

**Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko**

Sebastjan Zorzut

**Vodenje proizvodnje v procesni
industriji z upoštevanjem ključnih
kazalnikov učinkovitosti**

Doktorska disertacija

Mentor: izred. prof. dr. Gašper Mušič

V Ljubljani, junij 2009

Zahvala

Najlepše se zahvaljujem svojemu mentorju izred. prof. dr. Gašperju Mušiču za pomoč in strokovne nasvete pri nastajanju pričujočega dela, za potrpežljivo branje besedila in vzor pri natančnem formuliranju in predstavljanju rezultatov raziskave.

Iskrena zahvala gre tudi dr. Vladimirju Jovanu, ki me je spremljal na moji raziskovalni poti od začetka do konca, od blizu ali daleč, me opogumljal v trenutkih dvoma in se z mano veselil novih spoznanj in odkritij. Posebna zahvala gre tudi dr. Dejanu Gradišarju, saj sva skupaj pretapljala ideje v otipljive rezultate in jim dala obliko, ki je predstavljena v tem delu, vmes pa vedno dobila čas za prijateljsko besedo.

Zahvalil bi se tudi prof dr. Stanku Strmčniku in ostalim sodelavcem Odseka za sisteme in vodenje, ki so me z veseljem sprejeli medse in mi omogočili raziskovalno pot in popotovanje preko številnih izzivov in doživetij do pričujočega dela.

Velika zahvala gre tudi sestri Marjetki za slovnični pregled besedila.

In na koncu bi se rad zahvalil še svoji družini, Anamariji in Angeli ter staršem in prijateljem in drugim, ki ste me s pogovorom, spodbudo, dobro voljo ali kako drugače spremljali na tej poti.

Povzetek

Doktorska disertacija obravnava problematiko vodenja in optimizacije proizvodnje v podjetjih s poudarkom na procesni industriji. Vodenje v podjetjih obsega več hierarhičnih nivojev, od osnovnega in nadzornega vodenja tehnoloških procesov preko vodenja in optimizacije proizvodnje do vodenja podjetja na poslovnem nivoju. Naloga vodenja proizvodnje je preslikava kratkoročnih in srednjeročnih planov s poslovnega nivoja vodenja v obliko, ki je razumljiva nadzornemu nivoju vodenja (dnevni rasporedi dela, parametri, ki določajo režim delovanja tehnoloških procesov, itd.). Pod pojmom režimi delovanja lahko razumemo različne delovne točke tehnoloških procesov. Za ocenjevanje uspešnosti vodenja je potrebno definirati merljive cilje vodenja in postopke za njihovo implementacijo.

Ocena stopnje doseganja ciljev je lahko kvalitativna ali kvantitativna, odvisno od objekta ocenjevanja. V splošnem so ocene stvarnih procesov kvantitativne, saj so povezane z merljivimi fizikalnimi dejstvi, medtem ko so ocene subjektivnih lastnosti vezane na občutke in je njihovo ocenjevanje tako bolj kvalitativno (npr. zadovoljstvo zaposlenih, strank, itd.). Na poslovnem nivoju vodenja zasledimo velik delež kvalitativnih ocen, kar je povezano z naravo procesov, ki se na tem nivoju izvajajo (ocenjevanje uspešnosti storitev, razvoj notranjih procesov, itd.), predstavniki kvalitativnih meril pa so finančni izkazi uspešnosti poslovanja. V literaturi zasledimo številne sistemske pristope k tej problematiki, imenovane "sistemi merjenja učinkovitosti" (angl. *Performance Measurement Systems PMS*). Eden od takšnih sistemov je sistem ključnih kazalnikov učinkovitosti KPI (angl. *Key Performance Indicators*), katerega metodologijo smo v doktorski disertaciji prenesli na proizvodni nivo vodenja in jo preimenovali v *proizvodni kazalniki učinkovitosti* (angl. *Production Performance Indicators pPI*). S to metodologijo smo lahko definirali merljive cilje vodenja proizvodnje na različnih področjih (produktivnost, kakovost produktov, stroški proizvodnje).

Avtomatsko vodenje osnovnih procesov je relativno enostavna funkcija. Nadzorni sistem vodenja je sestavljena funkcija, ki obsega postopkovno vodenje posameznih procesov, vsebuje pa tudi funkcije diagnostike in komunikacije z operaterjem, zbiranje, predstavitev in posredovanje podatkov, varovanje in alarmiranje, kar predstavlja višjo

stopnjo kompleksnosti v primerjavi z osnovnim vodenjem. Razsežnost problema, ki ga predstavlja vodenje proizvodnje (angl. *plant-wide control*), je v primerjavi z osnovnim in nadzornim vodenjem posameznih naprav mnogo večja. Izbira reguliranih spremenljivk za sistem vodenja za proizvodnjo ni tako jasna in enostavna, kot to velja za posamezne enote. Tudi lokalne regulacijske odločitve, ki se izvedejo na nivoju posamezne enote, imajo lahko daljnosežne posledice za celotno proizvodnjo.

Za potrebe testiranja in implementacije sistema proizvodnih kazalnikov učinkovitosti pPI in sistema zaprtozanka vodenja celotne proizvodnje smo potrebovali model proizvodnje. Kot prvi korak v tej smeri smo pregledali različne pristope k sintezi modelov tako proizvodnih procesov kot tudi celotnih podjetij. Nadalje smo predstavili primer izdelave proceduralnega modela za izbrani šaržni proces polimerizacije, ki smo ga realizirali v programskem okolju Matlab, Simulink in Stateflow, vhodne in izhodne proizvodne podatke pa smo shranjevali v podatkovno bazo MS Access. V okviru proceduralnega modela smo zgradili sistem za izračunavanje in prikazovanje proizvodnih kazalnikov učinkovitosti pPI.

Optimizacija predstavlja pomembno funkcijo vodenja proizvodnje in temelji na minimizaciji/maksimizaciji dane kriterijske funkcije. Optimizacijske metode lahko temeljijo na matematičnem modelu proizvodnje in ustreznih algoritmih, kot je optimizacija proizvodnje v realnem času (angl. *Real-Time Optimization RTO*). V literaturi zasledimo tudi tako imenovano samooptimizirajoče vodenje sistemov (angl. *self-optimizing control*), ki temelji na ustrezni izbiri reguliranih spremenljivk. Z regulacijo teh spremenljivk na predpisano referenčno vrednost se sistem nahaja v optimalnem režimu delovanja ali v njegovi bližnji okolici. Tako se kompleksen optimizacijski problem prevede na enostavnejši regulacijski problem. V doktorski disertaciji smo združili koncepta pPI-jev in samooptimizirajočega vodenja in dobili sistem za vodenje in optimizacijo proizvodnega procesa na modelu proizvodnje. Izbiro ustreznih referenčnih vrednosti za pPI-je v povratni zanki smo izvajali ročno s pomočjo stroškovnega modela proizvodnje, medtem ko se je regulacija pPI-jev na izbrane referenčne vrednosti izvajala avtomatsko, pri čemer smo preizkusili dva regulatorja: regulator na osnovi vpoglednih tabel (angl. *look-up table*) in prediktivnega regulatorja na osnovi modela (angl. *Model Predictive Control MPC*). Simulacijski rezultati vodenja so pokazali učinkovitejše delovanje regulatorja MPC.

Z eksperimentalnim delom na področju avtomatskega vodenja proizvodnje z uporabo pPI-jev, ki smo ga implementirali na proceduralnem modelu proizvodnje, smo spoznali, da na kakovost regulacije močno vplivajo parametri kazalnikov, kot so pogostost izračunavanja in količina podatkov, ki se uporabljajo za izračunavanje kazalnikov. Z uporabo modificiranih kazalnikov, ki dodatno upoštevajo trenutne trende v proizvodnih procesih, ki jih s kazalniki ocenjujemo, smo dosegli boljše rezultate.

Abstract

The thesis deals with the problem of controlling and optimizing the production in process industries. The control structure in production companies can be divided in more hierarchical layers, ranging from the control of the basic units on a production process level through supervisory control of technological processes, plant-wide control and optimization to the management control on a business level. Production control deals with the translation of short-term and medium-term plans of the management control level into a daily schedule of production tasks, set of desired production process parameters, etc. In order to assess the production effectiveness and efficiency, it is essential to define appropriate measures for the main production goals as well as the implementation procedures for such measures.

The measures can be qualitative or quantitative and are dependent on the evaluated objects. As the physical processes are based on the physical laws, it is natural to perform quantitative measures in assessing them. Qualitative measures are usually used for assessing subjective characteristics, which are more often found in relation to people. In literature review we have found many systematic approaches in the field of performance measurements on the company level, called Performance Measurement Systems PMS. A typical example of such systems is a Key Performance Indicators (KPIs) system. To achieve a balanced development of production processes in different segments (production costs, quality and effectiveness aspects), it is useful to transfer the KPI methodology from the company level to the production process level and to name it production Performance Indicators (pPIs).

Automatic control of basic processes is a relatively simple function. Supervisory control is a composed function, incorporating procedural control, diagnostic and communication functions, acquisition, transfer and representation of production data as well as protecting function with alarming, representing an increased degree of complexity in accordance to elementary control. The complexity of the plant-wide control is even higher as it is not so obvious and easy to identify proper controlled variables for plant-wide control in comparison with simple control loops. Furthermore, local control decisions can have broader implications on other production processes of the entire production plant.

In order to test and implement the pPI system and a plant-wide control system, a proper production process model was required. There are many approaches in the field of modeling the production companies that include production processes as well. Our first step was to carry out the survey of such approaches. Next, a model of a polymerization batch production process in the Matlab and Simulink modeling environment was developed. The procedural control was realized in a Stateflow toolbox and the production data was stored in a Microsoft Access database. The procedural model of a polymerization plant was further upgraded with a pPI system and a plant-wide control system.

A plant optimization is an important production control function and is based on the minimization or maximization of a special criteria function. In practice the optimization procedures are based on the mathematical model of the production plant and the algorithm that minimizes or maximizes the criteria function. The most common algorithm of this kind is a Real-Time Optimization algorithm. Apart from the mathematical approach to the problem of production optimization there is also a so-called self-optimizing control procedure that is based on a proper selection of controlled variables. If such variables are controlled to the prescribed reference values, the system is performing in optimal or near optimal region. With such an approach a complex optimization problem is transformed to a simpler control problem. In the thesis we have used the pPI system for identifying and evaluating the regulatory variables used in a self-optimizing control scheme. With this approach a system for plant-wide control and optimization was developed and tested on a procedural model of a polymerization plant. The reference values for the pPIs in the control loop were chosen manually with the support of the production cost model, while the pPIs were automatically controlled to the prescribed set-points by a controller. We have tested two different controllers; a controller based on look-up tables and a Model Predictive Controller (MPC), which has achieved better results.

Experimental work, done in the domain of a plant-wide control, which is based on the pPIs in the control loop, has led to certain conclusions. The quality of plant-wide control is highly dependent on the p-PIs' parameters such as the frequency of pPIS evaluation, the quantity of historical data in the pPIs, etc. The use of modified pPIs, placing additional stress on current trends in production process, has returned better results.

Originalni prispevki doktorske disertacije

Zasnova, validacija in izvedba modela tehnološkega procesa za proizvodnjo polimernih emulzij kot testne platforme za preizkušanje novih pristopov k vodenju proizvodnje, ki temelji na realnem šaržnem proizvodnem procesu.

Preizkušanje novih pristopov k vodenju kompleksnih tehnoloških procesov je povezano s problemom razpoložljivosti takšnih procesov za eksperimentiranje, varnostjo in stroški poseganja v sam proces med samim obratovanjem. Iz takšnih razlogov se nove sisteme za vodenje vse pogosteje preizkuša na modelih procesov. V okviru disertacije smo razvili in validirali model tehnološkega procesa za proizvodnjo polimernih emulzij, v okviru katerega smo lahko preizkušali koncept samooptimizirajočega vodenja proizvodnje z uporabo proizvodnih kazalnikov učinkovitosti pPI.

Zasnova koncepta zaprtozančnega vodenja proizvodnje na temelju samooptimizirajočega vodenja, kjer nastopajo v vlogi reguliranih spremenljivk izbrani proizvodni kazalniki učinkovitosti pPI, vodja proizvodnje pa nastavlja primerne referenčne vrednosti na podlagi zahtev poslovnega nivoja in ob pomoči sistema za podporo odločanju.

Princip samooptimizirajočega vodenja omogoča sistematičen pristop k problematiki učinkovitega vodenja kompleksnih sistemov vse od definicije cilja vodenja, preko identifikacije manipulativnih in reguliranih spremenljivk sistema do analize vpliva motenj na vodenje sistema. Regulirane spremenljivke morajo zadovoljevati predpisane kriterije, ki so povezani z vodljivostjo in robustnostjo sistema. Regulirane spremenljivke predstavljajo podmnožico ali kombinacijo izbranih meritev v sistemu. Z regulacijo teh spremenljivk na izbrano referenčno vrednost dosežemo, da sistem deluje v optimalnem področju delovanja ali v njegovi bližnji okolici. V disertaciji smo uporabili kazalnike pPI kot regulirane spremenljivke sistema. Z analizo relacij med proizvodnimi stroški, produktivnostjo in kakovostjo surovin, smo pridobili stroškovni model proizvodnje, ki smo ga uporabljali za nastavljanje referenčnih vrednosti za kazalnike v povratni zanki.

Izvedba zaprtozančnega vodenja proizvodnje na modelu tehnološkega procesa za proizvodnjo polimernih emulzij ob uporabi dveh vrst regulatorjev: regulatorja na osnovi vpoglednih tabel in prediktivnega regulatorja na osnovi matematičnega modela procesa.

Predstavljen koncept zaprtozančnega vodenja proizvodnje smo preizkusili na modelu tehnološkega procesa za proizvodnjo polimernih emulzij. Stroškovno optimizacijo izvaja vodja proizvodnje z nastavljanjem referenčnih vrednosti za kazalnika, ki ju regulira proizvodni regulator. Regulator na osnovi vpoglednih tabel je služil za testiranje predstavljenega koncepta vodenja. Z uporabo prediktivnega regulatorja na osnovi poenostavljenega matematičnega modela proizvodnje smo preizkušali različne režime delovanja proizvodnje in analizirali vpliv časovnih parametrov algoritma za izračunavanje kazalnikov na kakovost regulacije.

KAZALO

1. UVOD.....	1
2. ORGANIZACIJSKE STRUKTURE V PODJETJIH.....	5
2.1 Temeljni mejniki v zgodovini razvoja proizvodnih podjetij	5
2.2 Organizacija in tipi proizvodnih podjetij	9
2.2.1 Organizacijske strukture v podjetjih	9
2.2.2 Vrste proizvodnih procesov	11
2.3 Organizacijska struktura vodenja v proizvodnem podjetju	13
3. VLOGA INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJ V PODJETJIH.....	15
3.1 Informacijski tokovi v podjetju.....	16
3.2 Zakaj so informacijsko-komunikacijski sistemi pomembni	17
3.3 Sistemi za vodenje in nadzor proizvodnih procesov	18
3.4 Sistemi za podporo odločanju DSS	20
3.4.1 Ekspertni sistemi.....	21
3.5 Uporaba opisanih pristopov in hierarhija odločitvenih nivojev v podjetju	21
4. METODOLOGIJA KLJUČNIH KAZALNIKOV UČINKOVITOSTI KPI..	23
4.1 Uravnoteženi sistem kazalnikov BSC.....	24
4.2 Predstavitev kazalnikov in njihovih atributov	26
4.2.1 Dimenzije (atributi) kazalnikov	26
4.2.2 Predstavitev vrednosti kazalnikov	27
4.2.3 Hierarhija kazalnikov.....	27
4.3 Kazalniki procesnega in proizvodnega nivoja vodenja	28
4.3.1 Kazalniki procesnega nivoja vodenja	30
4.3.2 Kazalniki proizvodnega nivoja vodenja pPI.....	30
4.4 Povezanost kazalnikov na različnih hierarhičnih nivojih	33
4.5 Uvajanje kazalnikov proizvodnega nivoja pPI	33
4.5.1 Primer 8-koračnega iterativnega zaprtozančnega modela za izračunavanje kazalnikov	34
4.6 Časovni parametri pri izračunavanju kazalnikov.....	36
4.7 Samo izračunavanje kazalnikov ni dovolj	37

5. ZAPRTOZANČNA PARADIGMA VODENJA PROIZVODNJE	39
5.1 Samooptimizirajoče vodenje procesov.....	40
5.1.1 Izbira manipulativnih in reguliranih spremenljivk.....	42
5.2 Zaprtozančna regulacijska shema z uporabo pPI	44
6. KONCEPTI MODELIRANJA PROIZVODNIH PROCESOV	47
6.1 CIMOSA	48
6.2 GRAI in GRAI/GIM	48
6.3 PERA.....	49
6.4 GERAM – krovni koncept modeliranja	49
6.5 ARIS.....	50
6.6 Ostale metodologije.....	51
6.6.1 Sistemi MES.....	51
6.6.2 Standard ISA-95	51
6.7 Modeliranje proizvodnih procesov v podjetju	51
7. MODEL PROIZVODNJE.....	53
7.1 Opis tehnološkega procesa za proizvodnjo polimernih emulzij.....	54
7.1.1 Opis tehnološkega postopka za izdelavo homopolimernih emulzij.....	55
7.1.2 Opis tehnološkega postopka za izdelavo kopolimernih emulzij	56
7.2 Namen, funkcije in poenostavitve modela proizvodnega procesa	56
7.3 Izbira simulacijskega orodja.....	58
7.4 Struktura modela proizvodnega obrata Polimerizacija v Mitolu	59
7.5 Osnovni modeli proizvodnih enot	60
7.6 Postopkovno vodenje proizvodnega procesa	62
7.6.1 Vrste opravil	63
7.6.2 Razvrstitev in proženje opravil	65
7.6.3 Postopek izvajanja šarže.....	67
7.6.4 Postopek egalizacije	69
7.7 Podatkovni model proizvodnje.....	70
7.8 Grafični uporabniški vmesnik GUI.....	70
7.9 Modeliranje preostalih delov procesa	71
7.9.1 Alokacija in spremljanje zasedenosti virov.....	71
7.9.2 Zastoji v proizvodnji	71
7.9.3 Modeliranje kakovosti izdelka	72
7.9.4 Stroški proizvodnje	74
7.10 Verifikacija in validacija modela	75
7.10.1 Validacija velikosti in trajanja šarž ter prehodnih časov med šaržami ...	80
7.10.2 Validacija modela za opisovanje kakovosti izdelkov	85
8. KAZALNIKI ZA PROIZVODNI PROCES POLIMERIZACIJE	87
8.1 Produktivnost	87

8.2	Kakovost izdelkov	88
8.3	Proizvodni stroški	88
8.4	Implementacija kazalnikov	89
8.5	Občutljivost pPI-jev na spremembe manipulativnih spremenljivk.....	93
8.5.1	Monotona proizvodnja.....	93
8.5.2	Raznovrstna proizvodnja	98
8.6	Identifikacija proizvodnega procesa po metodi najmanjših kvadratov	100
8.7	Ustreznost pPI-jev za samooptimizirajoče vodenje proizvodnje.....	109
9.	IMPLEMENTACIJA ZAPRTOZANČNEGA VODENJA PROIZVODNJE NA MODELU PROIZVODNJE.....	111
9.1	Regulacijska shema zaprtozančnega vodenja proizvodnje.....	112
9.2	Vodenje z regulatorjem na osnovi vpoglednih tabel	113
9.3	Vodenje z regulatorjem MPC	114
9.3.1	Primer vodenja z uporabo kazalnikov s krajšim časovnim oknom	119
10.	ZAKLJUČEK.....	123
11.	REFERENCE.....	125

1. Uvod

V proizvodnih podjetjih je vodenje procesov razdeljeno na več hierarhičnih nivojev, kjer naloge vodenja in usklajevanja osnovnih tehnoloških operacij opravlja procesni nivo vodenja, naloge planiranja in optimizacije proizvodnje opravlja proizvodni nivo vodenja, medtem ko strateško odločanje poteka na poslovnem nivoju vodenja. Za avtomatizacijo funkcij vodenja na procesnem nivoju v veliki večini obstajajo vsa potrebna orodja (aparatura in programska oprema) kot tudi teoretična znanja, na osnovi katerih je možno razviti sisteme vodenja.

Tudi na poslovnem nivoju so bili v zadnjih desetletjih razviti številni sistemi za celovito podporo izvajanju poslovnih funkcij ter sistemi za podporo odločanju, med katerimi so še posebej zanimivi sistemi za merjenje učinkovitosti (angl. *Performance Measurement Systems PMS*). Osnovna prednost slednjih je sistematičen pristop k identifikaciji merljivih ciljev poslovanja, ki izhajajo iz strategije poslovanja, in njihovi implementaciji. Merila pokrivajo tako finančna kot ostala področja poslovanja, ki kratkoročno in dolgoročno vplivajo na uspešnost podjetja.

Proizvodni nivo vodenja pa predstavlja tisti segment vodenja v podjetju, ki spaja tehnološke in poslovne funkcije podjetja, katere so si po naravi različne. Pomembna vloga proizvodnega nivoja vodenja je v obdelavi in posredovanju podatkov med poslovnimi in tehnološkimi procesi. Sodobni informacijsko-komunikacijski sistemi omogočajo zbiranje raznovrstnih podatkov, ki opisujejo stanje opreme in drugo dogajanje v proizvodnji. Za hitro in kakovostno odločanje je potrebna ustrezna izbira in predstavitev podmnožice teh podatkov zainteresiranim uporabnikom na različnih nivojih odločanja. Izbira podatkov, ki se posredujejo posameznemu uporabniku, je odvisna od cilja opazovanja za vsakega uporabnika posebej. Tako se povezovanje proizvodnega nivoja s poslovnim nivojem kaže v sprejemanju kratkoročnih planov in strategije razvoja iz poslovnega nivoja ter posredovanju podatkov o poteku in realizaciji preteklih naročil, podatkov o možnosti realizacije novih naročil v predvidenih rokih, podatkov o porabi delovnih sredstev (surovin, delovnih ur, energije), itd. na poslovni nivo.

V doktorski disertaciji se ukvarjamo s problematiko uspešnega vodenja proizvodnje, pri čemer je kot prvo potrebno definirati kriterije uspešnosti in učinkovitosti. Sistematičen pristop k obvladovanju slednjih na nivoju celotnega podjetja zasledimo v tako imenovanem konceptu ključnih kazalnikov učinkovitosti (angl. *Key Performance Indicators KPI*). Definicija kriterijev uspešnosti in učinkovitosti proizvodnih procesov je mogoča z definicijo KPI-jev za proizvodni nivo vodenja, ki jih bomo v tem delu imenovali **proizvodni kazalniki učinkovitosti** (angl. *production Performance Indicators pPI*). Ko so takšni kazalniki enkrat definirani, je potrebno definirati želene cilje v obliki referenčnih vrednosti za te kazalnike kot tudi regulacija kazalnikov na te referenčne vrednosti, kar predstavlja klasičen regulacijski problem, katerega reševanje je obdelano v okviru teorije vodenja sistemov (Strmčnik, 1998).

Naslednji korak k večji uspešnosti proizvodnje je mogoč z optimizacijo proizvodnih procesov, pri čemer je poleg optimizacije tehnoloških postopkov potrebna tudi stroškovna optimizacija. Optimizacija proizvodnje predstavlja nadaljnje stopnjevanje kompleksnosti v okviru problematike uspešnega vodenja proizvodnje, saj za svoje delovanje v osnovi potrebuje dober model proizvodnje, do katerega pa je v praksi zelo težko priti. V literaturi nadalje zasledimo princip samooptimizirajočega vodenja (angl. *self-optimizing control*), ki klasični optimizacijski problem ob določenih pogojih prevede na navaden regulacijski problem. Osnova tega koncepta je, da z vzdrževanjem izbranih reguliranih proizvodnih spremenljivk (lahko so to pPI-ji) na predpisanih referenčnih vrednostih, zagotavljamo obratovanje sistema v njegovem optimalnem področju oziroma njegovi bližnji okolici. Opisani princip sovпада z metodologijo KPI-jev na poslovnem nivoju vodenja, kjer vzdržujemo ključne kazalnike na želenih referenčnih vrednostih.

Z združitvijo vseh opisanih principov je možno formalizirati vodenje in optimizacijo proizvodnih procesov, v določenih primerih pa je z implementacijo ustreznih regulatorjev te procese možno tudi avtomatizirati. Pri izgradnji takšnih sistemov igrajo ključno vlogo modeli proizvodnih procesov, ki predstavljajo enega od gradnikov pri gradnji modela podjetja.

Poleg uvodnega poglavja obsega disertacija še osem poglavij. V *drugem poglavju* na kratko predstavimo zgodovinski razvoj poslovnih sistemov. Najprej na kratko predstavimo osnovne pojme, kot so vizija, strategija in cilji podjetja, saj to predstavlja osnovo, na kateri temeljijo sodobni sistemi vodenja podjetij. V nadaljevanju prikažemo zgodovinski razvoj industrijskih procesov od obrtništva preko masovne proizvodnje do ponovne potrebe po fleksibilni in inovativni proizvodnji raznovrstnih izdelkov po meri kupcev. Sledi kratek pregled organizacijskih struktur v podjetij. Sodobni načini vodenja podjetij zahtevajo drugačne organizacijske strukture z manj izrazito hierarhijo vodenja in večjo sklopljenostjo med posameznimi poslovnimi funkcijami podjetja. V tem

poglavju povzamemo trinivojsko hierarhično strukturo vodenja v proizvodnih podjetjih in opišemo funkcije procesnega, proizvodnega in poslovnega nivoja vodenja.

