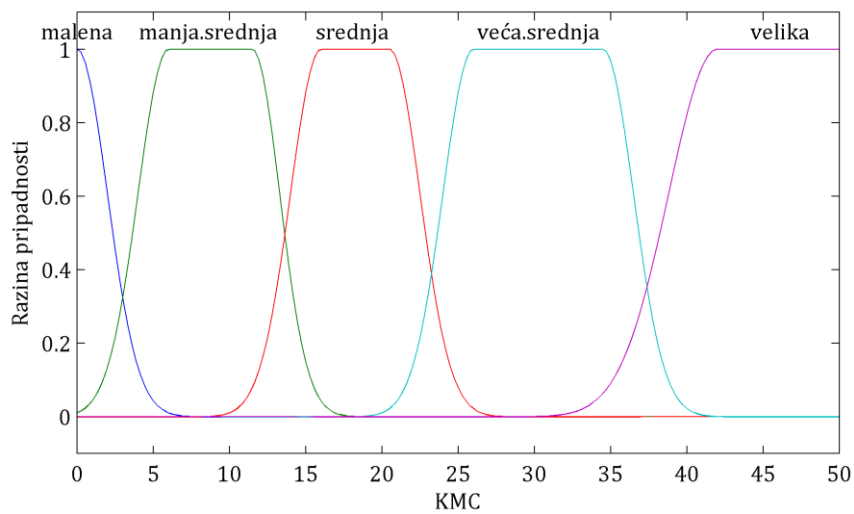
slika 0.6 Funkcije pripadnosti varijable „sposobnost prevencije pogreške“, SPP (Nada et al., 2006.)



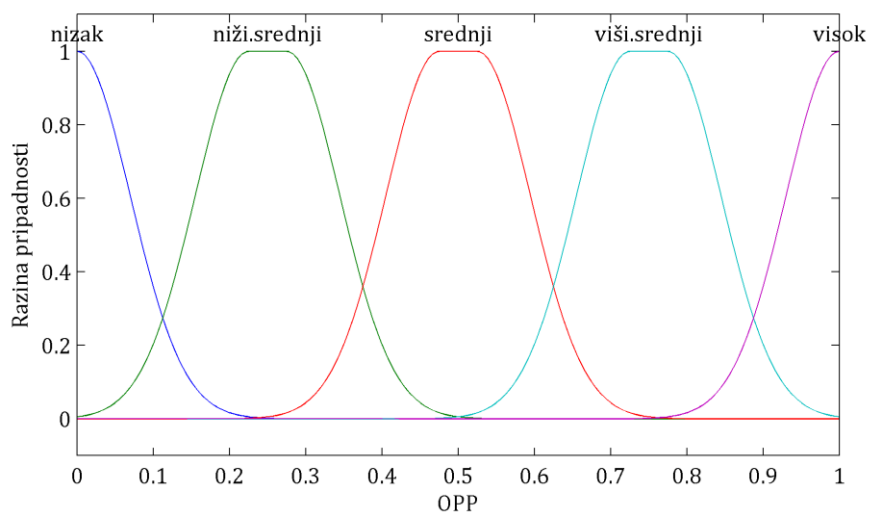
slika 0.7 Funkcije pripadnosti varijable „alokacija kontrolnih stanica“, AKS (Nada et al., 2006.)



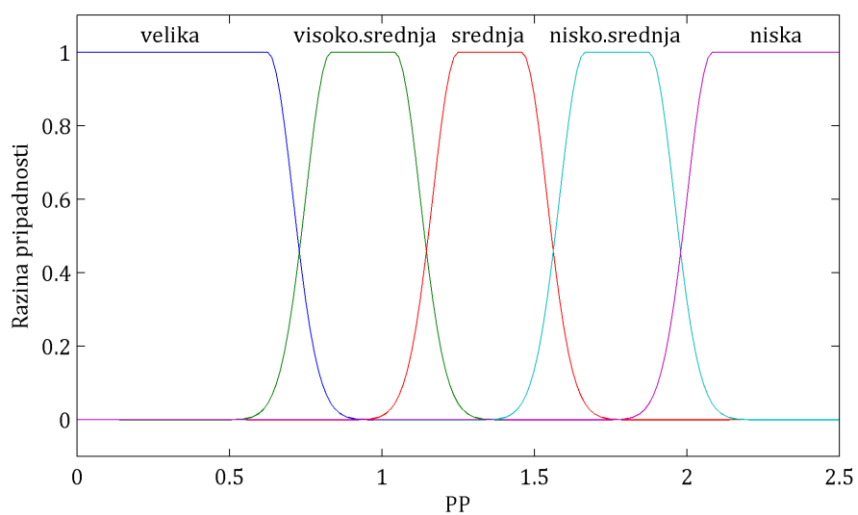
slika 0.8 Funkcije pripadnosti varijable „razina implementacije Jidoka“, RIJ (Nada et al., 2006.)