V *tretjem poglavju* obravnavamo vlogo informacijskih tehnologij v podjetjih. Najprej definiramo informacijske tokove v podjetju, ki predstavljajo osnovo pri izgradnji informacijsko-komunikacijskih sistemov, s pomočjo katerih potekajo izmenjave podatkov med posameznimi funkcijami v podjetju. Sledi opis različnih sistemov za vodenje in nadzor proizvodnih procesov vključno z opisom problematike vodenja celotne proizvodnje in uporabo predstavljenih konceptov na proizvodnem nivoju vodenja.

V *četrtem poglavju* predstavimo metodologijo kazalnikov KPI. Definiciji kazalnikov sledi pregled tipičnih kazalnikov na procesnem, proizvodnem in poslovnem nivoju vodenja. Posebej je izpostavljena problematika posredovanja podatkov v obliki kazalnikov vsem zainteresiranim uporabnikom v podjetju in ukrepanja na podlagi prejetih informacij. Poglavje zaključujemo z opisom postopka implementacije kazalnikov.

V *petem poglavju* predstavimo koncept zaprtozančnega vodenja celotne proizvodnje s poudarkom na samooptimizirajočem vodenju procesov, vključno s kriteriji za izbiro reguliranih spremenljivk. Opisan princip uporabimo v splošni zaprtozančni regulacijski shemi za vodenje proizvodnje, v kateri smo za regulirane spremenljivke uporabili pPI-je. Preizkušanje opisanega koncepta na realnem sistemu ni bilo možno, zato smo se odločili za izdelavo proceduralnega modela tehnološkega procesa in v *šestem poglavju* tako predstavljamo osnovne koncepte modeliranja proizvodnih procesov.

V *sedmem poglavju* opišemo izgradnjo proceduralnega modela za tehnološki proces polimerizacije. Posebej predstavimo namen, funkcije in poenostavitve modela, izbiro simulacijskega orodja, strukturo modela in natančne opise posameznih sklopov modela. Poglavje zaključimo z izsledki, ki smo jih dobili v procesu validacije modela.

V *osmem poglavju* uvedemo pPI-je za proizvodni proces polimerizacije. Pokažemo obnašanje kazalnikov pri spreminjanju velikosti časovnega okna, ki določa količino zgodovinskih podatkov, ki se upoštevajo pri izračunavanju kazalnikov. Poglavje zaključimo s študijo občutljivosti pPI-jev na spremembe manipulativnih spremenljivk procesa polimerizacije. S tem postopkom smo določili relacije med kazalniki *Proizvodni stroški*, *Produktivnost* in *Kakovosti izdelkov*, ki smo jih v nadaljevanju uporabili za poenostavitev zaprtozančne regulacijske sheme. S postopkom identifikacije smo nadalje formalno opisali odvisnost proizvodnih pPI-jev od vhodnih spremenljivk v obliki dinamičnih modelov 1. reda, ki smo jih nato uporabili za konstrukcijo prediktivnega regulatorja na osnovi matematičnega modela za proces polimerizacije.

V *devetem poglavju* predstavimo implementacijo zaprtozančnega vodenja proizvodnje na modelu proizvodnje. Implementirali smo dva regulatorja, in sicer regulator na osnovi vpoglednih tabel (angl. *look-up table*), ki je služil zgolj za preučitev izvedljivosti predstavljene ideje zaprtozančnega vodenja proizvodnje, ter prediktivni regulator na osnovi modela proizvodnje (angl. *Model Predictive Control MPC*). Predstavimo rezultate, ki smo jih dobili z vodenjem z regulatorjem MPC za različne vrste proizvodnje. Poleg tega smo regulator MPC konstruirali za dva tipa kazalnikov, ki so se med seboj razlikovali v trajanju časovnega okna.

Doktorsko disertacijo sklenemo z *zaključkom*, v katerem so podani bistveni originalni prispevki znanosti, do katerih smo prišli v opisanih raziskavah.

2. Organizacijske strukture v podjetjih

Podjetje je v svoji osnovi kompleksen sistem, ki sestoji iz tehnološke, ekonomske in socialne komponente. Dobro poznavanje, razvoj in vodenje kompleksnih sistemov je mogoče le ob pomoči ustrezne infrastrukture, ki obsega organizacijsko strukturo, urejen informacijsko-komunikacijsko sistem ter sistem vodenja (regulacijski vidik), ki jasno definira cilje in postopke za njihovo ocenjevanje in implementacijo. Tehnološki vidik podjetja obsega naprave in z njimi povezane sisteme, s katerimi preoblikuje surovine, energijo in informacije v končne produkte. Organizacijska struktura je tesno povezana z ekonomiko poslovanja, ki temelji na ekonomskem vrednotenju opravil, aktivnosti in funkcij. Regulacijski vidik usmerja tok opravil, aktivnosti in funkcij k doseganju zastavljenih ciljev. Vsi trije vidiki so dodatno povezani s socialno komponento, saj so v vseh opisanih vidikih poslovanja vključeni ljudje, katerih zadovoljstvo omogoča nadaljnji razvoj in obstoj podjetja.

Proizvodni proces predstavlja eno ključnih funkcij v proizvodnih podjetjih. Za uspešno vodenje proizvodnje je tako dobro poznati vlogo proizvodnje v organizacijski strukturi podjetja, iz katere so razvidne relacije do drugih poslovnih funkcij podjetja. Za uspešno komunikacijo znotraj in med posameznimi poslovnimi funkcijami v podjetju je nadalje potrebna ustrezna informacijsko-komunikacijska struktura, katere pomen in vlogo podrobneje obravnavamo v poglavju 3. V naslednjih poglavjih vključimo še regulacijski vidik v obliki metodologije definiranja in ocenjevanja ciljev vodenja proizvodnega procesa, modeliranja samega procesa in končno uporabe sistemov za vodenje in optimizacijo proizvodnega procesa.

2.1 Temeljni mejniki v zgodovini razvoja proizvodnih podjetij

Za lažje razumevanje zahtev današnjega poslovnega sveta in omejitev obstoječih podjetij, posledično pa tudi zahtev in omejitev proizvodnih procesov, je dobro poznati in razumeti temeljne mejnike v zgodovini tehnološkega razvoja. Nekaj od teh mejnikov je zbranih v tabeli 2-1.

Tabela 2-1: Nekaj glavnih mejnikov tehnološkega razvoja

Čas	Vrsta dogodka	Avtor
1776	Rojstvo ideje o delitvi dela na manjša opravila – Smithov princip	Adam Smith
1784	Prva proizvodna linija	Oliver Evans
Začetek 20. st.	Izum tekočega traku v avtomobilski industriji	Henry Ford
Začetek 20. st.	Implementacija Smithovega principa v managementu	Alfred Sloan
1969	Koncept strateških kompromisov	Skinner
1984	Ovrže strateške kompromise	Wheelwright
1990	Uravnoteženi sistem kazalnikov	Kaplan in Norton

Do sredine 18. stoletja je imela proizvodnja obrobni pomen v družbi, saj je bila proizvodnja blaga le potreba in ne integralni del tedanje družbe. Proizvodnja je temeljila na obrtništvu, kjer je obrtnik izdeloval izdelek od začetne do končne faze, pri tem pa je bil izdelek praviloma narejen po meri naročnika – kupca. Leta 1776 je Adam Smith, filozof, ekonomist in radikalen mislec tistega časa, v knjigi *Bogastvo narodov* pojasnil princip delitve in specializacije dela na osnovna opravila, kar omogoča radikalno povečanje storilnosti dela. Takšna delitev dela je bila osnova industrijske revolucije, ki se je v tem času začela in v temeljih spremenila dotedanjo družbo.

Leta 1784 je Oliver Evans naredil prvo proizvodno linijo, to je avtomatiziran pretok žita skozi mlin; osnovna lastnost linije je zaporedje specializiranih strojev in urejen pretok materiala med njimi. S časovnim usklajevanjem pretoka materiala med stroji na liniji je vplival na produktivnost celotne proizvodnje in ne samo na produktivnost posameznega stroja. Prvi proizvodni procesi so se osredotočali na izdelke in ne na proizvodni proces in v tem smislu so bili zelo podobni trendu, v katerem so se znašli današnji proizvodni sistemi. V tej fazi še nista bili prisotni avtomatizacija in optimizacija proizvodnje, zato je bil proizvodni proces še zmeraj fleksibilen, veliko pozornost je posvečal kakovosti izdelkov in prilagajal se je potrebam kupcev.

Naslednji korak v razvoju proizvodnih procesov predstavlja proces standardizacije, ki je povečal materialni tok skozi proizvodni proces in s tem se je izboljšal ekonomski učinek proizvodnje. Ta nov način proizvodnje se je imenoval masovna proizvodnja, ki se je za razliko od obrtnišva posvečala standardizaciji proizvodnih postopkov in sestavnih delov in ne standardizaciji izdelkov, kar ji je omogočilo prevlado nad obrtniško proizvodnjo (Frontini in Kennedy, 2003). Masovna proizvodnja se je do sredine 19. stoletja uspela uveljaviti v večini sveta.

Začetek 20. stoletja sta Henry Ford (iznajditelj tekočega traku) in Alfred Sloan (uvedel Smithov princip dela v managementu) skozi razvoj avtomobilske industrije izboljšala in

razširila sistem masovne proizvodnje. Dosegla sta veliko produktivnost in s tem nizko ceno izdelkov, tako da so le-ti postali dostopni širši množici uporabnikov. V času druge svetovne vojne in po njej je bila ponudba blaga manjša od povpraševanja, zato so se potrošniki zadovoljili z vsem, kar so proizvajalci ponujali ne glede na kakovost in prodajne storitve (Holt, 1999). V tem času je bila glavna skrb podjetij zmogljivost, kar je bilo posledica nenehnega povečevanja povpraševanja.

Osredotočenost na zniževanje stroškov kot osnovni kriterij uspešnosti poslovanja podjetij se je pričel spreminjati s Skinnerjevim člankom *Manufacturing – missing link in corporate strategy* (Skinner, 1969). Skinner predlaga proizvodno strategijo, ki temelji na trditvi, da razen stroškov obstaja še mnogo drugih načinov tekmovanja in da bi se moralo vsako proizvodno podjetje osredotočiti na to, da bi čim bolje izvajalo tiste naloge, ki si jih je zastavilo kot poslanstvo oziroma cilj. Ugotavlja, da se različni dejavniki uspešnosti podjetja med seboj izključujejo in vpelje tako imenovani koncept strateških kompromisov: visoki nivo izvedbe enega dejavnika lahko dosežemo samo za ceno slabše izvedenega enega ali več drugih dejavnikov. V tem času so strokovnjaki razmišljali zgolj o dveh konkurenčnih kriterijih – to so stroški in kakovost. V osemdesetih so dodali še fleksibilnost in zanesljivost dobav. Wheelwright je definiral stroškovno učinkovitost, kakovost, fleksibilnost in zanesljivost dobav kot štiri temeljne konkurenčne kriterije. Schonberger je preučil Skinnerjev model kompromisov in ugotovil, da v nekaterih podjetjih izboljšujejo vse faktorje uspešnosti hkrati in s tem je zavračal dotedanjo teorijo kompromisov. Raziskave japonskega gospodarskega čudeža v osemdesetih letih prejšnjega stoletja so pokazale, da obstaja proizvodni način, ki izloča nesoglasja med posameznimi konkurenčnimi kriteriji in s tem je bilo ovrženo dotedanje prepričanje zahodnega sveta, da ni mogoče proizvajati poceni in hkrati kakovostnih izdelkov. Japonski proizvodni koncepti, ki so temeljili na programih izboljšanja kakovosti (*Total Quality Management TQM, SIX SIGMA*, itd.), so izboljšali proizvodno uspešnost v okviru vseh konkurenčnih kriterijev, saj odpravljajo konflikte med njimi. Medsebojna odvisnost teh kriterijev se kaže v naslednji obliki: s trajnim izboljšanjem kakovosti se izboljša zanesljivost, z nadaljnjim izboljšanjem kakovosti in zanesljivosti se izboljša fleksibilnost in nazadnje še stroškovna učinkovitost proizvodnje.

Hammer in Champy (1995) sta opozorila, da način razmišljanja, ki temelji na Smithovi ideji delitve in specializacije dela ter posledično njegova razdrobljenost, ki je še danes močno prisotna na vseh področjih poslovanja, v bodoče ne bo več dovolj za doseganje konkurenčne prednosti in uspešnosti podjetij. Najpomembnejša ideja njunega dela je, da je potrebno procese, ki smo jih dvesto let delili, ponovno združiti in prenoviti, zaradi česar bodo bistveno drugačni od tradicionalnih. Temeljno vprašanje, ki si ga morajo postavljati organizacije in zaposleni v njih, je, zakaj pravzaprav počnejo to, kar počnejo. Pri preučevanju poslovanja ameriških podjetij so prišli do spoznanja, da številne naloge, ki jih opravljajo zaposleni, niso prav nič povezane z zadovoljevanjem potreb strank, (to

je proizvodnja visoko kakovostnega izdelka, dobavo tega izdelka kupcu po pošteni ceni in zagotavljanju prodajnih storitev na visoki ravni). Veliko nalog so v podjetjih opravljali zgolj zato, da bi zadovoljili notranje potrebe lastne organizacije. Raziskava, ki jo je izvedel Champy (Hammer in Champy, 1995), je potrdila, da je 70% projektov preurejanja poslovnih procesov neuspešnih, ker se programi preurejanja uporabljajo kot nadomestilo za strateško razmišljanje.

Da podjetje ve, kam je namenjeno in lahko preverja, kako daleč je na svoji poti prišlo, mora definirati osnovne poslovne gradnike, ki so:

- vizija,
- vrednot,
- poslanstvo,
- strateški cilji in
- strategija podjetja

ter ustrezna merila, s katerimi ocenjuje stopnjo doseganja zastavljenih ciljev (Stemberger, 2004). Poslanstvo utemljuje razloge za obstoj podjetja in govori o načinu doseganja ciljev. Je neodvisno tako od strateških ciljev kot od vizije in je tudi veliko trajnejše, saj se ne spreminja veliko s časom. Iz jasno definiranega poslanstva izhaja strategija podjetja, ki je sinonim za način, načela in zakonitosti, kako podjetje posluje. Na podlagi poslanstva se definira kvantitativne cilje poslovanja, kar je osnova za ocenjevanje stopnje doseganja pričakovanih rezultatov in posledično uspešnosti poslovanja. V podjetju imajo velik pomen tudi vrednote, saj govorijo o tem, kaj podjetje ceni oziroma vrednoti pri svojem delu, kot je način dela, način sporazumevanja, medsebojna razmerja in odnos do okolja. Vizija podjetja pa je videnje pozicije in vloge podjetja v prihodnosti, s čim se bo ukvarjalo, itd. Čeprav so opisani gradniki napisani za poslovni nivo vodenja, je njihova vloga pri vodenju proizvodnje kot eni od osnovnih funkcij podjetja še kako pomembna. Zaposlenim v proizvodnih procesih osnovni pojmi, kot so poslanstvo, strategija in vrednote velikokrat niso dovolj jasno predstavljeni in posledično je tudi njihovo udejanjanje manj učinkovito. V procesih reorganizacije strukture modernega podjetja igrajo opisani osnovni poslovni gradniki osrednjo vlogo.

Z razvojem tehnologije se je spremenila tudi vloga zaposlenih, saj je v avtomatiziranih proizvodnih procesih vloga posameznika drugačna, kot je bila v dobi industrijske revolucije. Frontini in Kennedy (2003) v svojem delu lepo predstavita, da imajo ljudje unikatne sposobnosti za:

- komunikacijo z drugimi ljudmi in za razumevanje njihovih potreb,
- konstrukcijo izdelkov in izgradnjo proizvodnih sistemov,
- konstrukcijo strojev s pripadajočo regulacijsko in operativno logiko,
- analiziranje in odpravljanje vzrokov za razhajanje med dejanskim in planiranim obnašanjem procesov,

medtem ko so stroji najboljši za:

- ponavljanje enakih opravil z veliko natančnostjo in konsistentnostjo,

- optimizacijo učinka v okviru definiranega območja parametrov,
- zbiranje in obdelava podatkov o poteku proizvodnje izdelka,
- zbiranje podatkov in obveščanje v primeru odstopanja od načrtovanega obnašanja itd.

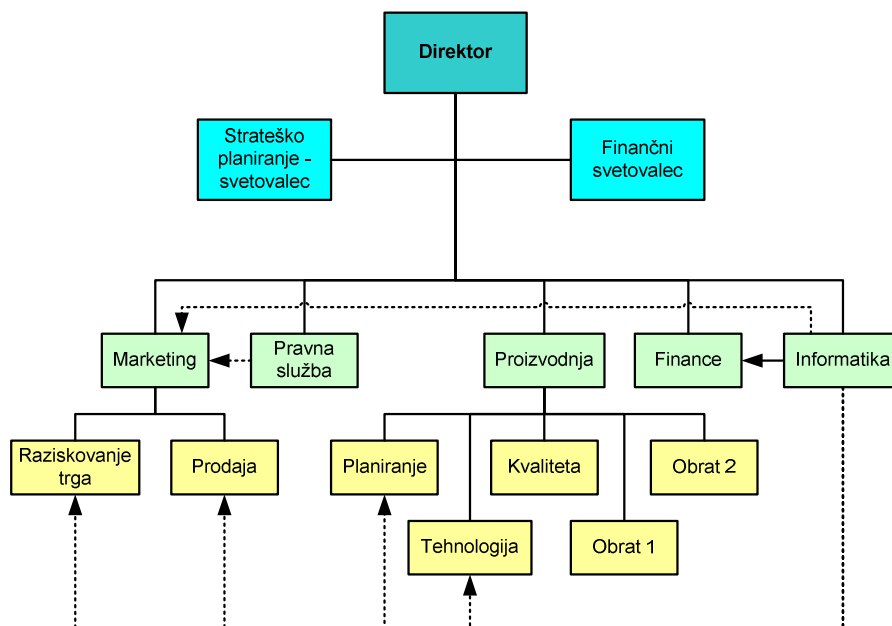
Medtem ko se evolucija avtomatizacije nadaljuje, je naloga ljudi, da iščejo nove načine reševanja problemov in razvijajo ustrezne metode za njihovo implementacijo, avtomatiziranemu procesu pa pustijo, da opravi svojo nalogo. Ta prehod seveda ni enostaven, saj zahteva nove veščine in razumevanje procesov, strojev, poslovnih sistemov, vključno s hitrim sprejemanjem odločitev v sami proizvodnji.

2.2 Organizacija in tipi proizvodnih podjetij

Z ustrežno organizacijsko strukturo podjetja in uporabo sodobne informacijsko-komunikacijske tehnologije je mogoče ažurno spremljati želeno (planirano) in dejansko (trenutno) stanje procesov in opreme v podjetju. To omogoča zaposlenim sprejemanje odločitev na podlagi dejanskega stanja v opazovanih procesih in če k temu dodamo še dobro poznavanje teh procesov in uporabo sistemov za podporo odločanju, se lahko približamo idealu uspešnega poslovanja – sprejemanju hitrih in dobrih odločitev. Proizvodni sistemi se med seboj razlikujejo tako po naravi dela kot po strukturi, tako da se za njihovo vodenje uporablja različne pristope. Za lažje razumevanje problematike si najprej pogledjmo nekaj organizacijskih struktur v podjetjih, potem pa še vrste proizvodnih procesov kot tisto funkcijo podjetja, ki nas v okviru tega dela najbolj zanima.

2.2.1 Organizacijske strukture v podjetjih

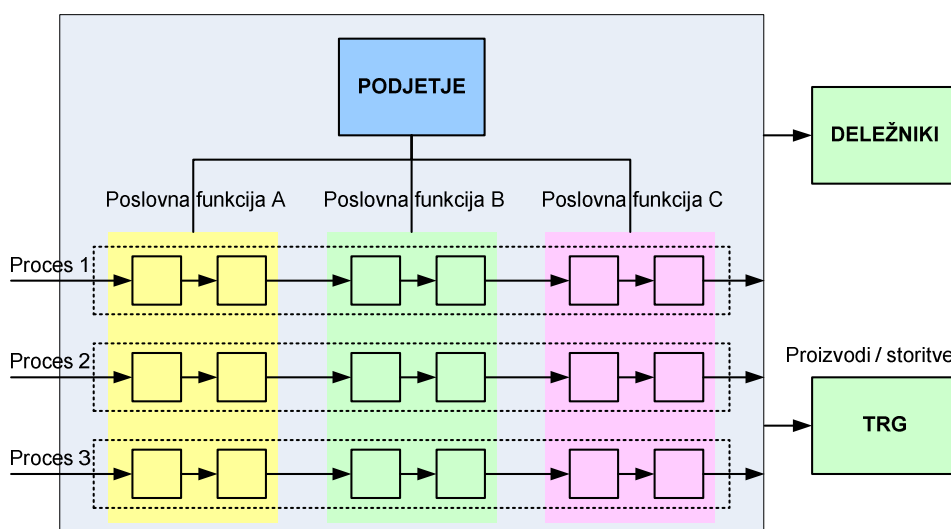
Z razvojem podjetij so se razvijale tudi organizacijske strukture, tako da so lahko zadovoljevale trenutne potrebe podjetij. Za masovno proizvodnjo je bila značilna linijska organizacijska struktura, ki opredeljuje potek avtoritete in ukazovanja linijsko od višjih organizacijskih ravni proti nižjim. Iz organizacijske sheme je jasno razvidno, kdo je komu nadrejen/podrejen in kdo je za kaj pristojen. Na tak način se doseže enotno ukazovanje, ki je načelo klasične organizacije. Poleg teh poznamo tudi funkcijsko organizacijsko strukturo, kjer so oddelki in službe podjetja porazdeljeni v skupine glede na osnovne poslovne funkcije podjetja (računovodstvo, nabava/prodaja, proizvodnja, razvoj, itd.). Temeljna slabost linijskih, štabno-linijskih kot tudi funkcijskih organizacijskih struktur, ki v osnovi izvirajo iz vojaških organizacijskih struktur, je nezadostno in nekakovostno komuniciranje kot tudi sodelovanje med posameznimi poslovnimi funkcijami; isto velja tudi za komunikacijo znotraj posamezne poslovne funkcije v primerih izrazite hierarhične organizacije (Mihelčič, 2000). Informacije se v takšni strukturi pretakajo samo navpično preko nadrejenih, obveščanje in sodelovanje zaposlenih na nižjih nivojih pa je ustrezno omejeno. Novi načini poslovanja kot tudi



Slika 2-1: Štabno-linijska organizacijska struktura

nove komunikacijske tehnologije (internet/intranet, elektronska pošta, telefon) zahtevajo in omogočajo drugačen način dela in boljši pretok informacij ter posledično obveščenost in sodelovanje zaposlenih tako v isti kot v različnih poslovnih funkcijah, kar je pripeljalo do novih organizacijskih struktur, kot so:

- procesna,
- matrična,
- projektna,
- ad hoc,
- prodajna organizacijska struktura (za sisteme prodaje ključnim kupcem) itd.



Slika 2-2: Procesna organizacijska struktura

Kot primer si pogledjmo procesno organizacijsko strukturo, kot jo prikazuje slika 2-2. Procesna organizacijska struktura presega omejitve klasičnih organizacijskih struktur; osnovni element te strukture je proces, ki poteka preko različnih poslovnih funkcij v podjetju. Lastniki procesov so naročniki oziroma prožilci procesov, ki razumejo in vedo, kaj je potrebno do kdaj (in v kakšni količini) narediti. Upravitelji posameznih poslovnih funkcij pa so »izvajalci« oziroma prožilci dejavnosti znotraj »svojih« poslovnih funkcij; oni razumejo in vedo, kdo, na kakšen način, s kakšno kakovostjo in do kdaj bo izvedel posamezno nalogo, ki je sestavni del vhodnega procesa.

Organizacijska struktura ima velik vpliv na potek dela v podjetju na vseh nivojih, vključno s proizvodnim procesom. Različne organizacijske strukture uporabljajo različne sisteme za informacijsko podporo vodenju procesov, kar bomo podrobneje obravnavali v nadaljevanju. Ustrezna organizacijska struktura podjetja je v veliki meri odvisna tudi od vrste proizvodnje.

2.2.2 Vrste proizvodnih procesov

Proizvodni procesi se med seboj razlikujejo tako po načinu dela kot po kompleksnosti in zahtevnosti proizvodnih postopkov. Da bi lažje razumeli razlike med različnimi vrstami proizvodenj, jih razvrščamo v naslednje skupine:

1. **podjetja s kosovno proizvodnjo**
2. **podjetja s procesno proizvodnjo:**
 - **zvezna (kontinuirana) proizvodnja**
 - **semišaržna proizvodnja**
 - **šaržna proizvodnja**

Diskretna in procesna industrija sta termina, ki se pogosto uporabljata za opis narave proizvodnih operacij. V **diskretni ali kosovni industriji** (npr. avtomobilska industrija, bela tehnika, polprevodniki, lesna industrija, itd.) je proizvodnja organizirana kot zaporedje diskretnih dogodkov oziroma operacij s samo nekaj ali z nobeno povratno zanko. S stališča systemske teorije lahko sisteme za vodenje diskretne proizvodnje opišemo kot slabo sklopljene porazdeljene sisteme (angl. *open distributed loosely coupled system*), v katerih je način vodenja v prvi vrsti zaporedni; proizvodnja je sestavljena iz številnih diskretnih faz, v katerih se končni izdelek najpogosteje sestavlja na montažni liniji iz množice polizdelkov in vhodnih materialov. Značilna je mehanska obdelava obdelovancev z rezanjem, vrtanjem, upogibanjem, s sestavljanjem, itd. Pri obdelavi se sam material ne spreminja. Za uspešno proizvodnjo je potrebno zagotoviti neprekinjen tok materiala, potrebno energijo, ustrezno število delavcev za posluževanje strojev in brezhibno delovanje strojev in drugih naprav. Končni cilj je učinkovita uporaba proizvodnih virov z namenom doseči željeno dobičkonosnost.