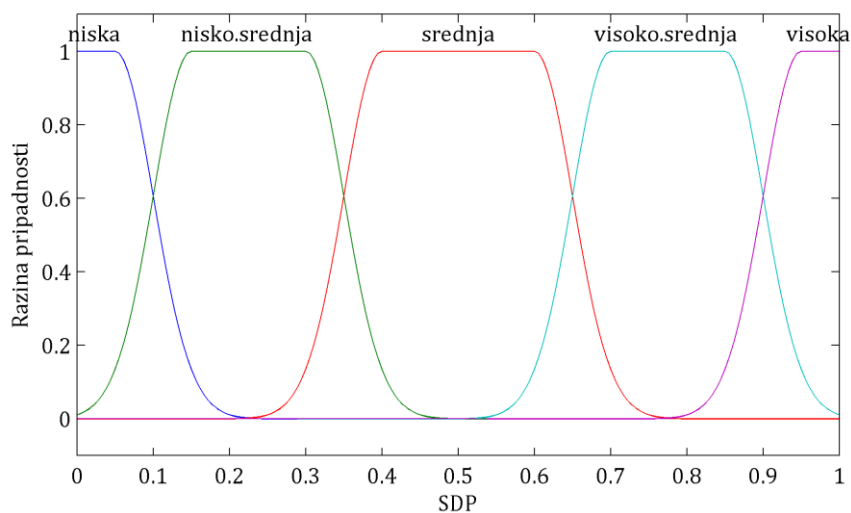
slika 0.9 Funkcije pripadnosti varijable „količina izradaka u među-operacijskom čekanju“, KMC (Nada et al., 2006.)



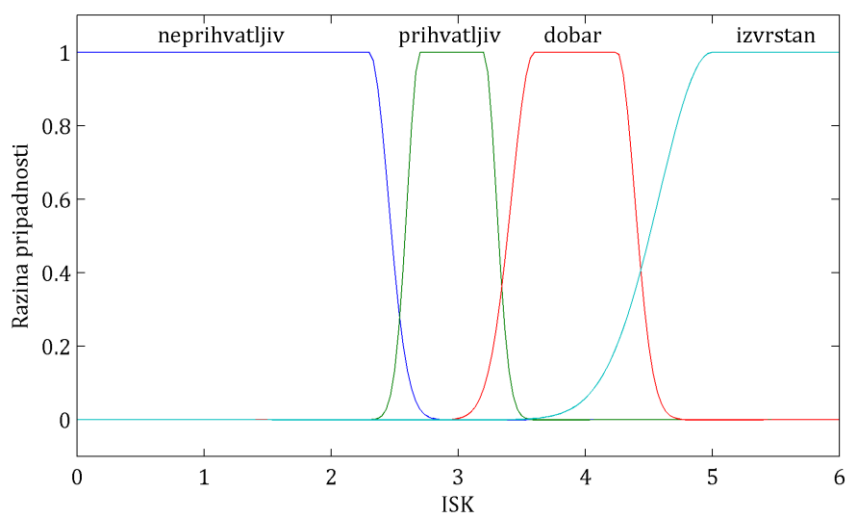
slika 0.10 Funkcije pripadnosti varijable „odziv na pojavu pogreške“, OPP (Nada et al., 2006.)



slika 0.11 Funkcije pripadnosti varijable „statistička pogreška provjere“, STPP



slika 0.12 Funkcije pripadnosti varijable „spособnost detekcije pogreške“, SDP (Nada et al., 2006.)



slika 0.13 Funkcije pripadnosti varijable „indeks sposobnosti konfiguracije“, ISK (Nada et al., 2006.)