Za **procesno industrijo** je značilna izdelava izdelka v zveznih procesih, kot je npr. kemična industrija, rafinerije, pridelava celuloze in papirja, farmacevtska industrija, pridelava cementa, mletje žita, itd. V tej proizvodnji imamo zvezno obdelavo materiala

Tabela 2-2: Primerjava procesne in kosovne industrije

	Procesna industrija	Kosovna industrija
Način proizvodnje	Na zalogo	Po naročilu
Dolgoročno planiranje	Povečanje, izboljšanje kapacitete	Načrtovanje izdelka
Kratkoročno planiranje	Zasedenost kapacitet	Zasedenost osebja
Planiranje lansiranja proizvodnje izdelka	Razpoložljivost kapacitet	Razpoložljivost materiala
Izplen proizvodnje, stopnja izmeta	Pogosto negotov	Določljiv
Stroški zastojev, okvar	Včasih zelo visoki	Pogosto nizki
Alternativni izdelki	Po recepturah	Po kosovnicah
Sledljivost proizvodnje	Pogosto potrebna, včasih zahtevana	Včasih nepotrebna
Tip podatkov/signalov	Analogni, digitalni	Digitalni
Število podatkov	Pogosto zmerno	Veliko
Arhitektura sistema	Porazdeljen čvrsto sklopljen sistem	Porazdeljen ohlapno sklopljen sistem
Centraliziranost (hierarhičnost) sistema	Visoka	Včasih nizka
Časovni okviri	msek-sek-min-ura-dan-teden	sek-min
Tip vodenja	Zaprtozančno	Sekvenčno
Zahtevnost vodenja	Visoka	Včasih nizka
Udeleženos operaterjev pri vodenju	Včasih visoka	Pogosto nizka

v obliki fizikalno-kemijske pretvorbe snovi, tako da vhodna surovina stalno vstopa v proces, se tam obdeluje, reagira, dodajajo se različni dodatki in na koncu procesa izstopa končni produkt, med samo proizvodnjo pa nastajajo tudi stranski produkti in odpadki. V procesni industriji so proizvodne linije specializirane, tako da ne obstajajo alternativne metode izdelave izdelka; vsaka odpoved opreme ali izpad dobave energije se odraža v visokih stroških. Vse to zahteva stabilne pogoje za proizvodnjo, izkušeno osebje in centraliziran sistem upravljanja na proizvodnem in procesnem nivoju vodenja. Proizvodnja je usmerjena veliko bolj dolgoročno, kot je to značilno za kosovno industrijo. Zagonske in zaustavitvene procedure (čiščenje, sterilizacija, itd.) na začetku ali koncu proizvodnje specifičnega produkta so časovno in materialno potratne, zato je zaporedje izdelave sorodnih izdelkov zelo pomembno (Taylor in drugi, 1981; Hauptman, 2004).

Šaržna industrija je kombinacija kosovne in procesne industrije, v kateri se zaporedne šarže izdelka (kosovni princip) izdelujejo po principih procesne industrije. Zaradi kombinacije dveh različnih tehnologij je tudi najbolj zahtevna.

Vsi zgoraj naštetih dejavniki so vzrok, da je procesna industrija *kompleksna* in *negotova* (Jovan in drugi, 1998; Jovan, 1999). Kompleksnost proizvodnega procesa v glavnem izhaja iz potrebnega povezovanja različnih podprocesov, pri čemer vsak od teh podprocesov vpliva na kakovost končnega izdelka. Vsak podproces zahteva vzdrževanje določenega števila procesnih parametrov (tlak, temperatura, pretok, viskoznost, itd.), kar vodi v veliko število senzorjev, aktuatorjev, krmilnikov, krmilnikov s programirljivo logiko (PLK) in drugih sistemov za vodenje procesov na procesnem nivoju, ki morajo delovati varno, usklajeno in zanesljivo. Nezanestljivost v procesni industriji je v glavnem izražena v kakovosti končnega produkta. Zaželeno je doseganje visoke in enakomerne kakovosti v vsakem proizvodnem obratu procesne industrije, vendar spremenljiva kakovost vhodnih surovin, neučinkoviti sistemi za vodenje procesov, odstopanja procesnih parametrov od najbolj ugodnih vrednosti, okvare na tehnološki opremlitvi, izpadi pri oskrbi z energijo in kombinacije takšnih in podobnih faktorjev povečujejo nezanesljivost kakovosti končnih izdelkov.

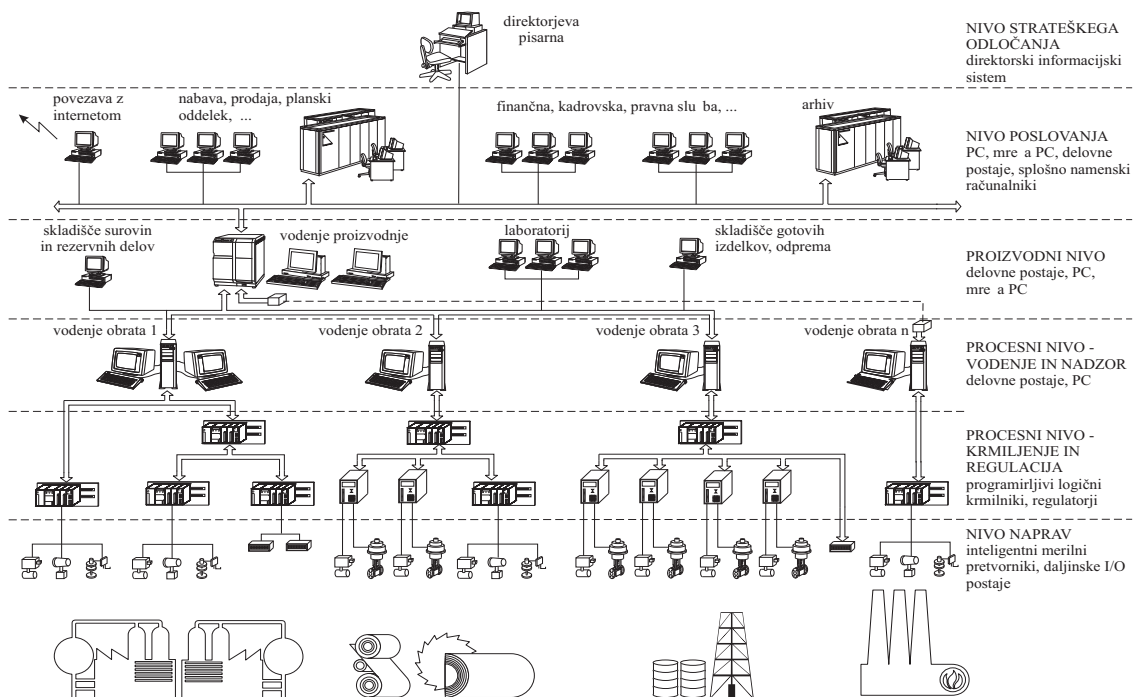
Tabela 2-2 podaja razlike med procesno in kosovno industrijo glede na upravljanje proizvodnje in proizvodni informacijski sistem (Jovan, 2002). V pričujočem delu se bomo ukvarjali z vodenjem procesne industrije, razvito metodologijo pa bomo uporabili na primeru šaržne industrije.

2.3 Organizacijska struktura vodenja v proizvodnem podjetju

Kot smo že omenili, so podjetja v preteklosti izdelovala velike količine nekaj izdelkov povečini na zalogo, danes pa so potrebe trga izražene v obliki povpraševanja po velikem številu različnih izdelkov po meri kupca. To od podjetja zahteva večjo fleksibilnost pri izdelavi izdelkov, kar se odraža v krajših razvojnih in izdelovalnih ciklih izdelka, visoki kakovosti in veliki odzivnosti podjetja na spremembe na trgu ter posledično veliki sklopljenosti poslovnih in proizvodnih procesov, to pa se odraža v organizacijski strukturi podjetja, ki jo prikazuje slika 2-3.

Obsežne in kompleksne proizvodne procese je možno voditi na pregleden in učinkovit način z ustrezno hierarhijo vodenja, ki vključuje poleg procesnega in poslovnega nivoja vodenja še proizvodni nivo vodenja (Taylor, 1981; Hales, 1989; Jovan, 1999; Jovan, 2001). Nivo naprav v proizvodnih procesih obsega različne stroje, aktuatorje in merilne naprave (slika 2-3 spodaj). Vodenje naprav in proizvodnih procesov (za katere je odgovoren procesni nivo vodenja) ter zajemanje proizvodnih podatkov je izvedeno z ustreznimi regulatorji, PLK-ji, sistemi SCADA ali drugimi ožičenimi logikami. Za

vodenje celotne proizvodnje je odgovoren proizvodni nivo vodenja, ki sprejema srednjeročne in kratkoročne plane, ki prihajajo iz poslovnega nivoja vodenja, in jih preslikuje v dnevne, nekajdnevne ali tedenske razporede dela in jih nadalje posreduje sistemom vodenja na procesnem nivoju v realizacijo. Za preslikavo planov v dnevne razporede dela se uporablja tako imenovano razvrščanje delovnih operacij po posameznih strojih, obratih. Za uspešno razvrščanje dela je potrebno v realnem času spremljati stanje proizvodnega procesa, upoštevati realizacijo že lansiranih delovnih nalogov, nujna naročila, itd. Tako je naslednja pomembna naloga proizvodnega nivoja vodenja zbiranje, analiza, obdelava in shranjevanje podatkov o poteku proizvodnje ter posredovanje le-teh uporabnikom na proizvodnem in poslovnem nivoju vodenja. Na tem nivoju je lahko implementirana tudi funkcija optimizacije proizvodnje. Poleg funkcije razvrščanja, posredovanja podatkov in optimizacije pa proizvodni nivo pokriva še funkcije, kot so alokacija in status virov (naprav, ljudi, materiala), vodenje dokumentacije, zajemanje in zbiranje podatkov, upravljanje delavcev, zagotavljanje kakovosti, upravljanje procesov, vzdrževanje, zagotavljanje sledljivosti surovin in proizvodov in analiza učinkovitosti. Opisane funkcije so funkcije sistemov MES (angl. *Manufacturing Execution Systems*). Poslovni nivo pa je zadolžen za vodenje poslovnih funkcij, kot so trženje, prodaja, planiranje, računovodstvo, itd. Službe na tem nivoju sprejemajo podatke iz okolja (potrebe in zadovoljstvo potrošnikov na trgu, stanje konkurence, trendi razvoja panoge, ponudba surovin, storitev, opreme in materialov, itd.) in iz proizvodnega nivoja vodenja, jih ovrednotijo in glede na te podatke in strategijo poslovanja podjetja postavijo dolgoročne, srednjeročne in kratkoročne cilje.



Slika 2-3: Hierarhična zgradba sistemov vodenja v proizvodnem podjetju procesne industrije

3. Vloga informacijskih tehnologij v podjetjih

Informacijsko-komunikacijski sistemi se ukvarjajo s podatki in informacijami, pri čemer je razločevanje, kaj je podatek in kaj informacija, velikokrat nejasno. Zato v uvodu v to poglavje najprej bolj podrobno definirajmo ta dva pojma.

Obdobje zadnjih nekaj desetletij imenujemo tudi informacijska doba, katere osnovna značilnost je zbiranje podatkov, njihova obdelava in posredovanje končnim uporabnikom. V informatiki obstaja jasno razločevanje med podatkom in informacijo. Podatek je predstavitev informacije na formaliziran način, ki je primeren za komunikacijo, interpretacijo ali obdelavo (s strani človeka ali stroja). Definicija pravi, da mora biti predstavitev izvedena na formaliziran način, kar pomeni, da mora obstajati nek predpis – konvencija, po katerem simbole ali vrednosti analognih veličin zapisujemo oziroma beremo. Informacija je znanje, ki se nanaša na objekte, kot so dejstva (dogodki, stvari, procesi ali ideje), vključno s koncepti, ki imajo v okviru nekega konteksta določen pomen. Informacija je definirana tudi v obliki bolj znane informacijske enačbe, ki pravi, da je informacija novo spoznanje, ki ga človek doda svojemu poznavanju sveta (Mohorič, 1999). Zaključki, ki jih lahko povlečemo iz opisanih definicij, so naslednji:

- podatki niso informacija,
- podatki ne vsebujejo informacije,
- podatki posredujejo informacijo prejemniku, katerega znanje je konsistentno z izbrano predstavitvijo podatkov in modelom sveta, na katerega se nanašajo,
- če je količina podatkov tako velika, da se jih v času, ki je na voljo za ukrepanje na njihovi osnovi, ne da interpretirati, se lahko zgodi, da s podatki ni posredovana nobena informacija.

Zanimiva je primerjava med človekom in računalnikom, ki oba sprejemata podatke iz okolja, v tem, kaj z njima naredita. Človek podatkom s pomočjo svojega že obstoječega znanja pripiše pomen, s tem svoje znanje dopolni in na njegovi osnovi ustrezno ukrepa. Nasprotno pa računalnik podatkom ne pripisuje pomena, pač pa jih s pomočjo v njem že shranjenih podatkov in programov le preoblikuje iz ene oblike v drugo. Tako lahko na kratko povzamemo, da so podatki vse, kar lahko zapišemo na tak ali drugačen pomnilniški medij, informacija in znanje pa sodita v sfero človekovega notranjega miselnega sveta (Mohorič, 1999).

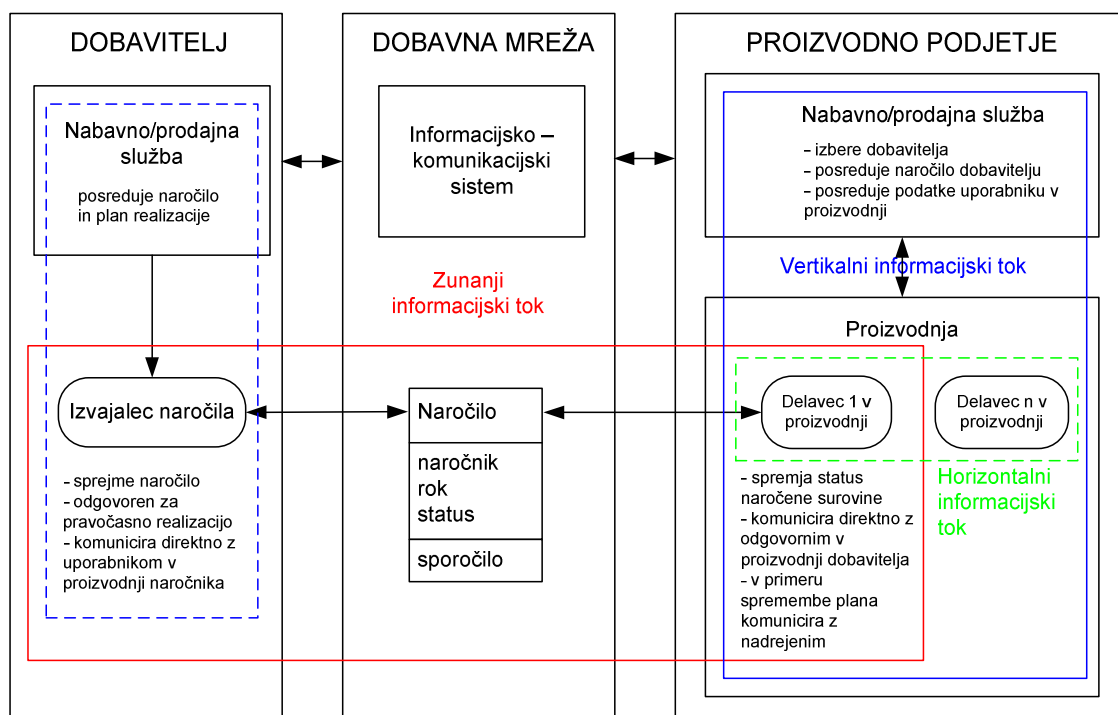
3.1 Informacijski tokovi v podjetju

V prejšnjem poglavju smo opisovali organizacijske strukture s pripadajočimi nivoji vodenja v podjetjih. Ugotovili smo, da je za uspešno delovanje podjetja potrebno zagotoviti zbiranje in pretok podatkov tako znotraj kot med posameznimi hierarhičnimi nivoji, za kar skrbijo informacijsko-komunikacijski sistemi.

S stališča proizvodnje je zbiranje podatkov aktivnost brez dodane vrednosti, saj proizvodnja obstaja zato, da proizvaja produkte in ne podatke. Da je takšna aktivnost smiselna, morajo biti podatki uporabljeni za to, da ustvarjajo vrednost preko izboljšav v procesu, boljšega vodenja proizvodnje in sprejemanja bolj kakovostnih odločitev. Potemtakem mora zbiranje podatkov zagotoviti vrednost podatkov, podatki se morajo deliti med uporabnike in koristno uporabljati (Cecelja, 2002). Uspešna implementacija najboljših upravljavskih načinov, kot so "najboljše upravljavske prakse" (angl. *Management Best Practices*), "ravno ob pravem času" (angl. *Just In Time JIT*), "celovito obvladovanje kakovosti" (angl. *Total Quality Management TQM*), "sočasni inženiring" (angl. *Concurrent Engineering*), imenovanih tudi "visoko učinkovita proizvodnja" (angl. *High-Performance Manufacturing HPM*), je v veliki meri odvisna od ustreznega informacijskega in komunikacijskega upravljanja v podjetju, ki omogoča izmenjavo podatkov, njihovo obdelavo in uporabo (Forza in Salvador, 2001). Poleg informiranosti je za hitro sprejemanje dobrih odločitev, kar razlikuje uspešna podjetja od povprečnih, potrebno tudi ustrezno znanje o objektu odločanja (npr. vodja proizvodnje dobro pozna kapacitete, omejitve in druge lastnosti proizvodnega procesa) in odločitve se morajo izvršiti čim bližje točki izvršitve, kjer se nahaja ustrezna sposobnost (Frontini in Kennedy, 2003). Izmenjava podatkov in posledično prenos informacij v podjetju poteka preko tako imenovanih informacijskih tokov, katerih del lahko avtomatiziramo, kar vodi v tako imenovane stabilne okvire komunikacije. Te komunikacijske okvire lahko združimo v **komunikacijsko mrežo** in izmenjavo informacij v njej imenujemo **informacijski tokovi** (Cecelja, 2002). Procesne komunikacijske mreže kot celota tvorijo **poslovni komunikacijski sistem**, ki na eni strani povezuje posamezne dele podjetja v celoto in po drugi strani vpne podjetje v okolje, s katerim je tesno povezano.

Poznamo različne informacijske tokove, kot jih na primeru povezovanja dobavitelja s proizvodjalnim podjetjem preko dobavne mreže shematično prikazuje slika 3-1:

- **vertikalni informacijski tokovi:** so komunikacije med posameznimi vodstvenimi verigami (angl. *command chain*) na različnih hierarhičnih nivojih podjetja,
- **horizontalni informacijski tokovi:** so komunikacije, ki ne prečkajo posamezne vodstvene verige znotraj podjetja (v glavnem prečkajo hierarhične linije),
- **zunanjí informacijski tokovi:** so komunikacije, ki povezujejo podjetje z drugimi akterji v okolju (v glavnem dobavitelji in strankami).



Slika 3-1: Shematski prikaz informacijskih tokov na primeru povezovanja dobavitelja s proizvodnim podjetjem preko dobavne mreže

Za hitro, zanesljivo in učinkovito poslovanje je potrebno zagotoviti čim bolj avtomatizirano zbiranje podatkov, ki je definirano kot neodvisna entiteta, ki zajema, shranjuje, procesira in posreduje podatke gostujočemu računalniku. Avtomatizirani sistemi za zajem podatkov vsebujejo:

- portale za vnašanje podatkov (avtomatsko, ročno),
- spominske kapacitete za shranjevanje podatkov,
- neodvisno sposobnost procesiranja podatkov,
- komunikacijo z gostujočimi računalniki.

3.2 Zakaj so informacijsko-komunikacijski sistemi pomembni

Za povečano učinkovitost podjetja je med drugim zelo pomembna ustrezna porazdelitev odgovornosti in pristojnosti na različnih nivojih v podjetju in horizontalna komunikacija med različnimi akterji v proizvodnem procesu. To pomeni, da vsak od zaposlenih ve, kaj so njegove naloge in pristojnosti in da za reševanje problemov, ki so v njegovi pristojnosti, poskrbi sam; to pomeni, da se sam dogovarja z dobaviteljem o neustreznosti materiala ali roku dobave z ljudmi, ki so na enakem hierarhičnem nivoju in ne preko nadrejenega, kot je to značilno za klasično linijsko organizacijsko strukturo. Za realizacijo zadanih nalog odgovarja sam in za to ni direktno odgovorna nadrejena oseba. S takšnim pristopom se v sistem vpelje tako imenovano lastništvo nad operacijami, kar povečuje učinkovitost kot tudi motivacijo pristojnih pri realizaciji zadanih nalog.

Z opisanim pristopom se nadrejeni razbremenijo bremena reševanja množice nižjenivojskih opravil in se lahko posvetijo dejanskim izzivom vodenja na pristojnem nivoju. Takšna sistemska ureditev potrebuje ustrezno organizacijsko strukturo, informacijsko-komunikacijsko infrastrukturo za nemoten pretok podatkov, urejene vzorce izvajanja delovnih nalog, reševanja problemov in komuniciranja med zaposlenimi ter nenazadnje ustrezen sistem za vrednotenje doseženih rezultatov in nagrajevanje.

Osnovna naloga informacijsko-komunikacijskih sistemov je tako postavitve infrastrukture, ki omogoča ali v napredni fazi avtomatizira informacijske tokove v podjetju. Informacijski sistemi v podjetju omogočajo prenos številnih podatkov tako v horizontalnih kot v vertikalnih linijah. Pri prenosu podatkov v vertikalnih linijah je potrebna ustrezna redukcija podatkov v skladu s prej predstavljeno metodologijo: vodje proizvodnje ne zanima vsak posamezen dogodek v proizvodnji, pač pa ga zanima realizacija plana, povprečna kakovost izdelkov, izkoriščenost proizvodnih virov in delovna učinkovitost, pa morda predlogi zaboljšave. Poleg statističnih podatkov, katerih časovna konstanta je praviloma večja, pa obstajajo tudi podatki, ki se navezujejo na trenutne dogodke z velikim vplivom na potek proizvodnje, kot so pomembni izpadi ključnih naprav, odpoved naročene surovine, itd. Obstajajo tudi druga področja, kjer je potrebno zbiranje in analiziranje proizvodnih podatkov, kot je npr. zagotavljanje kakovosti proizvodnih procesov in izdelkov, uvajanje izboljšav in inovacij v proizvodnjo in razvoj novih izdelkov.

Uporaba standardizirane programske opreme brez ustrezne prilagoditve razmeram v posameznem podjetju, upoštevanja dejanskih potreb zaposlenih in integracije z obstoječo opremo in delovnimi procesi je obsojena na težave ali celo neuspeh. Zavedati se moramo dejstva, da uporaba informacijskih tehnologij temelji na standardizaciji postopkov, zmanjševanju števila izrednih dogodkov in posledično vodi v organizacijske spremembe.

3.3 Sistemi za vodenje in nadzor proizvodnih procesov

Današnji trgi ponujajo sisteme za informacijsko podporo celotnemu naboru funkcij poslovnega nivoja na eni strani (MRP, MRPII, ERP, itd.) kot tudi sisteme za celovito podporo vodenju in nadzoru proizvodnih postrojenj (SCADA, PLK, itd.). Opisana nivoja sta si po naravi zelo različna, povezuje pa ju proizvodni nivo vodenja, za katerega pa ne obstaja sistem, ki bi v celoti pokrival vse potrebne funkcije tega nivoja.

V preteklosti sta bila razvita dva sistema, CIM (angl. *Computer Integrated Manufacturing*) in pozneje MES (angl. *Manufacturing Execution Systems*), katerih glavna naloga je bila zapolnitev komunikacijske vrzeli med sistemi ERP in SCADA in

informacijska podpora funkcijam proizvodnega nivoja (Jovan, 2001). Metodologija CIM je bila v splošnem definirana kot formalna povezava vseh proizvodnih operacij vse od postavitve koncepta produkta in začetnih analiz trga preko projektiranja in proizvodnje izdelka do tehnik za digitalno obdelavo podatkov, torej kot gladko in popolno zlitje vseh funkcij proizvodnje (Hales, 1989). S takšno informacijsko povezavo naj bi CIM zagotavljal ustrezno razpoložljivost in kakovost podatkov za vsako operacijo v času, ko so potrebni. Praksa je nato pokazala, da samo povezovanje različnih informacijskih sistemov in podsistemov med seboj brez ustreznega mehanizma, ki definira katere podatke, kdaj, v kakšni obliki in na kakšen način izmenjevati, ne prinaša želenih rezultatov.

Odgovor na ta problem je bil razvoj sistemov MES. Splošna definicija MES se glasi: "MES je sočasni integriran računalniški sistem, ki je akumulacija metod in orodij, ki se uporabljajo za izvrševanje produkcije" (McClellan, 1997). CIM in MES sta zelo podobna koncepta, vendar med njima obstajajo razlike. CIM je padel v nemilost predvsem zaradi razočaranja nad težavami, ki so se pojavljale pri uporabi koncepta v praksi. Sledil je nadaljnji razvoj, pri čemer je MES zavzel širši ali v določenih pogledih celo drugačen pomen in pri tem zagotavlja infrastrukturo, ki je CIM nikoli ni imel. Namesto na namenskih programskih orodjih MES temelji na standardnih, ponovno uporabljivih aplikativnih programskih orodjih. Rezultat vključuje nižje cene in krajši čas implementacije in večjo povprečno uspešnost projektov.

Druga večja razlika MES proti CIM je bilo splošno soglasje o odobritvi treh nivojev vodenja v podjetju. S časom so se funkcije posameznih nivojev, kot jih definira MES, izkristalizirale in s tem tudi postale bolj definirane in sprejete, tako da je funkcionalnost v posameznem nivoju postala bolj standardizirana. Vse to vodi v boljše poznavanje in razumevanje povezav med nivoji. Sistemi MES niso mišljeni kot sistemi, ki se jih zgradi in takšni ostanejo v celotnem času uporabe, pač pa je zanje značilna evolucijska pot. Sistem se implementira z nekaj začetnimi funkcijami, ki se jih v nadaljevanju dopolnjuje z raznimi izboljšavami in dodatki. Tako lahko gledamo na sistem MES kot na gonilo stalnega napredka v podjetju.

Standardne funkcije sistemov MES, kot jih definira MESA International¹, so:

- Stanje in razporejanje virov (angl. *Resource Allocation and Status*)
- Fino planiranje operacij (angl. *Operations/Detail Scheduling*)
- Razpošiljanje produktov (angl. *Dispatching Product Units*)
- Upravljanje dokumentov (angl. *Document Control*)
- Zbiranje in zajem podatkov (angl. *Data Collection/Acquisition*)
- Upravljanje osebja (angl. *Labor Management*)
- Upravljanje kakovosti (angl. *Quality Management*)

¹ MESA - Manufacturing Enterprise Solutions Association

- Upravljanje procesa in procesnih podatkov (angl. *Process and process data Management*)
- Upravljanje vzdrževanja (angl. *Maintenance Management*)
- Sledenje produktom in rodoslovje (angl. *Product Tracking and Genealogy*)
- Analiza učinkovitosti (angl. *Performance Analysis*)

3.4 Sistemi za podporo odločanju DSS

V začetku sedemdesetih let je Scott Morton definiral osnovni **sistem za podporo odločanju** (angl. *Decision Support System DSS*) kot "interaktiven sistem na osnovi računalnika, ki pomaga odločitvenim delavcem uporabiti podatke in modele za reševanje nestrukturiranih problemov". Druga definicija DSS po Keenu in Nortonu pa se glasi: "Sistemi DSS združujejo intelektualne vire posameznikov z računalniškimi zmožnostmi z namenom izboljšati kakovost sprejetih odločitev".

Procesi sprejemanja odločitev so lahko zelo strukturirani kot tudi popolnoma nestrukturirani. **Strukturirani procesi** so rutinski in tipično ponavljajoči se problemi, za katere obstajajo standardne metode reševanja, ki temeljijo na modeliranju problema. **Nestrukturirani procesi** so nerazločni, kompleksni problemi, za katere ne obstajajo jasne in izdelane metode za iskanje rešitev. Ker za strukturirane probleme obstajajo procedure za doseganje najboljših ali vsaj dovolj dobrih rešitev, za to obstajajo tudi ustrezna programska orodja, ki temeljijo na takšnih procedurah. Primeri takšnih problemov so analiza optimalnih zalog materialov v skladiščih, razvrstitev delovnih operacij v proizvodnji, itd. V nestrukturiranih procesih je osnova za odločanje razpolaganje, možnost obdelave, analiziranje in predstavitev podatkov, ki nato ob pomoči obstoječega znanja o objektu odločanja in izkušnjah omogoča reševanje takšnih problemov. Primeri takšnih procesov so planiranje novih del/ponudb/izdelkov, najemanje ekspertov za reševanje problemov, procesi iskanja izboljšav v proizvodnih procesih, iskanje in odpravljanje težav v prototipni proizvodnji, itd. **Delno strukturirani problemi** so umeščeni med strukturirane in nestrukturirane probleme. Reševanje takšnih problemov tako temelji na uporabi sistemov za upravljanje znanja (angl. *Knowledge Management Systems KMS*) kot tudi človeški presoji.

Kot za CIM in MES tudi za DSS ni univerzalno sprejete definicije. Lahko ga obravnavamo kot termin, ki pokriva različne računalniške sisteme v podjetju, s katerimi si vodstveni delavci pomagajo pri sprejemanju odločitev. Tako imamo lahko v podjetju posebej direktorski informacijski sistem, ločena orodja DSS za marketing, računovodstvo, različne ekspertne sisteme za diagnostiko napak na izdelkih, itd. Pomembna značilnost sistemov DSS je uporaba grafičnih uporabniških vmesnikov, ki omogočajo končnim uporabnikom enostavno in učinkovito rabo sistemov, to je hitro pridobivanje informacij iz množice pregledovanih podatkov.

3.4.1 Ekspertni sistemi

Ekspertni sistemi (angl. *Expert Systems ES*) so programski paketi za sprejemanje odločitev ali za reševanje problemov, ki lahko dosegajo kakovost izvajanja aktivnosti, kot jih dosega ekspert za specializirano in ponavadi ožje problemsko področje. Bistvo teh sistemov, v katerih je implementirana tehnologija umetne inteligence, je v tem, da poskušajo prenesti strokovno znanje z eksperta na računalnik, tako da v nadaljevanju uporabniki posredujejo svoja vprašanja računalniku in ne ekspertu.

Potencialni uporabniki takšnih sistemov so ljudje, ki se morajo velikokrat odločati na podlagi nepopolnih, netočnih podatkov in na podlagi izkušenj, ki so si jih pridobili v preteklosti. Za reševanje takšnih problemov ne moremo uporabiti sistemov, ki temeljijo na modelih, pač pa se poslužujemo sistemov, ki delujejo na podlagi učenja na predhodnih dogodkih.

3.5 Uporaba opisanih pristopov in hierarhija odločitvenih nivojev v podjetju

Za kakovostno in učinkovito odločanje na proizvodnem nivoju vodenja potrebujejo vodje proizvodnje sisteme, s katerimi zbirajo, analizirajo in na ustrezen način predstavijo podatke o stanju proizvodnih procesov. Glede na to, da so problemi, ki se v proizvodnji pojavljajo, lahko strukturirani, delno strukturirani kot nestrukturirani, so tudi sistemi za podporo odločanju na tem nivoju kombinacija več različnih podsistemov. Za reševanje strukturiranih problemov torej lahko obstajajo ustrezna programska orodja, ki delujejo na osnovi procedur, za nestrukturirane probleme pa je potrebna ustrezna predstavitev in obdelava podatkov (tehnologija OLAP, Data Mining, ekspertni sistemi). V takšnih primerih je potrebno najprej meriti parametre tistih procesov, ki jih želimo izboljšati, v nadaljevanju analizirati dobljene podatke in končno uporabiti znanje tehnologov in operaterjev ter pretekle izkušnje pri reševanju takšne vrste nestrukturiranih problemov.

4. Metodologija ključnih kazalnikov učinkovitosti KPI

Procesi zbiranja in preoblikovanja podatkov so posebej intenzivni v proizvodnih podjetjih, kjer se s sistemi za nadzor in vodenje procesov in drugimi informacijsko-komunikacijskimi sistemi zajema velike količine podatkov. Ti podatki so nadalje na voljo končnim uporabnikom, ki jih preučujejo, interpretirajo in z njihovo pomočjo dopolnjujejo svoje znanje o procesih. Če je količina podatkov prevelika, so uporabniki z njimi preobremenjeni in iz njih ne pridobijo potrebne informacije, kar predstavlja resen problem sodobnih informacijskih sistemov. Odgovor na opisano problematiko je razvoj sistemov za podporo odločanju, ki sistemsko zbirajo in predstavljajo podatke v obliki, ki uporabniku omogoča hitro dojetje posredovanih informacij, ki so potrebne v procesih sprejemanja odločitev.

V sferah družbenega in poslovnega življenja se vedno bolj pojavljata tērmina učinkovitost in uspešnost ter različna merila, s katerimi ju je možno vrednotiti. Merila se pojavljajo pod različnimi imeni. Primer takšnih meril so "armaturna merila" (angl. *Dashboard Measures DM*), ki dajejo uporabniku hiter pregled nad učinkovitostjo podjetja ali organizacije (DeBusk in drugi 2003). To je stara, vendar nazorna in praktična predstavitev ključnih spremenljivk, ki opisujejo učinkovitost podjetja/organizacije s pomočjo kazalnikov, ki se zgleduje po analogni merilnikih, ki jih zasledimo na npr. armaturni plošči avtomobila (merilnik hitrosti, zaloge goriva, prevoženih kilometrov, temperature in obratov motorja) ali letala (višina leta, hitrost, zaloga goriva). Avtorji navajajo dva sistema armaturnih meril, in sicer francoski sistem *Tableau do Bord (TdB)*, ki sega nazaj na začetek 20. stoletja, in v zadnjem času uveljavljen **uravnoteženi sistem kazalnikov** (angl. *Balanced Scorecard BSC*), ki sta ga vpeljala Kaplan in Norton (1992). To so sistemi, ki se po večini uporabljajo za ocenjevanje stopnje doseganja zastavljenih finančnih kot tudi nefinančnih ciljev na najvišjem (poslovnem) nivoju vodenja podjetij oziroma organizacij (DeBusk in drugi, 2003). Neely in drugi (1995) v svojem pregledu literature uporabljajo terminologijo **merila učinkovitosti** (angl. *Performance Measurements PM*) in **sistem merjenja učinkovitosti** (angl. *Performance Measurements System PMS*) kot združeno množico PM. Osnovna PM, ki jih avtorji navajajo, so povezana s kakovostjo, časom, hitrostjo in z zanesljivostjo dobav, s stroški in fleksibilnostjo. V nadaljevanju naredijo pregled

sistemov PMS, kjer poleg prej navedenega uravnoveženega sistema kazalnikov opisujejo tudi sisteme "matrika meril učinkovitosti" (angl. *Performance Measurement Matrix*), "vprašalnik meril učinkovitosti" (angl. *Performance Measurement Questionnaire PMQ*) in "ob pravem času" (angl. *Just in Time JIT*).

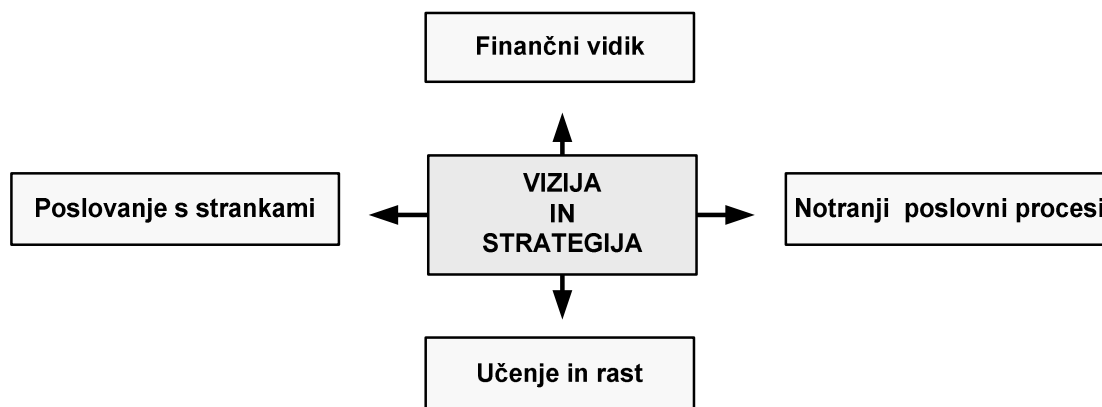
Tudi Folan in Browne (2005) obravnavata merjenje učinkovitosti na različnih nivojih. Na najnižjem nivoju imamo meritve posameznih aspektov učinkovitosti v obliki priporočil (*PM recommendations*), ki se nadalje združujejo v okvire (angl. *PM frameworks*). Po Folanu poznamo dva okvira priporočil, in sicer strukturnega in proceduralnega. Strukturni okvir definira tipologijo posameznih priporočil (razvrstitev po posameznih področjih), medtem ko proceduralni okvir definira postopke za definicijo priporočil iz strategije, njihovo implementacijo in uporabo skozi celoten življenjski cikel. Nobeden od opisanih PM okvirjev ni dokončen, saj proceduralnim PM okvirjem normalno primanjkuje strukturni element in obratno, strukturnim okvirjem primanjkuje proceduralni element. Rešitev predstavlja združitev opisanih okvirjev v sistem, kjer strukturni PM okvir skrbi za administracijo in izbiro elementov PM sistema, medtem ko proceduralni okvir natančno določa, kako se PM proces izvaja. Primera takšnih sistemov sta:

- uravnoveženi sistem kazalnikov BSC (Kaplan in Norton, 1992) in
- sistem preurejanja poslovnih procesov (angl. *Business Process Reengineering BPR*).

Koncept merjenja učinkovitosti lahko zasledimo v številnih oblikah, kot je bilo to do sedaj prikazano. Ne glede na to ostaja osnovna ideja enaka in je bila izčrpno predstavljena s strani Folan-a in Brown-a (2005). V nadaljevanju tega dela bomo za sisteme merjenja učinkovitosti procesov na nivoju celotnega podjetja uporabljali splošen termin ključni kazalniki učinkovitosti (angl. *Key Performance Indicators KPIs*), medtem ko bomo za kazalnike proizvodnega nivoja vodenja uporabljali termin **proizvodni kazalniki učinkovitosti** (angl. *production Performance Indicators pPIs*). Eden izmed najbolj uveljavljenih in v praksi največkrat uporabljenih sistemov KPI na poslovnem nivoju vodenja je uravnoveženi sistem kazalnikov BSC, ki je podrobneje predstavljen v nadaljevanju.

4.1 Uravnoveženi sistem kazalnikov BSC

V svetovnih kot tudi slovenskih podjetjih se je dobro uveljavil sistem BSC, ki je bil razvit kot celosten sistem za vodenje podjetij. Celostni sistem pomeni, da upošteva vse vidike, ki vplivajo na uspešnost in učinkovitost podjetja, uravnoveženi pa, da noben vidik ni prekomerno upoštevan, pač pa je obravnavan glede na težo, ki jo ima pri zagotavljanju uspešnosti vodenja podjetja. BSC vsebuje meritve finančnih vidikov, ki pokažejo rezultate že izpeljanih akcij, in dopolnjuje finančne meritve z operativnimi



Slika 4-1: Štirje vidiki uravnoveženega sistema kazalnikov BSC, kot sta jih definirala Kaplan in Norton (1992)

meritvami zadovoljstva kupcev, internih procesov, organizacijskih inovacij in izboljšav, ki so gonilo bodočih finančnih učinkov (Kaplan in Norton, 1992).

Sistem BSC ocenjuje uspešnost podjetja na štirih področjih delovanja, kot to prikazuje slika 4-1:

- *finančni vidiki*: katere cilje mora podjetje doseči, da bo uspešno pri ocenjevanju pričakovanj lastnikov,
- *notranji poslovni procesi*: v katerih poslovnih procesih se mora izkazati, da bo zadovoljil lastnike in stranke,
- *poslovanje s strankami*: kako naj nastopa do svojih strank, da bo uresničilo svojo vizijo in
- *učenje in rast*: kako naj okrepi svojo sposobnost za spremembe in izboljšave, da bo uresničilo svojo vizijo.

Osnova uravnoveženega sistema kazalnikov pa je jasno definirana vizija in strategija podjetja, iz katere nato izhajajo vse ostale aktivnosti, da se lahko ta vizija in strategija izpolnita.

Poleg tega Kaplan in Norton (2000) podajata dodatni proceduralni okvir, s pomočjo katerega so kazalniki lahko implementirani kot sistem, ki poteka v štirih fazah:

- *Prevajanje strategije*: povezano s prečiščevanjem in doseganjem konsenza glede strateške vizije podjetja na vseh operativnih nivojih v podjetju, od top managementa do lokalnega nivoja.
- *Komuniciranje in povezovanje*: to je proces, v katerem managerji predstavljajo strategijo na različnih nivojih v podjetju in jo povezujejo s cilji oddelkov in posameznikov.
- *Planiranje poslovanja*: to je proces, v katerem podjetja združijo poslovne in finančne plane.
- *Povratne vezi in učenje*: ta vidik daje podjetjem možnost strateškega učenja na vseh štirih področjih delovanja.

Četudi je sistem BSC v praksi zelo uveljavljen, pa ni popoln, saj v osnovi ne spremlja stanja konkurence in ne omogoča sistematične primerjave z njo.

4.2 Predstavitev kazalnikov in njihovih atributov

Po Fortuin-u (1988) kazalniki učinkovitosti "predstavljajo upravi orodje za primerjavo dejanskih rezultatov z vnaprej postavljenimi cilji in hkrati možnost merjenja stopnje odmika od zastavljenih ciljev". Kazalnik učinkovitosti lahko definiramo tudi kot "spremenljivko, ki kvantitativno izraža učinkovitost ali uspešnost ali oboje dela ali celotnega procesa ali sistema proti dani normi ali cilju" (Lohman in drugi, 2004). Kazalniki podajajo ključne informacije o fizičnih, socialnih ali ekonomskih sistemih in omogočajo analize trendov, iskanje povezav med vzroki in posledicami in kot taki predstavljajo korak naprej v primerjavi s surovimi podatki. Da kazalnik kot tak lahko razlikujemo od navadne spremenljivke, mora imeti definirane dimenzije (Veleva in Ellenbecker, 2001).

4.2.1 Dimenzije (atributi) kazalnikov

Lohman (2004) definira naslednje dimenzije kazalnikov:

- **Ime kazalnika**
- **Cilj:** Opisana pomen in cilj uporabe kazalnika, tako da uporabnik ve, kaj določen kazalnik predstavlja.
- **Merska enota:** to je metrika, ki se uporablja za izračun kazalnika.
- **Obseg:** definira območje, v katerem se vrednosti kazalnika lahko nahajajo.
- **Nivo:** tukaj definiramo, kateremu nivoju v hierarhiji prioritete izvajanj kazalnik pripada.
- **Okvir (granulacija):** določa, kako daleč podjetje želi iti z merjenjem kazalnika (npr. proizvodna linija, obrat, posamezen stroj, ...).
- **Tip meritve – absolutna ali preračunana:** kazalnik lahko podaja celotno količino (npr. celotna porabljena energija v enem tednu v kWh) ali preračunana količina (energija, porabljena na enoto produkta/storitve na teden).
- **Perioda:** perioda sledenja in izračunavanja kazalnika (npr. teden, dan, izmena).
- **Viri podatkov:** kateri podatki so za izračunavanje kazalnika potrebni, kje se zajemajo/merijo in kdo je za to odgovoren.
- **Lastnik:** vsak kazalnik ima tudi svojega skrbnika, ki je odgovoren za njegovo izračunavanje kot tudi vrednotenje in sprejemanje odločitev na podlagi pridobljenih informacij.

4.2.2 Predstavitev vrednosti kazalnikov

Poznamo različne načine predstavitve vrednosti kazalnikov (merske enote):

- predstavitev z absolutno vrednostjo,
- predstavitev z oceno od 0 do 10, linearna skala,
- predstavitev z normalizirano vrednostjo (običajno je vrednost kazalnika 1 ali 100 %, ko zavzame pričakovano vrednost).

Prednost prve metode je ta, da ima kazalnik enoto, ki je uporabniku poznana in je direktno povezana z merjeno količino. Npr. produktivnost, podana s številom kosov izdelka na uro proizvodnje, je za uporabnika zelo nazorna.

Linearna skala temelji na klasičnem ocenjevanju od 0 do 10 ali od 0 do 5. Pričakovana vrednost kazalnika je npr. ocenjena z 8 in predstavlja 90 % vrednosti kazalnika, ocena 10 ustreza 100 % vrednosti kazalnika. Pri takšni normalizaciji kazalnika je potrebno omejevanje vrednosti kazalnika, saj za vrednosti kazalnika nad 100 % nimamo na razpolago ocene, višje od 10.



Slika 4-2: Predstavitev vrednosti kazalnika s pomočjo ocen

Tretji način normalizacije je bolj abstrakten in ni povezan ne s fizikalno osnovo ne s klasičnim sistemom ocenjevanja, kot ga poznamo v šolah. Predstavlja procentualno izboljšanje kazalnika glede na pričakovano vrednost kazalnika.

4.2.3 Hierarhija kazalnikov

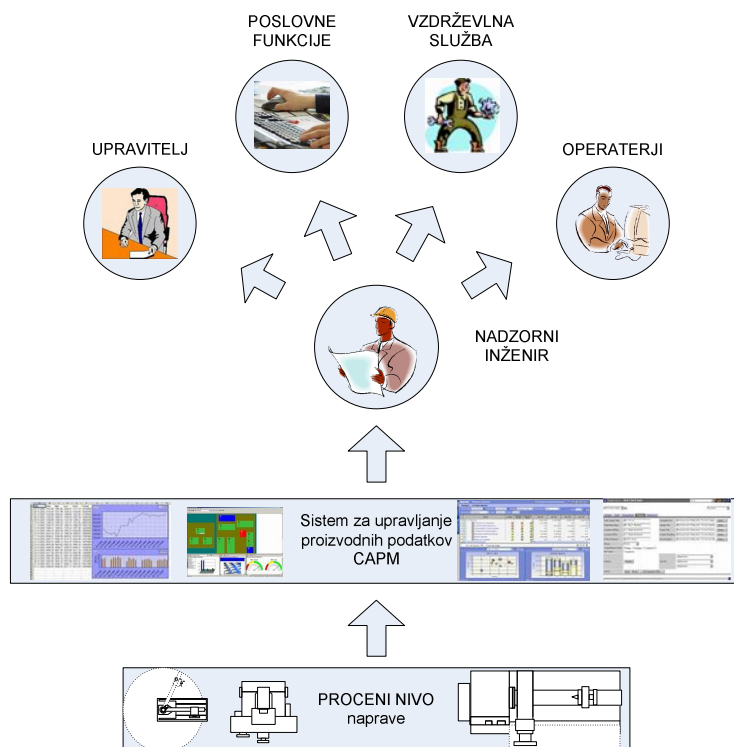
Kazalniki se nahajajo na različnih nivojih vodenja v podjetjih:

- *procesni nivo*: nivo posameznih naprav, regulacijskih zank, procesnih celic, itd.,
- *proizvodni nivo*: spremljanje celotne proizvodne linije, obrata,
- *poslovni nivo*: poslovanje celotnega podjetja.

Kazalniki so na nižjih hierarhičnih nivojih vodenja enostavni in specifični, na višjih nivojih pa bolj splošni in kompleksni, temu primerno pa so tudi zahtevnejši procesi za njihovo definicijo in procedure za njihovo izračunavanje.

4.3 Kazalniki procesnega in proizvodnega nivoja vodenja

V splošnem so bili sistemi KPI razviti za podporo vodenju podjetij na najvišjem, poslovnem nivoju. V zadnjem desetletju se vedno bolj uveljavljajo kazalniki na procesnem in proizvodnem nivoju vodenja pPI. Predvsem v procesnih industrijah, kot so naftna, kemična, celulozna in papirna, je kar 75 % fizične opreme vključeno v sisteme avtomatskega ali drugačnega vodenja. Veliko število regulacijskih zank onemogoča hitro odkrivanje težav, ki nastajajo zaradi slabih nastavitvev regulatorjev, okvar opreme ali ozkih grl v proizvodnih procesih. Raziskave so pokazale, da je mogoče z optimalnim delovanjem sistemov vodenja zagotoviti 3-5 % izboljšanje učinkovitosti proizvodnih procesov z majhnimi vlaganji ali brez dodatnih kapitalskih vlaganj (Brown, 2006). Optimalno delovanje sistemov vodenja lahko dosežemo z avtomatskim zbiranjem procesnih podatkov in preslikavo teh podatkov v pPI-je ter z nadaljnjim posredovanjem pPI-jev zainteresiranim uporabnikom. pPI-ji pokažejo resnično uporabno vrednost takrat, ko uporabnikom omogočajo hitro razbiranje vsebovanih informacij iz posredovanih podatkov o poteku proizvodnih procesov; npr. z njihovo pomočjo zaznajo nastale težave v proizvodnji ali odstopanja od zastavljenih ciljev in s pravočasnim ukrepanjem popravijo nastalo situacijo. Pri tem je še posebej pomembno, da so uporabnikom podatki podani v realnem ali skoraj realnem času na pregleden in učinkovit način, da je mogoče interaktivno raziskovanje po bazi

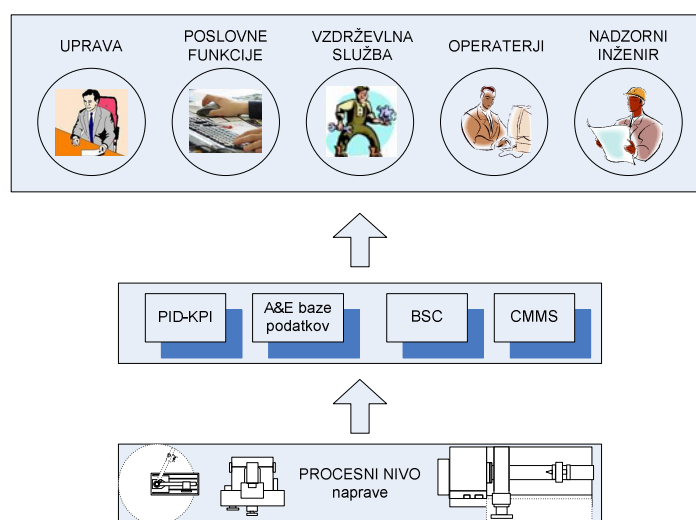


Slika 4-3: Neintegriran model upravljanja procesne opreme, kjer končnim uporabnikom informacije posreduje nadzorni inženir. Takšen pristop ne spodbuja boljše organizacije in poteka dela v proizvodnji (Brown, 2006)

proizvodnih podatkov v globino (angl. *drill-down*) in iskanje vzroka za nastalo situacijo in da so v takšni situaciji uporabniku posredovani predlogi, kaj je potrebno narediti za izboljšanje situacije (uporaba sistemov DSS). Poleg nadzornega inženirja, ki je velikokrat zadolžen za upravljanje proizvodnih podatkov, se zanje zanimajo še operaterji, proizvodni upravitelji, vzdrževalna služba, planska služba, itd.