PRILOG B

Pravila za izračun varijabli sustava neizrazite logike

Pravila za izračun varijable „Kvaliteta morfološke strukture konfiguracije“, KMSK:

1. If (BP is malen) and (BSP is malen) then (KMSK is visoka) (1)
2. If (BP is malen) and (BSP is manji.srednji) then (KMSK is visoka) (1)
3. If (BP is malen) and (BSP is srednji) then (KMSK is visoka) (1)
4. If (BP is malen) and (BSP is veći.srednji) then (KMSK is visoko.srednja) (1)
5. If (BP is malen) and (BSP is velik) then (KMSK is srednja) (1)
6. If (BP is manji.srednji) and (BSP is malen) then (KMSK is visoka) (1)
7. If (BP is manji.srednji) and (BSP is manji.srednji) then (KMSK is visoko.srednja) (1)
8. If (BP is manji.srednji) and (BSP is srednji) then (KMSK is visoko.srednja) (1)
9. If (BP is manji.srednji) and (BSP is veći.srednji) then (KMSK is srednja) (1)
10. If (BP is manji.srednji) and (BSP is velik) then (KMSK is srednja) (1)
11. If (BP is srednji) and (BSP is malen) then (KMSK is srednja) (1)
12. If (BP is srednji) and (BSP is manji.srednji) then (KMSK is srednja) (1)
13. If (BP is srednji) and (BSP is srednji) then (KMSK is srednja) (1)
14. If (BP is srednji) and (BSP is veći.srednji) then (KMSK is nisko.srednja) (1)
15. If (BP is srednji) and (BSP is velik) then (KMSK is nisko.srednja) (1)
16. If (BP is veći.srednji) and (BSP is malen) then (KMSK is nisko.srednja) (1)
17. If (BP is veći.srednji) and (BSP is manji.srednji) then (KMSK is nisko.srednja) (1)
18. If (BP is veći.srednji) and (BSP is srednji) then (KMSK is niska) (1)
19. If (BP is veći.srednji) and (BSP is veći.srednji) then (KMSK is niska) (1)
20. If (BP is veći.srednji) and (BSP is velik) then (KMSK is niska) (1)
21. If (BP is velik) and (BSP is malen) then (KMSK is niska) (1)
22. If (BP is velik) and (BSP is manji.srednji) then (KMSK is niska) (1)
23. If (BP is velik) and (BSP is srednji) then (KMSK is niska) (1)
24. If (BP is velik) and (BSP is veći.srednji) then (KMSK is niska) (1)
25. If (BP is velik) and (BSP is velik) then (KMSK is niska) (1)

Pravila za izračun variјable „Sposobnost prevencije pogreške“, SPP:

1. If (KMSK is visoka) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is visoka) (1)
2. If (KMSK is visoka) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is visoka) (1)
3. If (KMSK is visoka) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is visoka) (1)
4. If (KMSK is visoka) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
5. If (KMSK is visoka) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is srednja) (1)
6. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is visoka) (1)
7. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is visoka) (1)
8. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
9. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
10. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is srednja) (1)
11. If (KMSK is srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is visoka) (1)
12. If (KMSK is srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
13. If (KMSK is srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
14. If (KMSK is srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is srednja) (1)
15. If (KMSK is srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is srednja) (1)
16. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is visoko.srednja) (1)
17. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
18. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is srednja) (1)
19. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is srednja) (1)
20. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is srednja) (1)
21. If (KMSK is niska) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is visoko.srednja) (1)

22. If (KMSK is niska) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
23. If (KMSK is niska) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is srednja) (1)
24. If (KMSK is niska) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is srednja) (1)
25. If (KMSK is niska) and (USP is visoko.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is srednja) (1)
26. If (KMSK is visoka) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is visoko.srednja) (1)
27. If (KMSK is visoka) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
28. If (KMSK is visoka) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
29. If (KMSK is visoka) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is srednja) (1)
30. If (KMSK is visoka) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is nisko.srednja) (1)
31. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is visoko.srednja) (1)
32. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
33. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is srednja) (1)
34. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is srednja) (1)
35. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is nisko.srednja) (1)
36. If (KMSK is srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is visoko.srednja) (1)
37. If (KMSK is srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is visoko.srednja) (1)
38. If (KMSK is srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is srednja) (1)
39. If (KMSK is srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)
40. If (KMSK is srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is nisko.srednja) (1)
41. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is srednja) (1)
42. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is srednja) (1)
43. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

44. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

45. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is nisko.srednja) (1)

46. If (KMSK is niska) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is srednja) (1)

47. If (KMSK is niska) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is srednja) (1)

48. If (KMSK is niska) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

49. If (KMSK is niska) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

50. If (KMSK is niska) and (USP is sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is nisko.srednja) (1)

51. If (KMSK is visoka) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is srednja) (1)

52. If (KMSK is visoka) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is srednja) (1)

53. If (KMSK is visoka) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is srednja) (1)

54. If (KMSK is visoka) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

55. If (KMSK is visoka) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is nisko.srednja) (1)

56. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is srednja) (1)

57. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is srednja) (1)

58. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is srednja) (1)

59. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

60. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is nisko.srednja) (1)

61. If (KMSK is srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is srednja) (1)

62. If (KMSK is srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is srednja) (1)

63. If (KMSK is srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is srednja) (1)

64. If (KMSK is srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

65. If (KMSK is srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is nisko.srednja) (1)

66. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is nisko.srednja) (1)

67. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

68. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

69. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is niska) (1)

70. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is niska) (1)

71. If (KMSK is niska) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is nisko.srednja) (1)

72. If (KMSK is niska) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

73. If (KMSK is niska) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

74. If (KMSK is niska) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is niska) (1)

75. If (KMSK is niska) and (USP is uvjetno.sposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is niska) (1)

76. If (KMSK is visoka) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is nisko.srednja) (1)

77. If (KMSK is visoka) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

78. If (KMSK is visoka) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is niska) (1)

79. If (KMSK is visoka) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is niska) (1)

80. If (KMSK is visoka) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is niska) (1)

81. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is nisko.srednja) (1)

82. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is nisko.srednja) (1)

83. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is niska) (1)

84. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is niska) (1)

85. If (KMSK is visoko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is niska) (1)

86. If (KMSK is srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is niska) (1)

87. If (KMSK is srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is niska) (1)

88. If (KMSK is srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is niska) (1)
89. If (KMSK is srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is niska) (1)
90. If (KMSK is srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is niska) (1)
91. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is niska) (1)
92. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is niska) (1)
93. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is niska) (1)
94. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is niska) (1)
95. If (KMSK is nisko.srednja) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is niska) (1)
96. If (KMSK is niska) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is visoka) then (SPP is niska) (1)
97. If (KMSK is niska) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is viša.srednja) then (SPP is niska) (1)
98. If (KMSK is niska) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is srednja) then (SPP is niska) (1)
99. If (KMSK is niska) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niža.srednja) then (SPP is niska) (1)
100. If (KMSK is niska) and (USP is nesposoban.proces) and (RIESP is niska) then (SPP is niska) (1)

Pravila za izračun varijable „Odziv na pojavu pogreške“, OPP:

1. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is malena) then (OPP is visok) (1)
2. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is visok) (1)
3. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is srednja) then (OPP is visok) (1)
4. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is visok) (1)
5. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is velika) then (OPP is visok) (1)
6. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is malena) then (OPP is visok) (1)
7. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is visok) (1)
8. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is visok) (1)
9. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is visok) (1)
10. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is velika) then (OPP is visok) (1)
11. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is malena) then (OPP is visok) (1)
12. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is visok) (1)
13. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is visok) (1)
14. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is visok) (1)
15. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is velika) then (OPP is visok) (1)
16. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is malena) then (OPP is viši.srednji) (1)
17. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is viši.srednji) (1)
18. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is viši.srednji) (1)
19. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is viši.srednji) (1)
20. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is velika) then (OPP is viši.srednji) (1)
21. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is malena) then (OPP is srednji) (1)
22. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is manja.srednja)

then (OPP is srednji) (1)

23. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is srednja) then (OPP is srednji) (1)

24. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is srednji) (1)

25. If (AKS is intezivna.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is velika) then (OPP is srednji) (1)

26. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is malena) then (OPP is visok) (1)

27. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is visok) (1)

28. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is srednja) then (OPP is viši.srednji) (1)

29. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is viši.srednji) (1)

30. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoka) and (KMC is velika) then (OPP is srednji) (1)

31. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is malena) then (OPP is visok) (1)

32. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is visok) (1)

33. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is viši.srednji) (1)

34. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is viši.srednji) (1)

35. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is velika) then (OPP is srednji) (1)

36. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is malena) then (OPP is viši.srednji) (1)

37. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is viši.srednji) (1)

38. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is srednji) (1)

39. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is srednji) (1)

40. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is srednja) and (KMC is velika) then (OPP is niži.srednji) (1)

41. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is malena) then (OPP is srednji) (1)

42. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is srednji) (1)

43. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

44. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is

veća.srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

45. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is velika) then (OPP is nizak) (1)

46. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is malena) then (OPP is srednji) (1)

47. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is srednji) (1)

48. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

49. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is nizak) (1)