Slika 4-3 prikazuje primer neustrezne distribucije procesnih podatkov, saj rezultate sistema za upravljanje proizvodnih podatkov (angl. *Control Asset Performance Management CAPM*) pregleduje nadzorni inženir in jih po lastni presoji nadalje posreduje drugim uporabnikom v podjetju in pri tem igra vlogo posrednika, ki podatke preoblikuje in filtrira po lastni presoji ter tako vnaša zakasnitve v podatkovne tokove. Izboljšano organizacijsko strukturo prikazuje slika 4-4. Proizvodni podatki se v vmesnem nivoju konsolidirajo za vsakega končnega uporabnika posebej in se mu posredujejo neposredno. Opisani pristop je procesno orientiran za razliko od prejšnjega, ki je podatkovno orientiran. To pomeni, da podatki predstavljajo samo sredstvo za doseganje cilja, to je boljše izvajanje procesov, kot so bili definirani v procesni organizacijski strukturi (poglavje 2.2.1).

Poglejmo si primer vpliva kakovosti regulacijske zanke za regulacijo temperature v reaktorju v proizvodnji polimernih emulzij. V primeru, da ta regulacijska zanka zaradi delne zamašitve črpalke za doziranje iniciatorja v reaktor deluje slabo, prične kakovost izdelkov padati. V primeru, da podatke obravnava samo nadzorni inženir, bo ta poskusil problem rešiti v okviru svojih zmožnosti. Velikokrat pa se zgodi to, da se nadzorni inženir ne zaveda vseh vplivov in ekonomskih posledic, ki jih takšna napaka ima na poslovanje podjetja. Slabši izdelki med drugim vplivajo na zadovoljstvo kupcev, večjo porabo filtrov in večje stroške čiščenja odplak, ceno izdelkov, itd. S svojo nevednostjo



Slika 4-4: Informacijski sistemi (PID-KPI, A & E (Accident and Emergency) baze podatkov, BSC, Computerized Maintenance Management System - CMMS) preoblikujejo podatke procesnega nivoja v takšne oblike, kot jih potrebujejo končni uporabniki na različnih nivojih vodenja v podjetju, ki so jim ti podatki neposredno posredovani (Brown, 2006)

ali premajhnim vplivom (nakup nove črpalke) težave ne odpravi pravočasno, kar v proces vnaša dodatno škodo. V primeru, da so podatki o slabem delovanju opisane črpalke podani istočasno vzdrževalni službi, prodajni službi in odgovornim na poslovnem nivoju vodenja, se zaradi strateškega pomena napake sprožijo ustrezni postopki in viri za sanacijo napake v čim krajšem času in s tem prepreči dodatna škoda.

4.3.1 Kazalniki procesnega nivoja vodenja

Kratkoročni kazalniki, ki opisujejo učinkovitost posameznih regulacijskih zank ali drugih sistemov vodenja na procesnem nivoju (angl. *process, control-system KPIs*), so podrobneje obravnavani v literaturi (Ruel, 2004; Kinney, 2004; Haji-Valizadeth, 2005; Gerry in Buckbee, 2005, 2006; Gordon, 2006). Primeri kratkoročnih kazalnikov procesnega nivoja so:

- kazalnik variance (angl. *Variance index*)
- kazalnik oscilacij (angl. *Oscillation index*)
- ventili v končnem položaju (angl. *Valve Stickiness index*)
- kazalnik izkoriščenosti (angl. *Utilization index*)
- kazalnik zasičenja (angl. *Saturation index*)
- Hariss indeks (angl. *Hariss index*)
- expert tune kazalnik (angl. *Expert Tune index*)
- izhod na meji (angl. *Output at limit*)
- standardna deviacija izhoda (angl. *Output Standard Deviation*)
- povprečna absolutna napaka (angl. *Average Absolute Error*)
- prečkanje referenčne vrednosti (angl. *Set-point Crossings*)
- integral absolutne napake (angl. *Integral Absolute Error*)
- robustnost (angl. *Robustness*)
- učinkovitost (angl. *Effectiveness*)
- spremenljivost (angl. *Variability*)
- zanesljivost (angl. *Reliability*)
- čas v izrednem načinu delovanja itd.

Bistvena prednost predstavljenih kazalnikov je avtomatska detekcija neželenega stanja posamezne regulacijske zanke ali naprave. Ker je število naprav in regulacijskih zank v tipičnih procesnih industrijah (petrokemija, rafinerije, itd.) veliko in sega v tisoče, je s takšnim pristopom omogočena lažja identifikacija in lociranje napake tako v fazi zagona kot v poznejših fazah življenjskega cikla procesa. Pri tem je ključnega pomena izgradnja učinkovitega sistema predstavitve kazalnikov pristojnim zaposlenim, ki lahko vplivajo na proces in odpravijo napake.

4.3.2 Kazalniki proizvodnega nivoja vodenja pPI

Pri spremljanju celotne proizvodnje se ne spuščamo na nivo posameznih naprav, pač pa obravnavamo proizvodnjo kot celoto in preučujemo posamezne vidike uspešnosti

proizvodnje. Z uporabo regulacijskih tehnik lahko vplivamo na povečan tok izdelkov, povečan donos izdelkov boljše kakovosti, zmanjšanje porabe energije, zmanjšano onesnaževanje, zmanjšano proizvodnjo neustreznih (angl. *off-specification*) izdelkov, izboljšamo varnost, povečamo življenjsko dobo opreme, izboljšamo operativnost in zmanjšamo potrebo po delovni sili (Edgar, 2004), kar so ključna področja, ki jih obravnavajo sistemi za ocenjevanje učinkovitosti proizvodnje. Gerry (2006) definira tako imenovane srednje do dolgoročne kazalnike, ki opisujejo dobiček, kakovost, celotne stroške, pretok materiala, dejanske obratovalne čase in proizvodne stroške. Prednost takšnih kazalnikov v primerjavi s kazalniki na poslovnem nivoju vodenja je predvsem v tem, da jih je enostavneje meriti, meri se jih v krajših časovnih intervalih in lahko se jih uporablja na različnih nivojih v podjetju (enota, oddelek). Pred časom smo v okviru dela (Zorzut, 2004; Rakar in ostali, 2004) definirali splošni nabor kazalnikov za proizvodni nivo vodenja in osnovne skupine pPI-jev so naslednje:

1. *Varnost in okolje:*

- število nezgod na delovnem mestu
- število alarmov, ki opozarjajo na nevarnost
- poraba sveže vode
- proizvodnja odpadkov pred reciklažo
- število prekoračitev mejnih koncentracij škodljivih snovi pri spuščanju odpadkov v okolje

2. *Učinkovitost proizvodnje:*

- učinkovitost zaposlenih/infrastrukture
- poraba surovin in energije
- pretočni čas izdelkov
- učinkovitost storitev notranjih in zunanjih služb
- zastoji v proizvodnji

3. *Kakovost proizvodnje:*

- procent končnih izdelkov/surovin/materialov, ki ne ustrezajo kriterijem kakovosti
- izmet
- kakovost storitev notranjih in zunanjih služb

4. *Slednje planu dela:*

- realizacija plana,
- delež proizvodnje, ki zamuja
- delež proizvodnje, ki je zaradi zamud sprožil penale
- delež proizvodnje, ki je bil predčasno realiziran

5. *Vidiki v povezavi z zaposlenimi:*

- zadovoljstvo zaposlenih z delom
- izgubljeni delovni dnevi zaradi poškodb in bolezni
- povprečni čas službovanja zaposlenih
- število predlogov za izboljšave

V podjetjih kot tudi družbenih sistemih se vse bolj uveljavljajo sistemi za zagotavljanje kakovosti, kot je popolno upravljanje kakovosti TQM (angl. *Total Quality Management*). TQM je sistem upravljanja kakovosti na nivoju celotnega podjetja, ki obsega različne faze od planiranja, organizacije, usmerjanja in vodenja do zagotavljanja kakovosti. Popolno (angl. *Total*) izhaja iz dejstva, da je kakovost sestavljena iz kakovosti vložka lastnikov in kakovosti izdelkov (www.wikipedia.org). V okviru sistema TQM je za proizvodnjo še posebej zanimiv kazalnik *Zanesljivost*, ki poleg relacij proizvajalec-kupec vsebuje tudi kazalnik skupna učinkovitost naprav (angl. *Overall Equipment Effectiveness OEE*) (Ahmad in Dhafr, 2002).

$$OEE = R \cdot Z \cdot K \quad (4.1)$$

V enačbi (4.1) imajo posamezne komponente naslednji pomen:

R – razpoložljivost (učinkovitost z vidika razpoložljivosti)

Z – zmogljivost (učinkovitost z vidika zmogljivosti)

K – kakovost (učinkovitost z vidika kakovosti)

Razpoložljivost R je definirana z enačbo (4.2)

$$R = \frac{t_{PR}}{t_O - t_{TZ}} \quad (4.2)$$

t_{PR} – čas proizvodjanja (čas, ko naprava izdeluje produkte)

t_O – obratovalni čas (čas, ko tovarna ni zaprta)

t_{TZ} – čas taktičnih zastojev v procesu, napravi

Zmogljivost Z je definirana kot razmerje med opazovano in teoretično predpisano hitrostjo naprave oziroma kot razmerje med normiranim in dejanskim časom, ki je bil porabljen za izvršitev operacije in je podana z enačbo (4.3)

$$Z = \frac{t_N}{t_D} \quad (4.3)$$

t_N – normiran čas za izvršitev določene operacije

t_D – dejanski (izmerjeni) čas

Lahko pa jo definiramo tudi kot razmerje med dejansko količino proizvedenega produkta in teoretično predpisano količino produkta, ki naj bi se na napravi ali procesu izvedel v danem časovnem obdobju. Pri tem upoštevamo vse produkte, dobre in slabe, ki so se na napravi ali procesu proizvedli.

Faktor kakovosti K prikazuje izgube, ki so posledica neustreznosti določenega dela produktov po končanem delu na neki napravi ali v procesu in je podan z enačbo (4.4).

$$K = \frac{P_Q}{P_{VSI}} \quad (4.4)$$

P_Q – delež dobrih izdelkov

P_{VSI} – celotna količina izdelkov, ki vstopijo v operacijo ali proces

Opisani sistem merjenja skupne učinkovitosti naprav OEE je dobro uveljavljen v podjetjih na svetovnem nivoju in zaradi svoje standardizirane oblike obstajajo referenčne vrednosti za te kazalnike za posamezne gospodarske panoge, kar posameznemu podjetju omogoča primerjavo s konkurenčnimi podjetji (angl. *Benchmarking*).

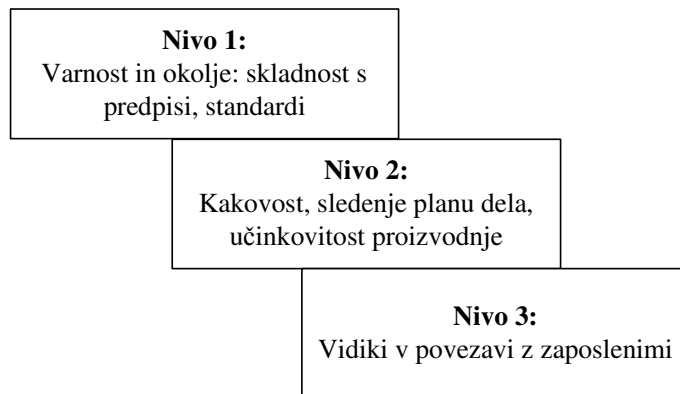
4.4 Povezanost kazalnikov na različnih hierarhičnih nivojih

Kazalniki poslovnega nivoja naslavljajo dolgoročne cilje podjetja in predstavljajo dosežene rezultate v daljšem časovnem obdobju (nekaj mesecev, leto), tako da je vpliv nanje dolgoročen (npr. zadovoljstvo strank). Kazalniki procesnega nivoja so kratkoročni kazalniki, s katerimi operiramo na urni/dnevni ravni; z njihovo pomočjo hitreje odkrivamo napake, ki nastopijo v proizvodnem procesu in jih odpravljamo, kar posledično vodi k bolj enakomernemu in optimalnemu delovanju posameznih naprav, obrata, celotne proizvodnje in posledično tudi celotnega podjetja. To pomeni, da z ustreznim vodenjem procesnih in proizvodnih kazalnikov lahko posredno zagotavljamo boljše rezultate v poslovanju podjetja, kar se odraža v ugodnejših potekih KPI-jev poslovnega nivoja (Gerry in Buckbee, 2006; Brown, 2006). Upravljanje kazalnikov na procesnem in proizvodnem nivoju ima to prednost, da v realnem ali skoraj realnem času odgovarja na dogodke v proizvodnji in odpravlja vzroke za nastale težave na kraju nastopanja, ne da bi pri tem čakali na mesečna poročila managementa in potrebne ukaze za ukrepanje.

4.5 Uvajanje kazalnikov proizvodnega nivoja pPI

Poleg strukturnega vidika, ki so ga obravnavala prejšnja podpoglavja, mora sistem kazalnikov vsebovati tudi proceduralni vidik, ki podaja postopek za definicijo, implementacijo, uporabo in vzdrževanje kazalnikov.

Da proizvodnja v podjetju lahko deluje, mora zadoščati vsem varnostnim predpisom, smotrno mora uporabljati dane vire energije, materiala in delovnih sredstev, upoštevati mora osnovne potrebe in zahteve delavcev, itd. Ker si te zahteve med seboj niso enakovredne, lahko definiramo ustrezno ogrodje v obliki **trinivojske strukture** (slika 4-5), ki omogoča organizacijo kazalnikov v tri skupine glede na prioriteto udejanjanja (Veleva in Ellenbecker, 2001). Na prvem nivoju imamo kazalnike, ki so povezani z



Slika 4-5: Ogrodje v obliki trinivojske strukture za definiranje sistema pPI-jev, ki razvršča kazalnike glede na prioriteto udejanjanja

zakonskimi predpisi glede varnosti in varovanja okolja in jih je potrebno najprej izvajati. Na drugem nivoju sledijo kazalniki v povezavi s kakovostjo, sledenjem planu dela in učinkovitostjo. Na tretjem in zadnjem nivoju imamo kazalnike, ki opisujejo različne vidike v povezavi z zaposlenimi. Noben od teh vidikov ni izrazito pomembnejši, razlike nastopajo le v tem, kateri vidiki morajo biti za uspešno in učinkovito delovanje proizvodnje prej obravnavani. Vsi kazalniki tudi niso enako vplivni, med njimi obstajajo tudi razlike v zahtevnosti pri implementaciji, zato je smiselno, da podjetje prične z definiranjem ključnih ali za implementacijo enostavnih kazalnikov in se nato premika proti bolj kompleksnim ali manj vplivnim kazalnikom. To pomeni, da je uporaba kazalnikov kontinuiran, evolutiven proces postavljanja ciljev in merjenja učinkovitosti pri doseganju teh ciljev, pri čemer se definicija in nabor kazalnikov v vsaki iteraciji na novo ovrednoti in ustrezno dopolni.

4.5.1 Primer 8-koračnega iterativnega zaprtozančnega modela za izračunavanje kazalnikov

Metodologijo izračunavanja pPI-jev (proceduralni vidik) lahko strnemo v 8-koračni iterativni model, ki ga prikazuje slika 4-6. Temelji na modelu, ki ga je razvil Bennett (Bennett, 1999).

V *prvem koraku* definiramo namere in cilje vodenja proizvodnega procesa, ki so v skladu s poslanstvom podjetja. Ti cilji morajo naslavljati vse glavne segmente vodenja proizvodnega procesa (kakovost, varnost, itd.), pri tem pa morajo spodbujati zaposlene k sprejemanju odločitev.

Drugi korak vsebuje identifikacijo potencialnih kazalnikov, ki odsevajo cilje uspešne in učinkovite proizvodnje. Priporočljivo je, da podjetje uporabi čim več splošnih kazalnikov, torej kazalnikov, ki jih lahko uporabimo v veliki večini proizvodnih podjetij. To je vsekakor težka naloga, še posebej za manjša podjetja z omejenimi finančnimi viri in lastnim znanjem. V takih primerih lahko podjetja za začetek

implementirajo samo nekaj najbolj potrebnih kazalnikov in s časom povečujejo njihovo število.

Tretji korak vsebuje izbiro kazalnikov za implementacijo. Poleg splošnih kazalnikov na tem mestu premislimo tudi o možnosti implementacije dodatnih/dopolnilnih kazalnikov, ki so specifični za proizvodnjo danega podjetja. V tem procesu mora sodelovati čim več zaposlenih. Pri tem projektu moramo dobiti podporo tako uprave podjetja, vodij posameznih obratov kot ključnih zaposlenih v proizvodnem obratu. S podporo uprave podjetja dobimo ustrezna sredstva in podporo, kar je potrebno za izvedbo projekta, vodje proizvodnih obratov in linij nam omogočajo definiranje ključnih funkcij proizvodnje, ki jih je potrebno meriti, zaposleni na nižjih funkcijah pa nam omogočajo zajemanje kakovostnih in točnih podatkov, ki so potrebni za izračunavanje kazalnikov.

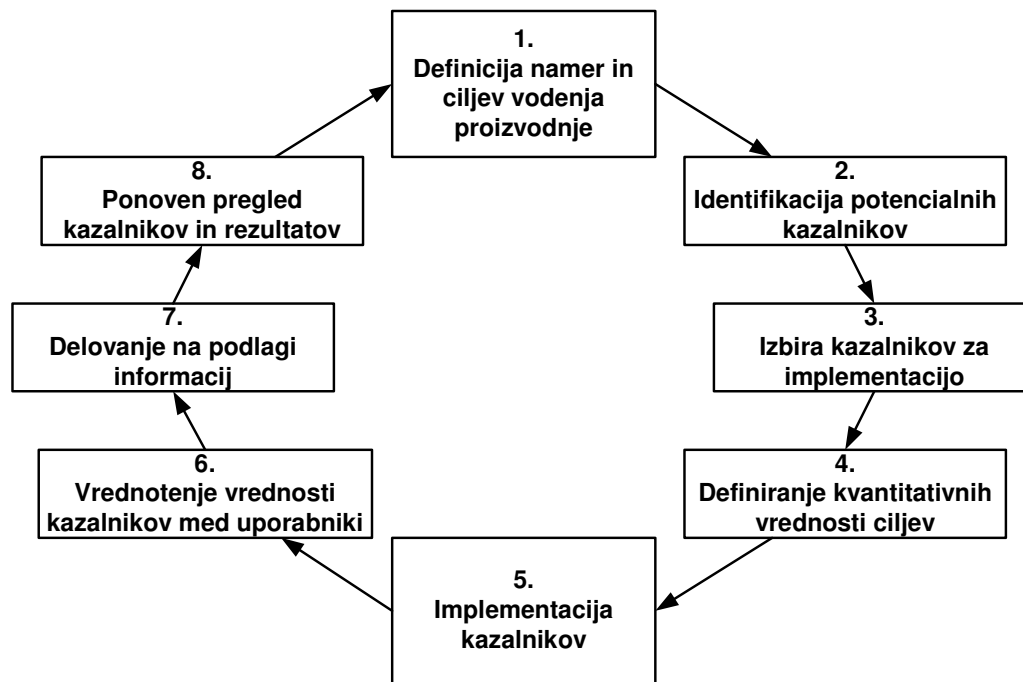
V *četrtem koraku*, postavljanje ciljev, določamo specifične cilje, kot so zmanjšanje izmeta na prvi liniji za 20 % v naslednjem letu ali doseči ničelno odsotnost z dela zaradi posledic nesreč na delu. Ta korak je pomemben, saj omogoča preverjanje doseganja ciljev v danem časovnem obdobju, poveča zanimanje vodij obratov in povečuje odgovornost sodelujočih v projektu. Samo doseganje ciljev še ne pomeni, da je kakovost proizvodnje zadovoljiva in da je cilj dosežen, ampak pomeni potrebo po postavljanju novih ciljev, dejstev, želja, normativov kot del procesa kontinuiranega napredka na vseh pogledih učinkovite proizvodnje.

Peti korak predstavlja implementacijo kazalnikov. To je ključni korak, ki vsebuje zbiranje podatkov, izračune, vrednotenje in interpretacijo rezultatov. To je časovno najbolj potraten korak, ki zahteva sodelovanje velikega števila zaposlenih v podjetju. Da zgradimo uspešen sistem kazalnikov, moramo upoštevati naslednja izhodišča:

- kateri tip informacijskega sistema bo uporabljen za upravljanje podatkov,
- kakšno programsko opremo bomo uporabljali za poročanje,
- kdo od zaposlenih bo zbiral katere podatke,
- kako se bodo zaposleni v proizvodnji usposabljali za zbiranje podatkov,
- kako bo izvedeno preverjanje točnosti podatkov.

Dobro je videti vlogo kazalnikov kot integralni del orodij za podporo odločanju in ne kot kratkoročen in izoliran informacijski sistem.

Šesti korak vsebuje rezultate nadziranja (angl. *monitoring*) in komuniciranja (angl. *communication*). Da lahko govorimo o kontinuiranem napredovanju, morajo konstruktorji in uporabniki sistema kazalnikov periodično ovrednotiti rezultate uporabe kazalnikov. Tako je smiselno vzpostaviti sistem za redno vrednotenje, interpretacijo in predstavitev rezultatov zaposlenim in drugim zainteresiranim skupinam (vodje proizvodnje, uprava podjetja, itd). Podjetje si s stalnim razvojem in z napredkom v



Slika 4-6: Zaprtozančni model za definiranje, merjenje in razvoj pPI-jev

smeri doseganja zastavljenih ciljev lahko močno izboljša svojo konkurenčnost in po drugi strani ugled na trgu.

Sedmi korak: Delovanje na podlagi informacij, ki jih dobimo z uporabo pPI-jev, je ključni korak v procesu uporabe kazalnikov. V tem koraku vodje proizvodenj izvajajo dodatne meritve in sprejemajo ukrepe za zagotovitev potrebnega ali želenega stanja v proizvodnih procesih in na ta način demonstrirajo, da implementacija in uporaba kazalnikov predstavlja proces kontinuiranega razvoja proizvodnega procesa.

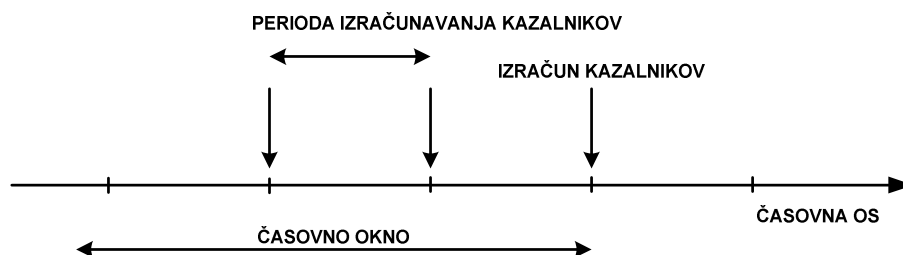
Zadnji, *osmi korak*, vsebuje ponoven pregled kazalnikov in rezultatov. Ta korak predstavlja temelj za postavitve novih ciljev in kazalnikov. Proces ukinitve kazalnika je ravno tako pomemben kot proces izbire novega. Samo z redno revizijo ciljev in kazalnikov lahko dosežemo kontinuiran napredek v kakovosti proizvodnega procesa.

4.6 Časovni parametri pri izračunavanju kazalnikov

Algoritem za izračunavanje pPI-jev je povezan z dvema časovnima parametroma:

- periodo izračunavanja kazalnika,
- časovnim oknom.

Perioda izračunavanja kazalnikov je odvisna od dinamike procesa in od tega, kako pogosto uporabnik pregleduje kazalnike. Na proizvodnem nivoju se kazalnike vrednoti na dnevni ravni (večkrat na dan, dnevno, na nekaj dni). Na poslovnem nivoju se nekatere kazalnike vrednoti mesečno, na tri mesece, pol leta ali na letni ravni.



Slika 4-7: Prikaz osnovnih časovnih parametrov algoritma za izračunavanje kazalnikov

Časovno okno definira čas, v katerem preučujemo dogajanje v procesu in posledično določa podatke, ki so potrebni za izračun kazalnikov. Pri kazalnikih na nivoju vodenja proizvodnje, ki se vrednotijo na dnevni ravni in v primeru, ko so časovne konstante procesov velike, je časovno okno daljše od periode vzorčenja. Tako se učinkovitost proizvodnje izračunava iz proizvodnih podatkov od nekaj dni do celotnega tedna proizvodnje. Z večanjem časovnega okna je učinek povprečevanja večji, kar je dobro za izločanje šuma v kazalniku, hkrati pa se zmanjša občutljivost kazalnika na trenutne dogodke v proizvodnji. Izbira ustreznega časovnega okna za posamezen kazalnik je tako še posebej pomembna. Bolj podrobna analiza vpliva časovnega okna na potek kazalnikov bo obravnavana v poglavju 8.4.

4.7 Samo izračunavanje kazalnikov ni dovolj

Poleg iskanja potrebnih informacij v podatkih in njihova preslikava v kazalnike je potrebna tudi ustrezna grafična predstavitev časovnega poteka kazalnikov. Znani pregovor, da dobra slika pove več kakor tisoč besed, v tem primeru še kako drži. Zamislimo si, da imamo tisoč regulacijskih zank in da izračunavamo nekaj tisoč kazalnikov, ki podajajo kakovost teh regulacijskih zank. Brez ustreznega mehanizma za predstavitev in vrednotenje kazalnikov, ki omogoča hitro alokacijo problema v kateri od zank, smo samo preslikali problem zasičenosti uporabnika s surovimi podatki v problem zasičenosti uporabnika s podatki v obliki pPI-jev (Brown, 2006). Zato je naslednji korak razvoj sistema, ki spremlja potek kazalnikov in obvešča uporabnika v primeru, ko določen kazalnik odstopa od pričakovane vrednosti in po možnosti tudi predlaga potrebne ukrepe, ki lahko odpravijo nastalo težavo.

Z implementacijo vseh opisanih elementov informacijsko-komunikacijskega sistema lahko zagotovimo dejansko uporabnost proizvodnih podatkov in dosežemo zelene učinke – boljšo izkoriščenost proizvodnih virov, boljšo kakovost izdelkov, boljše poznavanje razmer v proizvodnji in posledično boljše upravljanje naročil in povečanje zadovoljstva strank, večji dobiček, itd (Brown, 2006).

5. Zaprtozančna paradigma vodenja proizvodnje

Sinteza kontrolnega sistema za vodenje proizvodnje (angl. *plantwide control system*) predstavlja aktualen kot tudi konstrukcijsko zahteven problem, s katerim se soočajo tako proizvodna podjetja kot teorija vodenja sistemov. Takšen sistem karakterizira nekaj posebnosti, ki jih ne zasledimo pri obravnavi sistemov za vodenje za posamezne enote (Stephanopoulos in Ng, 2000):

- regulirane spremenljivke za sistem vodenja na nivoju celotne proizvodnje niso tako jasno ali enostavno določljive, kot to velja za posamezne enote,
- lokalne regulacijske odločitve, ki se izvedejo na nivoju ene enote, imajo lahko daljnosežne posledice na celotno proizvodnjo,
- razsežnost problema, ki ga predstavlja sistem za vodenje celotne proizvodnje, je znatno večji od razsežnosti problema, ki ga predstavlja sistem za vodenje posamezne enote.

Kontrolni sistemi v proizvodnih obratih so velikokrat strukturirani hierarhično v več nivojev, pri čemer se procesi na posameznih hierarhičnih nivojih izvajajo na različnih časovnih skalah (Skogestad, 2000). Razvrščanje opravil se izvaja na tedenskem nivoju, optimizacija obrata na nivoju dneva, nadzorno vodenje procesov na nivoju ure/minute in stabilizacijsko ali regulacijsko vodenje posameznih procesnih veličin na nivoju minute/sekunde. Posamezni nivoji so med seboj povezani preko reguliranih spremenljivk, katerih reference se izračunavajo na višjem nivoju, naloga nižjega nivoja vodenja pa je implementacija nastavljenih referenčnih vrednosti. Pri tem predpostavljamo, da se gledano z nivoja, ki postavlja referenčne vrednosti za regulirane spremenljivke, implementacija le-te zgodi trenutno ali v zelo kratkem času. Izbira ustreznih reguliranih spremenljivk, ki povezujejo nivoje vodenja med seboj, predstavlja prvi korak v procesu sinteze kontrolnega sistema na nivoju proizvodnje. Temu sledijo še naslednji koraki:

- izbira manipulativnih spremenljivk,
- izbira ustreznih meritev za potrebe vodenja in stabilizacije proizvodnih procesov,
- izbira strukture regulatorja,
- izbira tipa regulatorja.

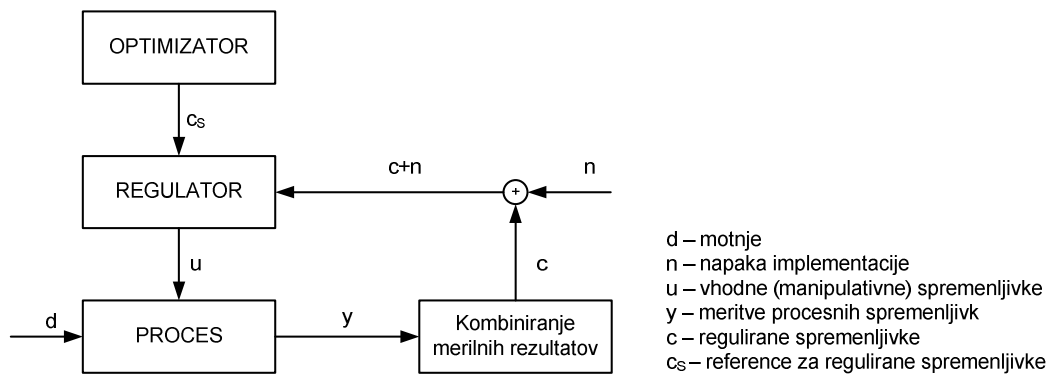
V doktorski disertaciji predstavljamo primer uporabe kazalnikov pPI v vlogi reguliranih spremenljivk procesa. Kazalniki pPI so tako funkcije, ki preslikajo meritve procesnih veličin v regulirane spremenljivke procesa.

Za optimizacijo proizvodnje je v osnovi potrebno definirati kriterijsko funkcijo J , ki jo poskušamo minimizirati oziroma maksimizirati. To je pristop klasičnih optimizacijskih metod, ki pa za svoje delovanje potrebujejo natančen matematičen model procesa, meritve vseh motenj in reševanje dinamičnega optimizacijskega problema v realnem času.

Za proizvodne procese je značilna velika kompleksnost, nepredvidljivost (vpliv trga, itd.), spremenljivost (okvare, staranje opreme, itd.) kot tudi obilica merljivih in nemerljivih motenj z znatnim vplivom na potek procesa, tako da je izdelava natančnega matematičnega modela zelo težavna, velikokrat pa ni ekonomsko upravičena. Iz tega sledi, da je tudi sočasna optimizacija proizvodnje zahtevno opravilo. Tako se vprašamo, ali morda obstaja alternativni pristop, s katerim bi lahko reševali opisano problematiko. Rešitev lahko dobimo v tako imenovanem samooptimizirajočem vodenju procesov.

5.1 Samooptimizirajoče vodenje procesov

Samooptimizirajoče vodenje (Skogestad, 2000; 2004) temelji na predpostavki, da z vzdrževanjem ustrezne regulirane spremenljivke c sistema na neki referenčni vrednosti c_S , sistem deluje v svojem optimalnem področju ali v njegovi bližnji okolici. Sprejemanje odločitev in njihova implementacija v realnih sistemih je lahko izvedena s pomočjo hierarhične strukture, kot jo prikazuje slika 5-1, tako da se reference c_S za regulirane spremenljivke c pošilja z nivoja vodenja (optimizator) na nižji nivo (regulator). To ustreza enostavni zaprtizančni strategiji, kjer se manipulativne spremenljivke u spreminjajo, tako da ohranjajo izbrane regulirane spremenljivke c predpisano referenčno vrednost c_S (Skogestad, 2004).



Slika 5-1: Implementacija samooptimizirajočega zaprtizančnega vodenja procesa z ločenima nivojema za optimizacijo in vodenje

Regulirane spremenljivke c so izbrana podmnožica ali kombinacija razpoložljivih meritev y . Glavna ideja opisanega samooptimizirajočega sistema vodenja je doseganje skoraj optimalnega delovanja procesa samo z vzdrževanjem reguliranih spremenljivk na zahtevanih referenčnih vrednostih brez potrebe po kontinuiranem reševanju optimizirajočega problema, ki smo ga definirali v uvodu v poglavje 5.

Problem samooptimizirajočega vodenja kompleksnega procesa lahko predstavimo s primerom teka na dolge proge (Skogestad, 2004). Funkcija, ki jo je pri takšnem teku potrebno minimizirati, je celotni čas teka, $J=T$. Neodvisna spremenljivka u je vhodna energija oziroma moč, s katero tekač teče, prisotne pa so tudi omejitve, kot je razpoložljiva moč in vzdržljivost tekača. Pri teku na kratke proge tekač v splošnem celotno progo preteče z maksimalno močjo in ne potrebuje dodatnih meril, s pomočjo katerih bi lažje upravljal svoj tek. Z opisanim pristopom pa pri teku na dolge proge ne more računati, saj mora upoštevati omejitve, to je vzdržljivost. Ali obstaja ustrezna regulirana spremenljivka, s pomočjo katere bi tekač lahko optimalno vodil svoj tek?

Prvi način je tek z enako hitrostjo, kot tečejo drugi tekači ($c=y_1$ =konstantna razdalja do najhitrejšega tekača). Opisani pristop ima pomanjkljivosti, saj obstaja možnost, da tekač ne uspe dohajati vodilnega tekača in s tem preseže omejitve sistema. Opisani pristop tudi ne deluje, če je tekač sam. Druga možnost je, da tekač teče s konstantno hitrostjo ($c=y_2$ =hitrost), vendar opisani pristop ni učinkovit v primeru razgibanega terena (d =naklon terena), kjer je optimalno prilagajati hitrost teka. Tekoč lahko tako kot v prvem primeru ne zmore vzdrževati predpisane hitrosti in s tem preseže omejitve sistema na enak način kot v prejšnjem primeru. Boljša rešitev je tek s konstantnim srčnim utripom ($c=y_3$ =srčni utrip) ali s konstantno koncentracijo mlečne kisline v mišicah ($c=y_4$ =koncentracija mlečne kisline). Z opisanim pristopom tekač prilagaja hitrost teka trenutnim psihofizičnim sposobnostim in motnjam iz okolja (npr. tek v hrib) in s tem upošteva motnje, ki jih v prejšnjih primerih ni bilo možno. Hitrost teka in s tem svojo pozicijo v skupini pa občasno popravlja s spreminjanjem reference za srčni utrip/koncentracijo mlečne kisline.

Za lažje razumevanje opisanega principa si pogledjmo osnovno matematično formulacijo samooptimizirajočega vodenja.

Naj bo kriterijska funkcija za optimalno proizvodnjo čim večja ustvarjena ekonomska vrednost proizvodnje, ki jo ponazorimo s skalarno funkcijo J (enačba 5.1):

$$J = \sum \text{vrednost izdelkov} - \sum \text{stroški surovin} - \sum \text{proizvodni stroški} \quad (5.1)$$

Potemtakem se pri vodenju proizvodnje nahajamo v optimalnem področju delovanja takrat, ko se dejansko ustvarjena ekonomska vrednost proizvodnje malo razlikuje od optimalne ustvarjene ekonomske vrednosti J_{opt} . Funkcija J je odvisna od vhodnih

spremenljivk sistema, dinamike procesa in motenj. Pri iskanju optimalnega področja delovanja upoštevamo omejitve sistema g_x , kot jih definira enačba (5.2).

$$\begin{aligned} g_1(x, u_0, d) &= 0 \\ g_2(x, u_0, d) &\leq 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

g – omejitve sistema

x – notranja stanja sistema

u_0 – prostostne stopnje, ki se porabijo za zadovoljevanje omejitev

d – zunanje motnje, ki vplivajo na sistem

Za zadovoljevanje teh omejitev se uporabi določeno število prostostnih stopenj u_0 sistema (vhodnih, manipulativnih spremenljivk), preostale prostostne stopnje pa se v nadaljevanju uporabljajo za doseganje optimalne vrednosti kriterijske funkcije. Slednjo dobimo tako, da poiščemo maksimalni dobiček pri danih motnjah, torej poiščemo takšne vrednosti manipulativnih spremenljivk $u = u_{opt}(d)$, s katerimi vodimo proces, da je kriterijska funkcija J maksimalna.

$$J_{opt}(d) = \max_u J(u, d) = J(u_{opt}(d), d) \quad (5.3)$$

J – kriterijska funkcija

u – preostale prostostne stopnje za vodenje procesa

d – zunanje motnje, ki vplivajo na sistem

5.1.1 Izbira manipulativnih in reguliranih spremenljivk

Za uspešno implementacijo samooptimizirajočega sistema vodenja je ključna izbira ustreznih reguliranih spremenljivk c , ki morajo zadostiti naslednjim pogojem (Skogestad, 2004):

- optimalna vrednost za regulirane spremenljivke c naj bo neobčutljiva na motnje, tako da je napaka glede na izbiro delovne točke čim manjša,
- c naj bo enostavno merljiva in dobro vodljiva (tako je napaka implementacije majhna),
- c naj bo čim bolj občutljiva na spremembe manipulativnih spremenljivk u (ekvivalentno: kriterijska funkcija J mora imeti glede na regulirano spremenljivko c čim manj izrazit ekstrem, biti mora čim bolj ploska, tako da je njena občutljivost na spremenljivko c in posledično napako implementacije spremenljivke c čim manjša),
- za primere z več reguliranimi spremenljivkami izbrane spremenljivke ne smejo biti med seboj močno korelirane.

Prvo pravilo minimizira vpliv motenj na kriterijsko funkcijo. Drugo pravilo zmanjša magnitudo napake implementacije. Zadnji dve pravili zmanjšata učinek napake

implementacije. Vsa pravila skupaj tako lahko poenostavimo v eno samo: "Regulirane spremenljivke c morajo imeti regulacijsko območje (območje, ki ga c lahko zavzame s spreminjanjem vhodnih spremenljivk u) veliko v primerjavi z vsoto optimalne variacije (pričakovana variacija c_{opt} glede na motnje) in regulacijske napake (napaka implementacije n)". Podrobnejša analiza ustreznosti izbranih pPI-jev kot reguliranih spremenljivk za izbrani proces polimerizacije je obravnavana v poglavju 8.7.

Tudi Stephanopoulos in Ng (2000) ugotavljata, da je ena od osnovnih nalog sistemov za vodenje proizvodnih procesov definicija ustrezne strukture sistema vodenja vključno z definicijo tistih procesnih spremenljivk, ki jih je potrebno meriti in tistih, s katerimi vplivamo na proizvodnjo, tako da se doseže željeno obnašanje sistema. Velikokrat se ekonomsko učinkovitost proizvodnje ocenjuje z naborom manjših ciljev, ki jih mora proizvodnja dosegati, te pa lahko razvrstimo v dva razreda:

1. *EksPLICITNI cilji proizvodnje* ($v \in V \subseteq Y$): to so cilji, ki jih lahko direktno povežemo z merljivimi spremenljivkami y (npr. kakovost izdelkov, ...)
2. *IMPLICITNI cilji proizvodnje* ($z \in Z$): to so cilji, ki jih lahko izrazimo implicitno kot funkcije merljivih y in vhodnih (manipulativnih) spremenljivk u .

$$z_j = f_j(y_i, u_i), \quad z_j \in Z, \quad y_i \in Y$$

Tipični primeri implicitnih ciljev so optimizacija operativnega dobička proizvodnega obrata, vzdrževanje optimalnih količin materialov v proizvodnem procesu, regulacija kakovosti izdelkov, zagotavljanje varnosti v obratu, itd. Vprašanje, ki se pojavlja, je, kako lahko takšne implicitne cilje, ki jih ni mogoče enostavno meriti, reguliramo. To lahko naredimo z ustrezno preslikavo implicitnih ciljev v množico reguliranih spremenljivk, v nadaljevanju pa z ustrezno regulacijo in vzdrževanjem teh spremenljivk na predpisanih vrednostih na enak način, kot je to predstavil Skogestad. Avtorja definirata globalni cilj sistema za vodenje celotne proizvodnje z vektorsko funkcijo (enačba 5.4):

$$\Phi = \min_{u, y_{sp}, z_{sp}} F = [F_k] \quad \forall k \in F_k \equiv F_I \cup F_{II} \quad (5.4)$$

kjer so

$$\begin{aligned} F_{I,i} \in F_I & \quad F_{I,i} = \|v_{i,sp} - v_i\| & \quad v_i \in V & \quad \text{eksplisitni cilji} \\ F_{II,j} \in F_{II} & \quad F_{II,j} = \|z_{j,sp} - z_j\| & \quad z_j \in Z & \quad \text{implicitni cilji} \end{aligned}$$

Velikokrat je globalni cilj proizvodnega procesa maksimizirati operativni dobiček in v takšnem primeru je cilj optimizacijskega procesa minimizirati razliko med maksimalnim možnim dobičkom $z_{dobicek,sp}$ in dejanskim dobičkom $z_{dobicek}$ (enačba 5.5):

$$\Phi = \min \|z_{dobicek,sp} - z_{dobicek}\| = \left\| \max_u z_{dobicek}(\mathbf{u}, \mathbf{y}, \mathbf{d}) - z_{dobicek}(\mathbf{u}, \mathbf{y}, \mathbf{d}) \right\| \quad (5.5)$$

kjer u in y predstavljata manipulativne in merjene spremenljivke, d pa motnje v sistemu.

Opisano vektorsko optimizacijo je mogoče prevesti na skalarno optimizacijo preko uvedbe utežnih faktorjev w_i in w_j , tako da enostavno seštejemo utežene prispevke posameznih ciljev (enačba 5.6)

$$\Phi' = \min_{u, v_{i,sp}, z_{j,sp}} F = \sum w_i \|v_{i,sp} - v_i\| + \sum w_j \|z_{j,sp} - z_j\| \quad (5.6)$$

kjer so $v_{i,sp}$ in $z_{j,sp}$ optimalne vrednosti implicitnih in eksplicitnih ciljev vodenja proizvodnje. Izbrane uteži se določijo glede na vpliv posameznega cilja na skalarno kriterijsko funkcijo.

Povezava implicitnih ciljev z množico merljivih spremenljivk ni tako enostavna kot to velja za eksplicitne cilje. Pri iskanju teh povezav je potrebno narediti naslednje korake:

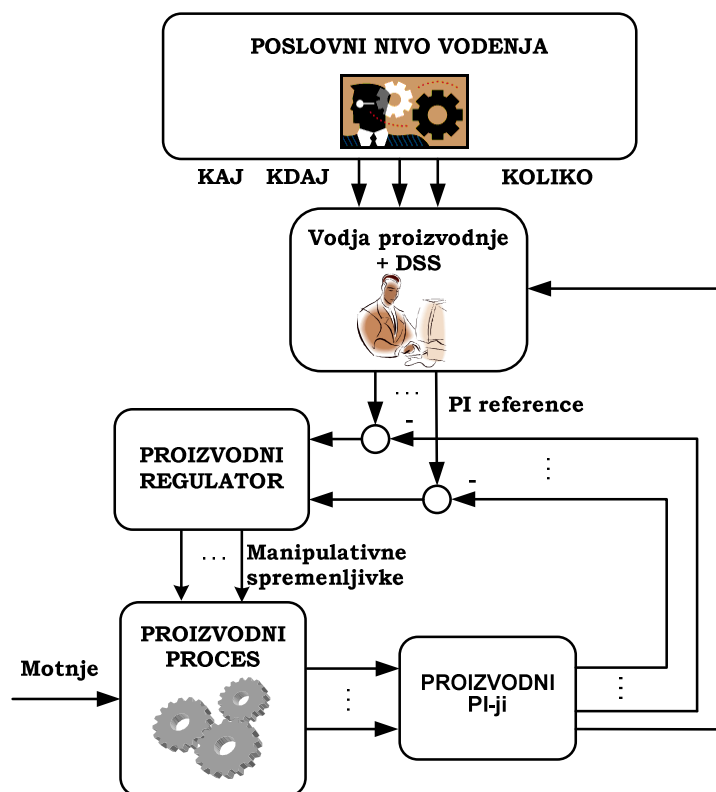
1. *Klasifikacija motenj.* Motnje klasificiramo v dve skupini: tiste z izrazitim vplivom na implicitni cilj in tiste z manjšim vplivom.
2. *Izbira zaprtizančno reguliranih spremenljivk.* Izračunamo občutljivost izhodov na normalizirano variacijo motenj z izrazitim vplivom na kriterijsko funkcijo. Tisti merjeni izhodi z največjo občutljivostjo so izbrani za regulirane spremenljivke c .

Poleg tega je s hierarhično predstavitvijo vodenja proizvodnega procesa, kjer se na različnih hierarhičnih nivojih vodenja izvaja regulacija različnih ciljev glede na njihov vpliv v kriterijski funkciji možna nadaljnja poenostavitev regulacijske sheme vodenja proizvodnega procesa.

5.2 Zaprtizančna regulacijska shema z uporabo pPI

V poglavju 4 smo predstavili metodologijo za ocenjevanje uspešnosti in učinkovitosti proizvodnih procesov s pomočjo nabora pPI-jev. Z regulacijo teh pPI-jev na določene referenčne vrednosti lahko izvajamo optimizacijo proizvodnje, kot je to bilo prikazano v dosedanjem izvajanju, pri tem pa morajo pPI-ji zadovoljevati pogoje za izbrane regulacijske spremenljivke.

Slika 5-2 prikazuje generalizirano hierarhično zaprtizančno regulacijsko shemo za vodenje celotne proizvodnje na osnovi proizvodnih PI-jev. V zgornji regulacijski zanki vodja proizvodnje optimizira proizvodnjo, tako da izbira referenčne vrednosti za pPI-je v spodnji regulacijski zanki. Svoje odločitve sprejema ročno, pri tem pa se odloča na podlagi zahtev z višjega poslovnega nivoja vodenja (kaj, koliko, kdaj proizvesti), strategije vodenja proizvodnje, vrednost nekaterih pPI-jev in po možnosti s pomočjo DSS sistema za vodenje proizvodnje. Ko so referenčne vrednosti za pPI-je v spodnji zanki določene, je naloga spodnje regulacijske zanke na osnovi proizvodnega regulatorja, da vzdržuje vrednosti teh pPI-jev na predpisanih referenčnih vrednostih. Opisana regulacijska shema omogoča redukcijo kompleksnosti regulacijskega



Slika 5-2: Hierarhična zaprtozračna regulacijska shema za vodenje proizvodnje

problema, saj se zgornja regulacijska zanka izvaja ročno s strani vodje proizvodnje na tedenski/dnevni ravni, medtem ko se spodnja regulacijska zanka izvaja avtomatsko s pomočjo proizvodnega regulatorja na urni ravni. Tako je časovna konstanta spodnje zanke znatno manjša v primerjavi s časovno konstanto zgornje, kar pomeni, da so izhodi na nivoju zgornje zanke vidni na nivoju spodnje regulacijske zanke kot konstantni. Proizvodni regulator je lahko prediktivni regulator na osnovi modela procesa, regulator na osnovi nevronske mreže, vpoglednih tabel, itd.

V poglavju 9 je podrobneje predstavljena sinteza sistema zaprtozračnega vodenja šaržnega procesa, ki je bil implementiran na proceduralnem modelu šaržnega procesa polimerizacije. Za lažje razumevanje različnih pristopov k modeliranju proizvodnih procesov so v poglavju 6 predstavljeni različni koncepti modeliranja podjetij, ki vsebujejo tudi proizvodne procese. V poglavju 7 pa je podrobneje opisan proceduralni model izbranega šaržnega procesa.

6. Koncepti modeliranja proizvodnih procesov

V dosedanjem delu smo predstavili različne poglede na podjetje in vlogo posameznih enot v podjetju, dotaknili smo se razlik med proizvodnimi in poslovnimi procesi in spoznali specifične lastnosti proizvodnega nivoja vodenja. V poglavju 5 smo predstavili idejo zaprtozančnega vodenja in optimizacije celotne proizvodnje, kar zahteva ustrezno poznavanje strukture informacijskih, odločitvenih in fizičnih tokov v samem podjetju. S postavitvijo kvantitativnih in kvalitativnih ciljev v podjetju, z njihovim merjenjem in vodenjem poslovnih in proizvodnih procesov v smeri doseganja zastavljenih ciljev je omogočen stalen napredek in poznavanje stanja v podjetju. Da pa lahko opisane cilje dosežemo, je velikokrat potrebno razviti model podjetja, ki predstavlja osnovo pri gradnji in analizi predstavljenih sistemov.

Za lažje razumevanje konceptov modeliranja podjetij si pogledjmo nekaj splošnih definicij. **Model podjetja** je računski predstavitev strukture, aktivnosti, procesov, informacij, virov, ljudi, obnašanja, ciljev in omejitev v podjetju. **Arhitektura** je (grafični) opis strukture nečesa. Je ogrodje, na podlagi katerega je zgrajen izdelek ali organizacija podjetja. **Referenčni model** (angl. *Reference model*) je splošni model, ki ga lahko uporabimo kot osnovo pri izgradnji specifičnih modelov. **Referenčna arhitektura** (angl. *Reference Architecture*) je strukturirana množica modelov, ki predstavljajo gradnike sistema.

Podjetje je tehnološka, ekonomska in socialna entiteta. Z upravljanjem množice virov (tehnični, tehnološki, človeški in finančni) se dosega zelene aktivnosti. Pojav računalniške znanosti in systemskega inženiringa je omogočil systemski pogled na podjetje, to je obravnavo podjetja kot sistema, ki deluje in se razvija v danem okolju z nekim namenom. Pri tem so različne skupine ljudi (računalničarji, ekonomisti, tehniki), vključene v upravljanje podjetja, razvijale svoj pogled na podjetje, kar se je odrazilo v različnih referenčnih modelih/arhitekturah podjetij (Berrah in drugi, 2000).

Računalniški strokovnjaki so podrobneje obravnavali podatke kot vmesnik med fizičnimi/materialnimi aspekti podjetja na eni strani in sprejemanjem odločitev na drugi strani. Pri tem so bili prepričani, da z boljšo organizacijo velike količine podatkov lahko zagotovijo boljšo organizacijo podjetja. Pri tem so razvili številne modele, kot so:

- modeli na osnovi entitet in povezav med njimi (podatkovni vidik)

- modeli SADT: podrobneje obravnava funkcije v podjetju (aktivnosti, operacije)
- objektno-orientirani modeli: predstavitev različnih aspektov informacijske kompleksnosti (podatki, funkcije, čas) z objekti in hierarhijo objektov
- modeli na osnovi agentov: obravnavajo decentralizirane adaptivne in kompleksne sisteme.