50. If (AKS is umjerena.u.procesu) and (RIJ is niska) and (KMC is velika) then (OPP is nizak) (1)

51. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoka) and (KMC is malena) then (OPP is srednji) (1)

52. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoka) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is srednji) (1)

53. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoka) and (KMC is srednja) then (OPP is srednji) (1)

54. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoka) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is srednji) (1)

55. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoka) and (KMC is velika) then (OPP is srednji) (1)

56. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is malena) then (OPP is niži.srednji) (1)

57. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

58. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

59. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

60. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is visoko.srednja) and (KMC is velika) then (OPP is niži.srednji) (1)

61. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is srednja) and (KMC is malena) then (OPP is niži.srednji) (1)

62. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

63. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

64. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is srednja) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is niži.srednji) (1)

65. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is srednja) and (KMC is velika) then (OPP is niži.srednji) (1)

66. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is malena) then

(OPP is nizak) (1)

67. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is nizak) (1)

68. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is srednja) then (OPP is nizak) (1)

69. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is nizak) (1)

70. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is nisko.srednja) and (KMC is velika) then (OPP is nizak) (1)

71. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is niska) and (KMC is malena) then (OPP is nizak) (1)

72. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is niska) and (KMC is manja.srednja) then (OPP is nizak) (1)

73. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is niska) and (KMC is srednja) then (OPP is nizak) (1)

74. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is niska) and (KMC is veća.srednja) then (OPP is nizak) (1)

75. If (AKS is na.kraju.linije) and (RIJ is niska) and (KMC is velika) then (OPP is nizak) (1)

Pravila za izračun varijable „Sposobnost detekcije pogreške“, SDP:

1. If (OPG is visok) and (STPP is niska) then (SDP is visoka) (1)
2. If (OPG is viši.srednji) and (STPP is niska) then (SDP is visoka) (1)
3. If (OPG is srednji) and (STPP is niska) then (SDP is visoko.srednja) (1)
4. If (OPG is niži.srednji) and (STPP is niska) then (SDP is srednja) (1)
5. If (OPG is nizak) and (STPP is niska) then (SDP is nisko.srednja) (1)
6. If (OPG is visok) and (STPP is nisko.srednja) then (SDP is visoka) (1)
7. If (OPG is viši.srednji) and (STPP is nisko.srednja) then (SDP is visoko.srednja) (1)
8. If (OPG is srednji) and (STPP is nisko.srednja) then (SDP is srednja) (1)
9. If (OPG is niži.srednji) and (STPP is nisko.srednja) then (SDP is nisko.srednja) (1)
10. If (OPG is nizak) and (STPP is nisko.srednja) then (SDP is nisko.srednja) (1)
11. If (OPG is visok) and (STPP is srednja) then (SDP is visoko.srednja) (1)
12. If (OPG is viši.srednji) and (STPP is srednja) then (SDP is visoko.srednja) (1)
13. If (OPG is srednji) and (STPP is srednja) then (SDP is srednja) (1)
14. If (OPG is niži.srednji) and (STPP is srednja) then (SDP is nisko.srednja) (1)
15. If (OPG is nizak) and (STPP is srednja) then (SDP is niska) (1)
16. If (OPG is visok) and (STPP is visoko.srednja) then (SDP is visoko.srednja) (1)
17. If (OPG is viši.srednji) and (STPP is visoko.srednja) then (SDP is srednja) (1)
18. If (OPG is srednji) and (STPP is visoko.srednja) then (SDP is nisko.srednja) (1)
19. If (OPG is niži.srednji) and (STPP is visoko.srednja) then (SDP is niska) (1)
20. If (OPG is nizak) and (STPP is visoko.srednja) then (SDP is niska) (1)
21. If (OPG is visok) and (STPP is velika) then (SDP is nisko.srednja) (1)
22. If (OPG is viši.srednji) and (STPP is velika) then (SDP is nisko.srednja) (1)
23. If (OPG is srednji) and (STPP is velika) then (SDP is niska) (1)
24. If (OPG is niži.srednji) and (STPP is velika) then (SDP is niska) (1)
25. If (OPG is nizak) and (STPP is velika) then (SDP is niska) (1)

Pravila za izračun varijable „Indeks sposobnosti konfiguracije“, ISK:

1. If (SPP is visoka) and (SDP is visoka) then (ISK is izvrstan) (1)
2. If (SPP is visoka) and (SDP is visoko.srednja) then (ISK is izvrstan) (1)
3. If (SPP is visoka) and (SDP is srednja) then (ISK is izvrstan) (1)
4. If (SPP is visoka) and (SDP is nisko.srednja) then (ISK is dobar) (1)
5. If (SPP is visoka) and (SDP is niska) then (ISK is dobar) (1)
6. If (SPP is visoko.srednja) and (SDP is visoka) then (ISK is izvrstan) (1)
7. If (SPP is visoko.srednja) and (SDP is visoko.srednja) then (ISK is dobar) (1)
8. If (SPP is visoko.srednja) and (SDP is srednja) then (ISK is dobar) (1)
9. If (SPP is visoko.srednja) and (SDP is nisko.srednja) then (ISK is dobar) (1)
10. If (SPP is visoko.srednja) and (SDP is niska) then (ISK is prihvatljiv) (1)
11. If (SPP is srednja) and (SDP is visoka) then (ISK is dobar) (1)
12. If (SPP is srednja) and (SDP is visoko.srednja) then (ISK is dobar) (1)
13. If (SPP is srednja) and (SDP is srednja) then (ISK is prihvatljiv) (1)
14. If (SPP is srednja) and (SDP is nisko.srednja) then (ISK is prihvatljiv) (1)
15. If (SPP is srednja) and (SDP is niska) then (ISK is prihvatljiv) (1)
16. If (SPP is nisko.srednja) and (SDP is visoka) then (ISK is prihvatljiv) (1)
17. If (SPP is nisko.srednja) and (SDP is visoko.srednja) then (ISK is prihvatljiv) (1)
18. If (SPP is nisko.srednja) and (SDP is srednja) then (ISK is neprihvatljiv) (1)
19. If (SPP is nisko.srednja) and (SDP is nisko.srednja) then (ISK is neprihvatljiv) (1)
20. If (SPP is nisko.srednja) and (SDP is niska) then (ISK is neprihvatljiv) (1)
21. If (SPP is niska) and (SDP is visoka) then (ISK is neprihvatljiv) (1)
22. If (SPP is niska) and (SDP is visoko.srednja) then (ISK is neprihvatljiv) (1)
23. If (SPP is niska) and (SDP is srednja) then (ISK is neprihvatljiv) (1)
24. If (SPP is niska) and (SDP is nisko.srednja) then (ISK is neprihvatljiv) (1)
25. If (SPP is niska) and (SDP is niska) then (ISK is neprihvatljiv) (1)

POPIS RADOVA

- Doboviček, Sandro; Mikac, Tonči; Damiani, Dani: "Logički postupak određivanja prikladne metode za računanje sposobnosti proizvodnog procesa", *Tehnički vjesnik : znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku*, 20 (5), 739-746, 2013.
- Doboviček, Sandro; Kostelac, Dražen; Vuković, Aleksandar; Ikonić, Milan; Žurga, Snežana: "Managing large projects through a virtual team organization", *4th International Scientific Conference "Management of technology step to sustainable production" (MOTSP 2012.): proceedings, Zagreb : Croatian Association for PLM 2012.*, 441-447, 2012.
- Doboviček, Sandro; Pavletić, Duško; Mikac, Tonči; Ikonić, Milan; Žic, Samir: "Qualification program for developing new parts in automotive industry", *The 6th International Working Conference "Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches"*, Belgrade, 113-117, 2011.
- Vuković, Aleksandar; Ikonić, Milan; Doboviček, Sandro: "Model for leadership competence management in metallurgical enterprise", *Metalurgija*, 50 (3), 167-171, 2011.
- Kostelac, Dražen; Matrljan, Damir; Doboviček, Sandro: "Relationship between process and project management", *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, 22 (2011.), 1, Vienna, ISSN 1726-9679, 2011.
- Doboviček, Sandro; Ikonić, Milan; Mikac, Tonči; Perinić, Mladen; Rubeša, Ivan: "Graphical depicting of processing cycle in multiproduct production cycle", *Proceedings TMT 2010.*, 701-704, 2010.
- Vuković, Aleksandar; Ikonić, Milan; Doboviček, Sandro: "Reconfigurable manufacturing system and the need for new Taylorism", *Engineering review: znanstveni časopis za nove tehnologije u strojarstvu, brodogradnji i elektrotehnici*, 30 (2), 71-82, 2010.
- Žic, Samir; Mikac, Tonči; Doboviček, Sandro, "Application of ADL matrix in developed industrial companies", *Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings The 20th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Theory, Practice & Education" 2009.*, Vienna, Austria, 677-678, 2009.