Naslednji poskus modeliranja podjetij je bil razvit iz ekonomskega in upravljalškega (management) pogleda na podjetje. Če se računalniška teorija koncentrira na obdelavo in predstavitev podatkov, potem se ekonomska stroka posveča oceni stroškov posameznih operacij, aktivnosti in funkcij. Tako so ekonomisti obravnavali učinkovitost podjetja zgolj skozi optiko stroškov in drugih ekonomskih aktivnosti (npr. *ABC costing*, *ABC management*).

Tehnični pogled na podjetje vključno s pojavom koncepta CIM sta predstavljala osnovo za nove pristope k modeliranju funkcijskih, strukturnih in vedenjskih vidikov podjetja. Modele, ki so bili razviti na tej osnovi, združuje dejstvo, da na različne načine povezujejo regulacijske, organizacijske in informacijske vidike v podjetju. Tipične referenčne arhitekture na tej osnovi so:

- CIMOSA
- GRAI, GRAI/GIM
- PERA
- GERAM
- ARIS

V nadaljevanju so posamezne arhitekture podrobneje predstavljene.

6.1 CIMOSA

Referenčna arhitektura CIMOSA (angl. *Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture*) je odprt sistem, ki podpira opis podjetja od poslovnega do procesnega nivoja. CIMOSA določa modelirno ogrodje, modelirni jezik za modeliranje podjetja in infrastrukturo za integracijo podjetja. Pokriva funkcijske, informacijske, organizacijske aspekte podjetja kot tudi področje virov na različnih nivojih podjetja na podlagi natančnega procesnega modela. Ogrodje modeliranja CIMOSA je določeno s trodimenzionalno strukturo, ki jo določajo dimenzije generičnosti, modeliranja in pogleda (Gradišar in Mušič, 2006).

6.2 GRAI in GRAI/GIM

Metoda GRAI se osredotoča na področje sprejemanja odločitev v podjetju (Chen in drugi, 1997). V poznejši fazi razvoja je bila razširjena tudi na ostale aspekte (funkcijske, informacijske, organizacijske), ki jih srečamo pod imenom metoda GRAI/GIM.

Življenjski cikel po metodologiji GRAI/GIM zajema pet faz:

- analizo
- splošno načrtovanje
- podrobno tehnično načrtovanje
- izvedbo
- uporabo

Prvi del življenjskega cikla rešitve predstavljata fazi analize in načrtovanja, ki sta na višjem nivoju abstrakcije in je namenjen opisu sistema skozi zahteve uporabnika. V teh dveh fazah načrtovalec obdela problem s štirih pogledov: s funkcionalnega, fizičnega, odločitvenega in informacijskega. Drugi del v življenjskem ciklu predstavlja podrobne tehnične specifikacije in izvedbo le-teh, ki potekajo na nižji stopnji abstrakcije. Pri modeliranju posameznega pogleda izdelamo model v ustrezni metodologiji, pri čemer izbiramo med naslednjimi:

- za funkcionalni opis se uporablja metodologija IDEF0,
- za informacijski model metoda GRAI,
- za odločitveni model lahko izbiramo med GRAI/GRID, GRAI/NET ali ECO/GRAI.

6.3 PERA

Osnova metodologije PERA (angl. *Purdue Enterprise Reference Architecture*) je PURDUE referenčni model, njegovo metodologijo pa sestavljata dva dela: glavni načrt in arhitektura PERA. PERA opisuje podjetje z vidika proizvodnje, informacij in vidika človeških virov in določa postopke od izvedbe študije do razgradnje. Metodologija PERA pristopa k reševanju problematike CIM z vidika človeških virov, proizvodnega vidika, vidika sistema vodenja ter informacijskega sistema.

Bistvo postopka PERA je izdelava glavnega načrta, ki pokriva dve fazi življenjskega cikla:

- izdelava izvedljivostne študije,
- določitev vlog, zahtev, funkcij in procesov.

Uporaba metodologije PERA je smiselna ob zelo velikih postavitvah in ob velikem številu vpletenih projektantskih ekip.

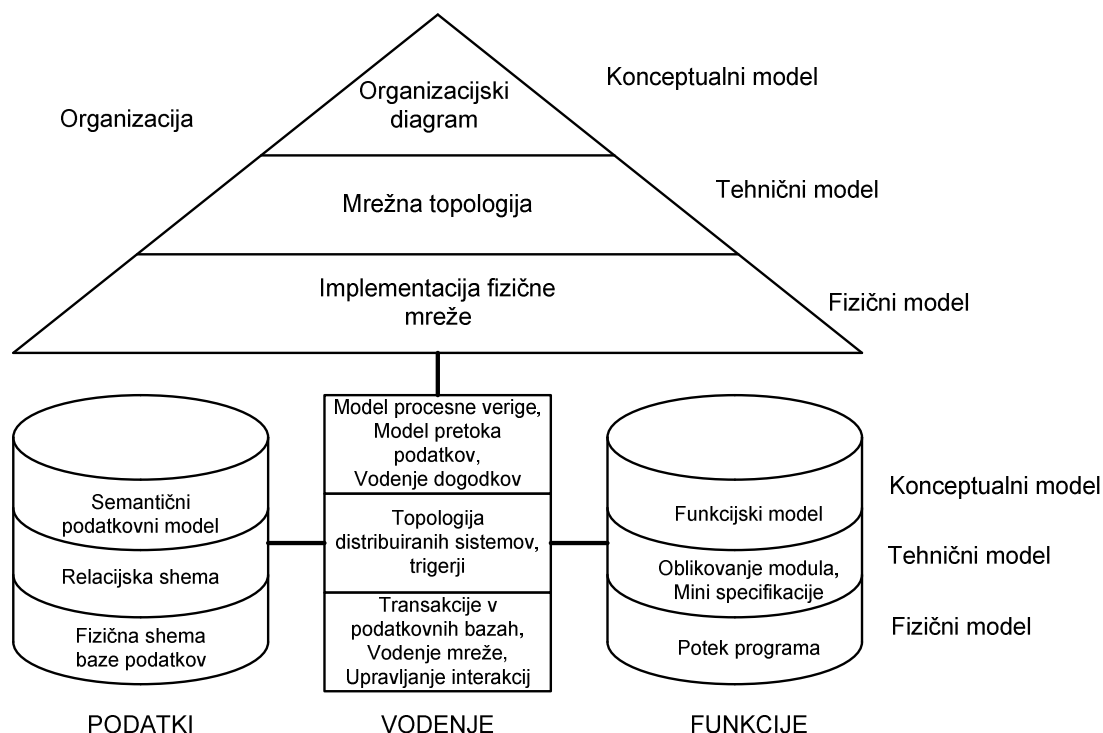
6.4 GERAM – krovni koncept modeliranja

GERAM (angl. *Generalized Enterprise Reference Architecture and Methodology*) je splošna referenčna arhitektura za integracijo podjetja, ki vključuje prejšnje tri referenčne arhitekture: CIMOSA, GRAI/GIM in PERA. GERAM matrični model je bil

izdelan s kombiniranjem značilnih karakteristik vsakega od zgoraj navedenih arhitektur v en diagram. V teh metodologijah so znanja s področij industrijskega načrtovanja, organizacijskih znanosti, vodenja sistemov, komunikacij ter informacijske tehnologije. Te smernice se uporablja tako za reševanje širših kot delnih problemov načrtovanja informacijskih sistemov. Krovni koncept GERAM nam omogoča, da glede na specifičnost danega problema izberemo ustrezno metodologijo, saj ni vsaka idealna za reševanje vsakega problema (Bernus, 1999).

6.5 ARIS

Arhitektura ARIS (angl. *Architecture of Integrated Information Systems*) se osredotoča na izdelavo informacijskega sistema podjetja. Vsebuje arhitekturo, v okviru katere so funkcijski, organizacijski, podatkovni ter kontrolni vidiki deležni enakovredne obravnave skozi celoten proces izdelave (slika 6-1). Metodologijo ARIS uporabljajo tudi prej opisane arhitekture, kot je npr. PERA. ARIS se osredotoča na fazo analize in definicije potreb v času postavitve poslovnega informacijskega sistema in ne na samo izvajanje poslovnih procesov (ARIS, 2009).



Slika 6-1: Arhitektura ARIS

6.6 Ostale metodologije

6.6.1 Sistemi MES

Sistemi MES pokrivajo funkcije proizvodnega nivoja, predvsem pomagajo v procesih sprejemanja odločitev v proizvodnji in povezujejo proizvodno in poslovno okolje, ki sta po naravi zelo različni (glej poglavje 3.3).

6.6.2 Standard ISA-95

Standard ANSI/ISA-S95 (ISA, 2000) obravnava standardizacijo povezav sistemov vodenja in sistemov MES. Določen je z modeli in terminologijo, ki se uporablja za označevanje informacij, ki jih je potrebno izmenjevati. Informacije so strukturirane z modeli UML in služijo za osnovo pri razvoju standardnih vmesnikov med sistemi MES in sistemi ERP. Razvijalci sistemov MES uporabljajo ta standard kot vodilo pri definiranju uporabniških zahtev in kot osnovo za razvoj sistemov MES in njihovih podatkovnih zbirk (Gradišar in Mušič, 2006).

6.7 Modeliranje proizvodnih procesov v podjetju

Modeliranje proizvodnih procesov predstavlja le en segment v celotni arhitekturi modeliranja podjetja. Že v začetnih poglavjih smo obravnavali organizacijske, informacijske in upravljalne funkcije v podjetju, ki so nadalje v procesih modeliranja in optimizacije podjetij združene v celoto. Pri modeliranju proizvodnih procesov se soočamo s funkcijskimi, z organizacijskimi in s podatkovnimi strukturami, katere mora model obsegati, da lahko v polnosti opiše proizvodne procese.

7. Model proizvodnje

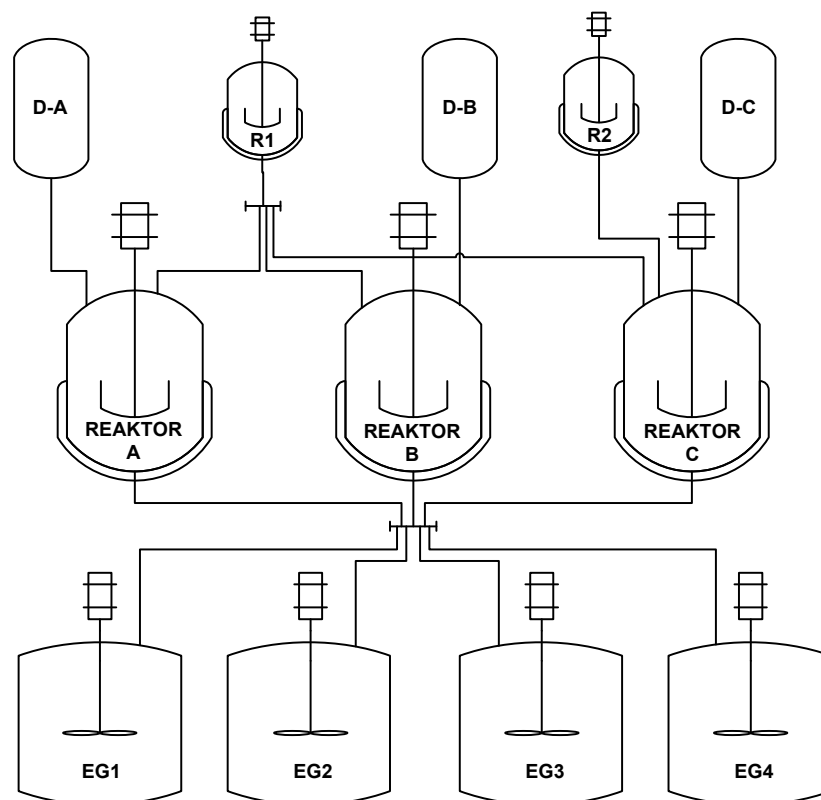
pPI-ji so bili na Odseku za sisteme in vodenje prvič obravnavani v magistrskem delu Zasnova sistema uravnoteženih kazalnikov za podporo vodenju proizvodnje (Zorzut, 2004). V delu smo najprej naredili pregled literature in definirali splošni nabor kazalnikov za proizvodni nivo vodenja, temu pa je sledila obravnava informacijskih potreb za podjetje Goriške opekarne, d. d. Definirali smo pet skupin kazalnikov, ki so temeljili na izraženih potrebah vodje proizvodnje, vendar do dejanske implementacije sistema pPI-jev ni prišlo, saj podjetje ni razpolagalo s *proizvodnim informacijskim sistemom* (PIS), ki bi zagotavljal potrebne proizvodne podatke za izračun kazalnikov. Pri nadaljnjem razvoju sistema pPI smo iskali druge strateške partnerje in se tako odločili za podjetje Mitol, d. o. o., ki proizvaja lepila in polimerne ter akrilatne emulzije. Šaržni proces za proizvodnjo emulzij v obratu polimerizacije je predstavnik šaržno orientirane proizvodnje, v kateri je produktivnost v veliki meri odvisna od kakovosti surovin in kakovosti sistema za vodenje proizvodnje. Instalirani DCS (ang. *Distributed Control System*) in SCADA (angl. *Supervisory Control And Data Acquisition*) sistemi obravnavajo varnostne, regulacijske in nadzorne funkcije kolikor toliko uspešno, vendar pogosto neenakomerna kakovost surovin, spremljajoče kemijske reakcije, izpad proizvodnje zaradi okvar, podaljšanje operacij zaradi neoptimalnih delovnih pogojev ali zaradi proizvodnje neserijskega izdelka, preklopni časi pri prehodu proizvodnje z enega izdelka na drugega in razhajanje med dejansko in planirano proizvodnjo povzročajo nihanje v kakovosti in trajanju posamezne šarže, kar je vzrok za neoptimalno delovanje celotnega proizvodnega procesa. Poleg tega je v podjetju vzpostavljena povezava s poslovnim informacijskim sistemom Navision Manufacturing, ki omogoča prenos nekaterih proizvodnih podatkov (realizirane količine izdelkov, začetek, konec, trajanje šarž, itd.) v bazo podatkov v poslovnem sistemu in hkrati prenos delovnih nalogov s poslovnega sistema v nadzorni sistem, kjer se v nadaljevanju realizirajo.

Metodologija vodenja proizvodnje na osnovi pPI-jev obravnava vse vidike vodenja proizvodnje, tako tehnološke kot tudi ekonomske, in potrebuje podatke z vseh področij proizvodnje za njihovo izračunavanje. Obstoječa informacijska podprtost proizvodnje tega ne zagotavlja, podjetje pa v tej fazi ne namerava posodabljeti PIS, tako da bi bilo

omogočeno zbiranje vseh potrebnih proizvodnih podatkov. Zato smo se odločili za izgradnjo proceduralnega modela tehnološkega procesa, ki bo za potrebe izračunavanja kazalnikov opisoval tehnološki proces in bo hkrati tudi omogočal nadaljnje testiranje možnosti zaprtozančnega vodenja proizvodnje z uporabo pPI-jev. Prednost uporabe modela je tudi izvajanje eksperimentov, s katerimi lahko preizkušamo različne načine vodenja proizvodnje, ki jih v normalni proizvodni situaciji ne bi bilo možno preizkusiti. Z modelom je mogoče definirati tudi optimalno področje delovanja glede na stroške proizvodnje in začetne referenčne vrednosti za pPI-je. Preden pa predstavimo model proizvodnje, si podrobneje pogledjmo tehnološki proces.

7.1 Opis tehnološkega procesa za proizvodnjo polimernih emulzij

Proizvodnja emulzij v obratu polimerizacija poteka na štirih reaktorjih, med katerimi se na prvih treh reaktorjih proizvajajo homopolimerne in kopolimerne emulzije, na zadnjem reaktorju pa se proizvajajo akrilatne emulzije. Slednje vsebujejo akrilatne smole, ki se močno vpijajo v reaktor, tako da le-ta ob normalnem pranju ni primeren za proizvodnjo ostalih emulzij. Zaradi poenostavitve ta reaktor ni vključen v model tehnološkega procesa.



Slika 7-1: Poenostavljena tehnološka shema procesa za proizvodnjo polimernih emulzij

Modeliran tehnološki proces tako sestoji iz naslednje osnovne opreme:

- trije glavnih reaktorji R-A, R-B in R-C: v njih poteka proces polimerizacije
- dva pomožna reaktorja R1 in R2 za pripravo zaščitnih koloidov
- dozirne posode D-A, D-B in D-C za pripravo ustrezne količine in v določenih primerih tudi mešanice monomerov
- štirje egalizatorji EG1, EG2, EG3 in EG4 za egalizacijo in umerjanje produktov
- shranjevalne posode za surovine (CZ1 do CZ11) in končne izdelke (C1 do C5)
- sistem za vakumiranje, ki si ga delijo vsi reaktorji
- sistem za ogrevanje in hlajenje reaktorjev in kondenzatorjev.

Poenostavljeno tehnološko shemo procesa prikazuje slika 7-1.

7.1.1 Opis tehnološkega postopka za izdelavo homopolimernih emulzij

Homopolimerne emulzije (MEKOLIT H, HB, H45 in H55) dobimo s polimerizacijo monomera vinil acetata (VAC). Za vse vrste homopolimernih emulzij velja enak tehnološki postopek, izdelava se razlikuje samo v količinah surovin in v tipu zaščitnega koloida (polivinil alkohola – PVOH).

Proizvodni postopek:

Priprava surovin: Priprava surovin se lahko prične takrat, ko je zagotovljeno, da se bodo surovine v nadaljevanju proizvodnega procesa tudi porabile (načrpan monomer v dozirni posodi predstavlja potencialno nevarnost, saj je visoko vnetljiva snov). Monomer VAC se prečrpa iz vkopane skladiščne cisterne v dozirno posodo D-A, D-B ali D-C, odvisno od reaktorja, na katerem se bo reakcija izvajala. Zaščitni koloid se pripravi v enem od pomožnih reaktorjev R1 ali R2. Najprej se v pomožni reaktor načrpa voda, kateri se ročno doda alkohol v trdnem agregatnem stanju in protipenilec. Vse skupaj se nato segreje na 85 °C, to temperaturo pa se vzdržuje še od 0.5 do 1 uro, nakar sledi ohlajanje zaščitnega koloida.

Šaržiranje začetne polnitve v reaktor in začetek reakcije: Ko so surovine pripravljene, se v glavni reaktor (R-A, R-B ali R-C) načrpa začetno polnitev vode in raztopino alkohola. Nato se doda začetno količino monomera in iniciatorja KPS, temu sledi zapiranje reaktorja in ogrevanje s toplo vodo, vse dokler temperatura v reaktorju ne doseže 60 °C, kar traja približno eno uro. Tedaj se pretok tople vode v plašč reaktorja ustavi, vendar se zaradi preostale tople vode v plašču reaktorja temperatura v reaktorju povzpne vse do 72 °C. Tukaj se endotermna faza reakcije zaključi in prične se eksotermna faza, ko se toplota med reakcijo sprošča.

Vzdrževanje in zaključek reakcije: Eksotermna faza reakcije se vzdržuje s konstantnim dotokom monomera v reaktor, pri čemer je zelo pomembno, da je temperatura v reaktorju konstantno v območju med 70 in 85 °C. Med to fazo iz reaktorja izhaja uparjeni monomer, ki se v kondenzatorju nad reaktorjem prisilno hladi in se utekočinjen vrača v reaktor. Ko operater opazi, da temperatura v reaktorju upada, doda iniciator in

tako spodbudi reakcijo, v primeru, da temperatura v reaktorju preseže zgornjo mejo, pa v ključni hlajenje reaktorja. Potem ko je celotna količina monomera bila dodana v reaktor (ta postopek traja okrog 5 ur), se v reaktor doda še nekaj iniciatorja, kar spodbudi reakcijo in temperatura naraste na 90 °C v približno eni uri. Konec reakcije zaznamo z upadom temperature v reaktorju, vendar v emulziji ostane od 0.5 do 1 % nezreagiranega monomera. Ta preostali monomer se odstranjuje, tako da se s pomočjo vakumske črpalke iz reaktorja izsesava mešanica zraka in monomera, nakar se monomer v kondenzatorju utekočini in uporabi v naslednji šarži, ki se izdeluje v tem reaktorju. Opisani postopek vakumiranja, ki traja od 2 do 3 ure, hkrati ohlaja emulzijo. Končna koncentracija monomera v emulziji mora biti pod 0.2 %. Za končno ohlajanje emulzije se uporabi hladna voda in na koncu se emulzijo konzervira z dodajanjem biocida. Ko se reaktor odpre, se vzame vzorec in preveri viskoznost in delež trdne snovi v emulziji. Na podlagi izmerjenih parametrov emulzije se oceni kakovost izdelka in izračuna potrebno količino vode, ki jo je potrebno dodati emulziji. Izdelek se nato prečrpa v egalizator, kjer se navadno premešajo tri šarže enakega izdelka in se izvede končno umerjanje izdelka.

Glavni pokazatelj kakovosti izdelka je porazdelitev velikosti delcev v emulziji, ki pa se dejansko izvaja v povprečju enkrat mesečno ali v primeru slabe šarže. Meritve se izvajajo izven podjetja in dejansko le takrat, ko je z izdelki nekaj narobe ali v primeru izpopolnjevanja tehnološkega postopka.

7.1.2 Opis tehnološkega postopka za izdelavo kopolimernih emulzij

Kopolimerne emulzije se za razliko od homopolimernih emulzij pridobivajo s procesom polimerizacije dveh vrst monomerov, in sicer monomerov vinil acetatov (VAC) in dibutil maleatov (DBM). Tehnološki postopek je zelo podoben postopku za izdelavo homopolimernih emulzij, glavna razlika pa nastopa v procesu polimerizacije, kjer temperatura konstantno narašča od 68 °C do 75 °C.

7.2 Namen, funkcije in poenostavitve modela proizvodnega procesa

Model proizvodnega procesa smo gradili z namenom, da bi čim bolj verodostojno opisali tisto dogajanje v proizvodnem procesu, ki bistveno vpliva na kakovost izdelkov, stroškovno učinkovitost in produktivnost proizvodnje in opustili tiste dele procesa, ki samo povečujejo kompleksnost modela in nimajo večjega vpliva na opisane vidike proizvodnje.

Pri modeliranju proizvodnega procesa polimerizacija smo upoštevali naslednje zahteve:

- Model predstavlja proizvodni proces in njegove aktivnosti, kot jih lahko vidimo s proizvodnega nivoja vodenja.

- Model vključuje postopkovno vodenje procesov, tako da je možna analiza zasedenosti virov, masnega pretoka surovin in izdelkov skozi proizvodni proces, temperaturnih prehodov med samo reakcijo, itd.
- Model ovrednoti vpliv kakovosti surovin, zastojev, kakovosti procesa, itd. na kakovost končnega izdelka, stroške proizvodnje ter čas izdelave posamezne šarže.
- Model omogoča preučevanje zasedenosti proizvodnih kapacitet in vpliv razvrstitve šarž in drugih opravil v proizvodnji na produktivnost, stroške proizvodnje, itd.
- Z modelom je možno preučevati različne režime delovanja (pospešena, normalna ali upočasnjena proizvodnja, kar se sklada s sezonskim delom) in njihov vpliv na proizvodne stroške, kakovost izdelkov in produktivnost.
- Grafični uporabniški vmesnik GUI modela je zasnovan, tako da med samim simulacijskim tekom omogoča vplivanje na potek proizvodnega procesa (dodajanje opravil, spreminjanje parametrov in razvrstitev opravil, itd.) kot pregledovanje proizvodnih podatkov in njihovih derivatov, npr. pPI-jev.
- Proizvodni podatki se med simulacijo shranjujejo v globalne spremenljivke Matlab-a, ki imajo enako strukturo kot jo ima podatkovna baza za končno shranjevanje proizvodnih podatkov; ti podatki pa so hkrati dosegljivi uporabniku modela med samim simulacijskim tekom.
- Model je poenostavljen do te mere, da so v izvajanju vključeni samo definirani scenariji obnašanja, saj bi z modeliranjem izrednih dogodkov obseg modela močno narasel.
- Model je namenjen preučevanju doprinosa, ki bi ga prinesla implementacija sistema za podporo vodenju proizvodnje kot tudi spremembe kapacitet posameznih naprav.

Poleg tega smo v procesu modeliranja sprejeli tudi poenostavitve, med katerimi so bile najbolj pomembne naslednje:

- Model ne vsebuje matematičnega modela kemične reakcije v reaktorju, saj je proces polimerizacije kompleksen in v strokovni literaturi obstajajo samo parcialne rešitve te problematike. Struktura modela omogoča zamenjavo poenostavljenega modela reaktorja z ustreznim matematičnim modelom reaktorja v prihodnosti, če bi takšen matematični model kdaj razvili.
- Modeliranje kakovosti izdelkov je bilo izvedeno zgolj na podlagi ekspertnega znanja tehnologov in vodje proizvodnje, saj v podjetju ne razpolagajo z zadostnimi podatki o kakovosti posameznih šarž.
- Stroškovni model proizvodnje temelji na letnih ocenah stroškov za posamezni izdelek. Stroški proizvodnje so definirani na podlagi fiksnih in variabilnih stroškov proizvodnje.
- Zastoji v proizvodnji so definirani na podlagi izkušenj tehnologov in drugih zaposlenih, saj ne obstaja sistematično beleženje zastojev in njihovega trajanja.

7.3 Izbira simulacijskega orodja

Pri izbiri orodja za modeliranje in simulacijo proizvodnih procesov v procesni industriji je potrebno zagotoviti naslednje kriterije:

- Možna izdelava matematičnega modela zveznega procesa, ki ga opišemo s sistemom diferencialnih enačb.
- Možno modeliranje obnašanja reaktivnih sistemov, ki jih opisujemo s teorijo končnih avtomatov (postopkovno vodenje procesov).
- Simulacijsko razvojno okolje mora omogočati povezljivost s podatkovnimi bazami in z drugimi sistemi, tako da je možna izmenjava in obdelava podatkov o proizvodnem procesu med samim simulacijskim tekom. To pomeni, da je možen dinamičen vnos podatkov o tem, kaj se bo v proizvodnem procesu izvajalo in kako, med samim simulacijskim tekom.
- Simulacijsko okolje nudi možnost izdelave ustreznega grafičnega uporabniškega vmesnika GUI, s katerim je možno spremljati in voditi proizvodni proces med samim simulacijskim tekom, analizirati in pregledovati proizvodne podatke, izračunavati in prikazovati pPI-je, itd.

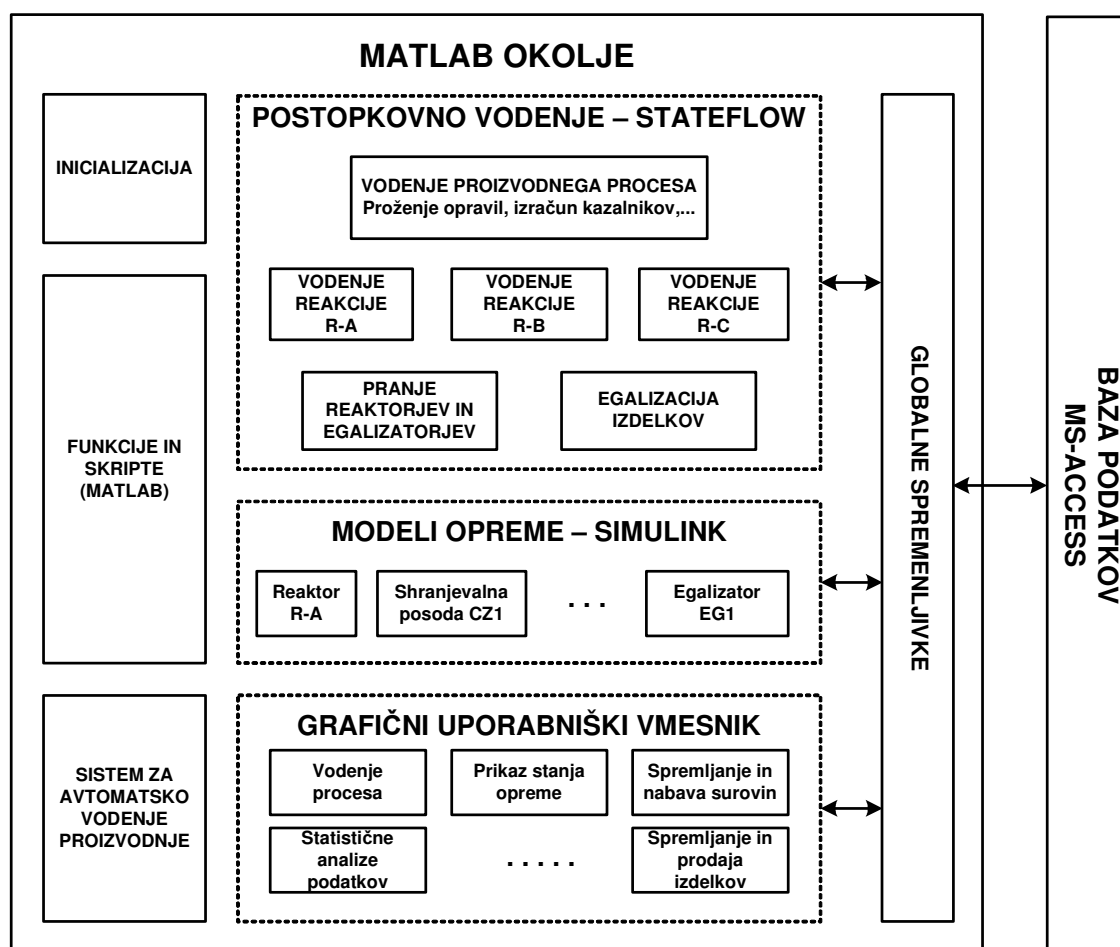
Pri pregledovanju ponudbe simulacijskih orodij smo dobili seznam simulacijskih orodij (Rizoli, 2006), vendar je možno le nekatera med njimi testno preizkusiti. Veliko je splošnih simulacijskih paketov kot tudi paketov za simulacijo sistemov na podlagi teorije diskretnih dogodkov, ki so v zadnjem času doživela precejšen razmah, vendar so uporabna predvsem za simulacijo proizvodnih procesov v kosovni industriji. Obstajajo tudi orodja za simulacijo zveznih procesov, npr. gPROMS in ModelEnterprise, ki smo jih na Odseku za sisteme in vodenje na IJS tudi preizkusili, vendar je njihova osnovna slabost ta, da uporabnik modelira proces zgolj v okviru predvidene strukture. Poleg tega so simulacijski podatki dosegljivi šele po končanem simulacijskem teku, kar pa je zelo velika omejitev. Tudi integracija dodatnega vmesnika za analizo in prikaz proizvodnih podatkov in kazalnikov ni mogoča, možen je le izvoz simulacijskih podatkov iz modela. Simulacija celotne proizvodnje z več reaktorji bi bila zelo kompleksna in časovno potratna, tako da smo ocenili, da za naš primer ni uporabna.

Za namen te doktorske disertacije, v okviru razpoložljivih finančnih sredstev in znanja o razpoložljivih komercialnih orodjih za modeliranje proizvodnih procesov nam ta orodja po večini niso bila dosegljiva ali pa so funkcije modela proizvodnje presegale nabor funkcij, ki jih komercialna orodja podpirajo. Zato smo model proizvodnega procesa razvili v akademsko dobro poznanem in sprejetem splošno namenskem simulacijskem okolju Matlab/Simulink/Stateflow. Simulirane podatke smo shranjevali v MS Access podatkovni bazi, tako da so na voljo tudi za poznejše analize in poizvedovanja.

7.4 Struktura modela proizvodnega obrata Polimerizacija v Mitolu

Pri izgradnji proceduralnega modela za proizvodni proces polimerizacije v Mitolu smo uporabljali enake koncepte, kot jih uporabljajo inženirji pri razvoju sistemov za vodenje in nadzor procesov. Proizvodnja sestoji iz opreme, ki se upravlja s pomočjo kontrolnih signalov in aktuatorjev, stanje opreme in produkta, ki se v tehnološkem procesu izdeluje, se spremlja preko merjenih fizikalnih veličin. Oprema se povezuje v osnovne proizvodne enote, kot so reaktorji, egalizatorji in skladiščne cisterne. Nadalje se te enote povezuje v proizvodno celoto z ustreznim sistemom za vodenje in nadzor procesov.

Slika 7-2 podaja osnovno strukturo modela, s katerim smo modelirali vodenje proizvodnje v obratu Polimerizacija v Mitolu. Najosnovnejši gradniki modela proizvodnje so v Simulinku zgrajeni osnovni modeli proizvodnih enot, kot so skladiščne cisterne, reaktorji, dozirne posode in egalizatorji (na sliki 7-2 blok *Modeli opreme - Simulink*). Postopkovno vodenje procesov je izvedeno s Stateflow diagrami (blok *Postopkovno vodenje - Stateflow*), ki za svoje delovanje uporabljajo različne skripte in



Slika 7-2: Struktura modela proizvodnje v obratu Polimerizacija v Mitolu

funkcije, ki smo jih napisali v Matlab-u (blok *Funkcije in skripte*). Izmenjava podatkov med Matlab-om, Simulink-om in Stateflow diagrami poteka med drugim s pomočjo globalnih spremenljivk. Grafični uporabniški vmesnik črpa podatke iz globalnih spremenljivk in vpliva na model s spreminjanjem parametrov v nekaterih kontrolnih blokih v Simulink-u in s kontrolnimi signali, ki so definirani z globalnimi spremenljivkami.

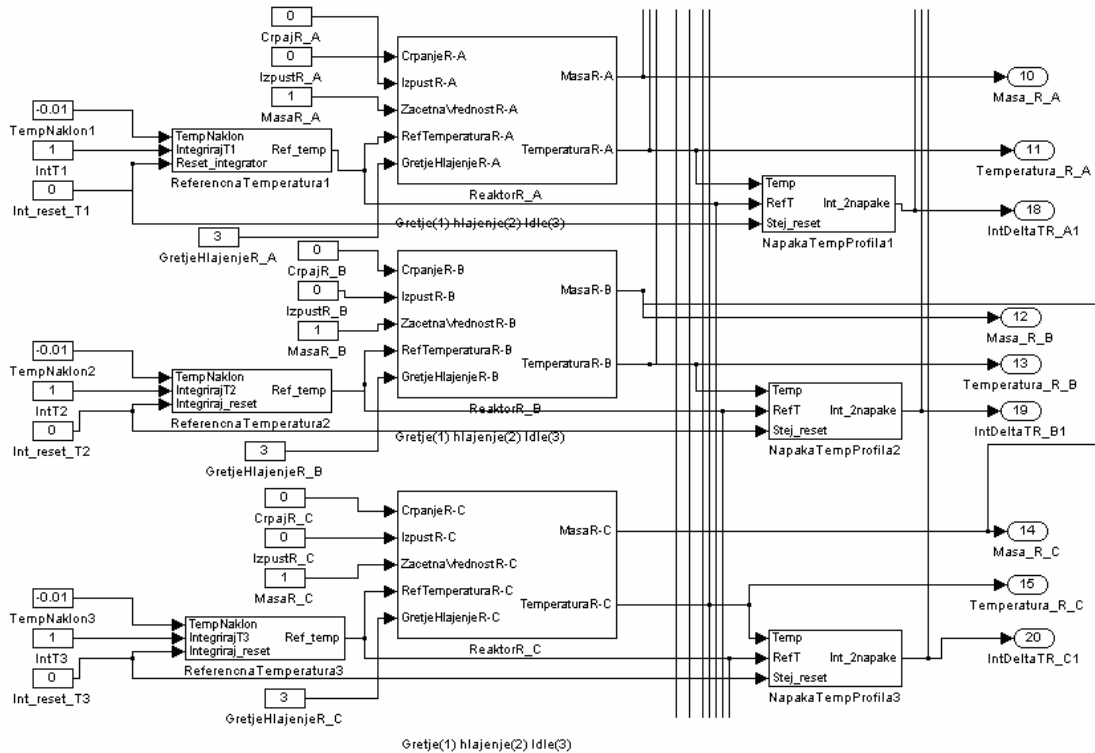
Na začetku simulacijskega teka je potrebno izvesti inicializacijo (blok *Inicializacija*), ki poskrbi za definicijo vseh potrebnih globalnih spremenljivk, za prepis osnovnih podatkov iz baze podatkov MS Access v globalne spremenljivke z enako strukturo, kot jo imajo tabele v bazi podatkov in za postavitev začetnih vrednosti parametrov nekaterih blokov v Simulinku. Poleg tega smo definirali tudi testni sistem za zaprtozančno vodenje proizvodnje, ki je realiziran v Matlab-u z vpoglednima tabelama in s prediktivnim regulatorjem na osnovi matematičnega modela procesa. Priporočila, ki jih ta sistem daje, se upoštevajo, če je zaprtozančno vodenje aktivirano. Sistem za avtomatsko vodenje proizvodnje se lahko med samim simulacijskim tekom vklaplja in izklaplja.

7.5 Osnovni modeli proizvodnih enot

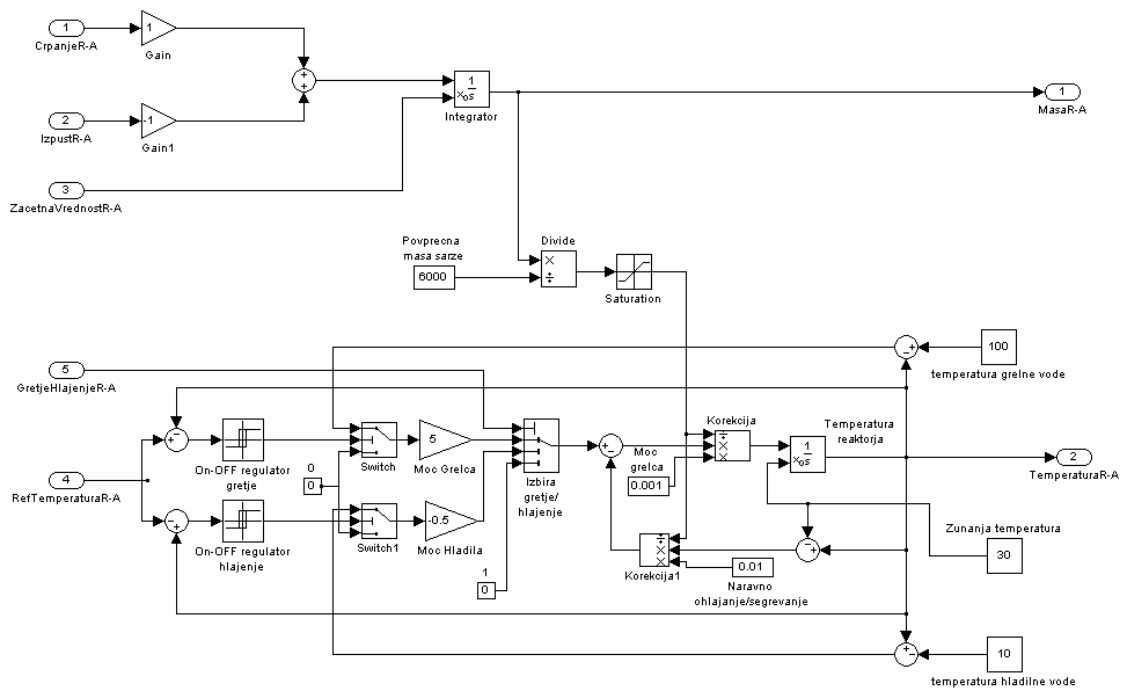
Osnovni modeli proizvodnih enot imajo kontrolne signale za upravljanje naprav (npr. črpanje, izpust, gretje, hlajenje itd.) in signale, ki prikazujejo stanje naprave (masa reagenta v napravi, temperatura v reaktorju, itd.). Primere modelov reaktorjev in kontrolnih signalov za te reaktorje prikazuje slika 7-3.

Model reaktorja R-A prikazuje slika 7-4. Modeliran je masni pretok, masa in temperatura reagenta v reaktorju. Model vsebuje tudi regulator temperature, s katerim upravljamo temperaturo reaktorja na želeno vrednost, saj model ne vsebuje matematičnega opisa kemične reakcije, ki bi dejansko posnemal potek temperature v reaktorju. Na temperaturo v reaktorju so nadalje vezani postopki vodenja procesa, zato se mora njihov potek ustrezno ujemati z dejanskim temperaturnim potekom v reaktorju. Pri modeliranju naprav proizvodnje nismo modelirali cevi, črpalk, kolektorjev, itd., kar predstavlja določeno poenostavitev modela, ki pa je za namen modela sprejemljiva.

V Matlab-u smo sprogramirali sklop funkcij in skript, ki so potrebne v postopkih vodenja procesov ter za branje, obdelavo in pisanje podatkov v bazo podatkov. Posamezni deli modela so med seboj povezani s kontrolnimi in podatkovnimi signali v obliki globalnih spremenljivk, upravljanje teh spremenljivk pa je izvedeno preko s-funkcij za vpis in branje vrednosti v te/iz teh spremenljivk. Poleg tega smo razvili GUI, preko katerega je možno spremljati potek in voditi proizvodni proces, pregledovati proizvodne podatke in analizirati potek pPI-jev.



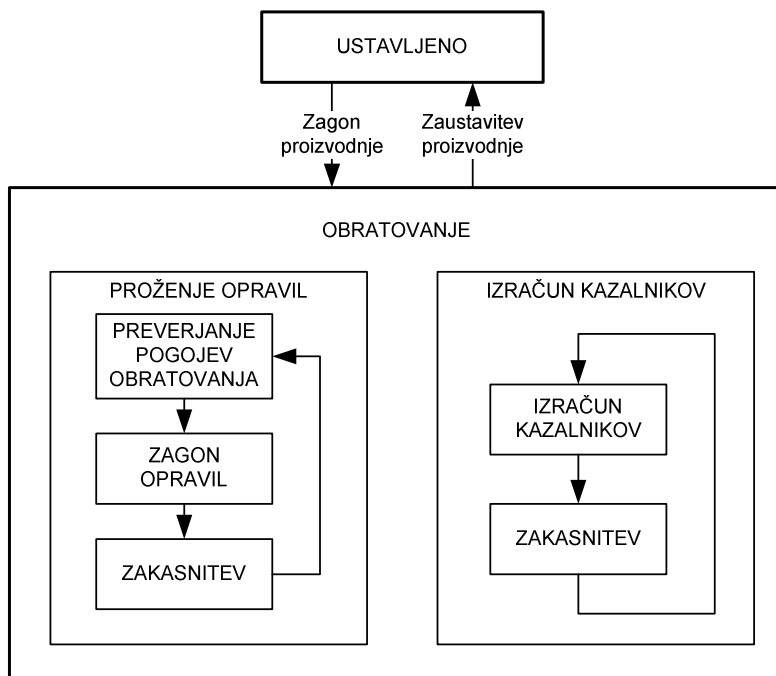
Slika 7-3: Prikaz modelov reaktorjev R-A, R-B in R-C s kontrolnimi signali in nekaj dodatne opreme



Slika 7-4: Model reaktorja R-A: zgornji del modela vsebuje integrator, s katerim modeliramo masni pretok skozi reaktor, spodnji del modela pa je uporabljen za modeliranje temperature reagenta v reaktorju

7.6 Postopkovno vodenje proizvodnega procesa

Vodenje proizvodnje na najvišjem nivoju pomeni razvrstiti opravila (delovni nalogi, itd.) v takšno zaporedje, da bodo zadovoljeni roki za izdelavo predvidenih količin izdelkov, da bo kakovost izdelkov ustrezala predpisanim ali pričakovanim kriterijem kakovosti in da bodo stroški proizvodnje čim nižji ali v skladu s planom. Ena od osnovnih zahtev modela je avtomatsko izvajanje predpisanega nabora opravil med simulacijskim tekom, zato smo definirali skupek pravil, ki določajo, kdaj se lahko določeno opravilo prične izvajati. Algoritem za proženje opravil pregleduje in proži opravila sekvenčno s časovnim korakom, ki je nastavljen. Po preteku časovnega koraka algoritem pregleda n zaporednih opravil, ki čakajo na izvajanje in zažene tista, ki izpolnjujejo predpisane pogoje. Poleg tega se na tem nivoju vodenja nahaja tudi izračun in vrednotenje pPI-jev in nabava surovin, kar prikazuje slika 7-5. Proizvodnja preide iz stanja *Ustavljeno* v nadstanje *Obratovanje* z ukazom *Zagon proizvodnje*. Nadstanje *Obratovanje* vsebuje stanje *Proženje opravil*, ki je zadolženo za sekvenčno proženje opravil, ki se lahko prične izvajati in za nakup tistih surovin, katerih količina pade pod predpisano spodnjo mejo. Drugo stanje *Izračun kazalnikov* je zadolženo za sekvenčno izračunavanje pPI-jev. Proizvodnja preide iz nadstanja *Obratovanje* v stanje *Ustavljeno* z ukazom *Zaustavitev proizvodnje* in ob pogoju, da se nobeno opravilo ne nahaja v fazi izvajanja.



Slika 7-5: Postopkovno vodenje proizvodnje na najvišjem nivoju

7.6.1 Vrste opravil

Na proizvodnjo izdelkov v podjetju vplivajo:

- povpraševanje na trgu po določenem izdelku,
- vzdrževanje minimalnih zalog osnovnih izdelkov,
- plan proizvodnje,
- razpoložljivost virov (proizvodne kapacitete, delovna sila, surovine, energija).

Da bi lahko zadovoljili vsem naštetim robnim pogojem, je potrebno dobro poznavanje proizvodnega procesa, ustrezno razvrstiti opravila v proizvodnji (pogosto menjavanje izdelkov na reaktorjih vnaša zakasnitve, povečuje stroške zaradi dodatnih pranj reaktorjev, mešanja izdelkov zaradi ostankov prejšnjih šarž v cevovodih, itd.) in prilagajati hitrost proizvodnje. Zahteve trga se velikokrat spreminjajo iz dneva v dan in zaradi velike časovne konstante procesa (trajanje šarže je okrog 15 ur) je težko vnaprej narediti dober raspored dela. Takšna nihanja je možno zmanjšati le z dobro razvrstitvijo opravil in z zadostnimi zalogami najbolj prodajanih izdelkov.

Opravila imajo naslednje parametre:

- številka opravila
- status opravila
- vrsta opravila
- instanca opravila
- hitrost izvajanja
- reaktor
- reaktor Rx
- egalizator
- začetek izvajanja
- konec izvajanja
- trajanje opravila
- strošek opravila
- čas prehoda

V modelu smo definirali naslednje vrste opravil:

- izvajanje šarže (vrsta 1 in 2)
- egalizacija izdelka (vrsta 10)
- pranje reaktorja (vrsta 20)
- pranje egalizatorja (vrsta 21)
- zamenjava kakovosti surovin (vrsta 30).

7.6.1.1 Izvajanje šarže

S tem pravilom definiramo izvajanje šarže točno določenega izdelka, ki ga določata vrsta in instanca recepta:

Vrsta recepta: določa vrsto izdelka, ki se izdeluje na reaktorju.

1 – homopolimeri

2 – kopolimeri

Izdelki enake vrste imajo enak proizvodni postopek, med seboj pa se razlikujejo po vrstah in količinah uporabljenih surovin.

Instanca recepta: določa tip izdelka za določeno vrsto izdelka:

vrsta 1, instanca 1 – MEKOLIT HB

vrsta 1, instanca 2 – MEKOLIT H45

vrsta 2, instanca 1 – MEKOLIT KM

Reaktor: določa glavni reaktor (R-A, R-B ali R-C), na katerem se bo izvajala šarža.

Reaktor Rx: določa pomožen reaktor R1 ali R2, v katerem se bo pripravila raztopina alkohola.

Egalizator: določa egalizator (EG1, EG2, EG3 ali EG4), v katerega se bo pretočila zaključena šarža.

Hitrost: določa hitrost, s katero se bo opravilo izvajalo.

Ostali parametri se izračunajo med samim izvajanjem ali ob zaključku opravila in se nato vpišejo v podatkovno bazo.

7.6.1.2 Egalizacija

To je postopek umerjanja do treh šarž enakega tipa izdelka v posebni posodi z mešalom, imenovani egalizator. Izdelku se po opravljeni analizi doda ustrezna količina vode in drugih dodatkov, tako da se doseže predpisane lastnosti izdelka. Izvajanje umerjanja v egalizatorjih omogoča boljšo izkoriščenost reaktorjev, saj se ti uporabljajo zgolj za izvajanje reakcije, z mešanjem več šarž enakega izdelka pa dobimo večjo količino izdelka z enakimi lastnostmi.

Pomen parametrov v opravilu, ki določa egalizacijo izdelka:

Egalizator: določa egalizator, v katerem se bo izvajal postopek egalizacije.

Instanca recepta: določa shranjevalno posodo, v katero se bo izdelek pretočil po končani egalizaciji.

7.6.1.3 Pranje reaktorjev in egalizatorjev

V procesu imamo normalno in generalno pranje reaktorjev in egalizatorjev. Normalno pranje poteka predvsem na reaktorjih R-A, R-B in R-C, ko z ročno tlačno črpalko delavci operejo reaktor, tako da se očisti reaktor emulzije, ki se je v reaktorju pripravljala. To pranje se uporablja med dvema šaržama izdelka enake vrste. Ob koncu delovnega tedna in pri menjavi vrste izdelka pa se naredi generalno pranje reaktorja s posebno napravo za visokotlačno čiščenje reaktorjev, s katerim se odstrani vse obloge v reaktorju. To pranje traja okrog pol ure in predstavlja večji strošek, saj je naprava velik porabnik električne energije in zahteva večje priprave kot normalno pranje reaktorja.

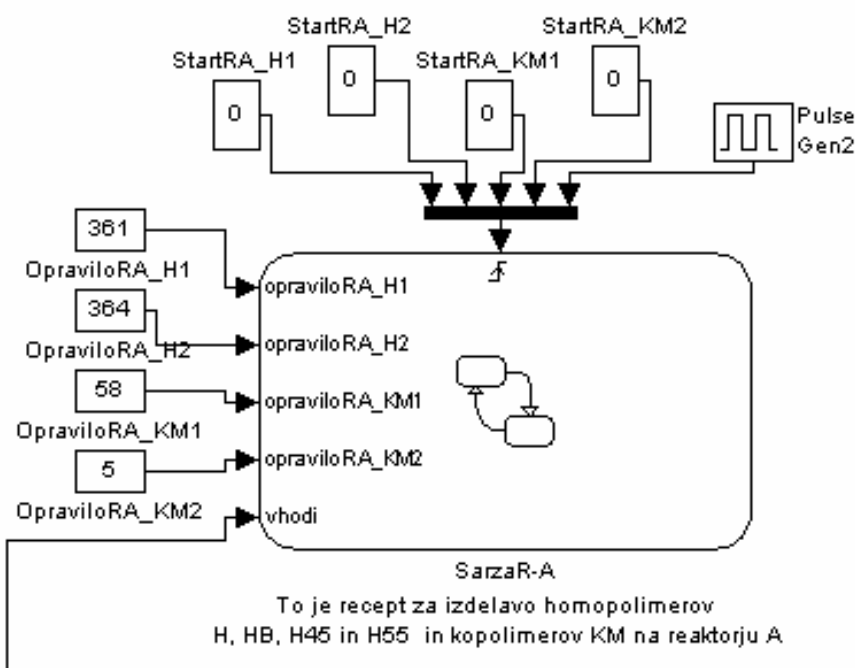
<i>Vrsta recepta:</i>	20 – pranje reaktorjev
	21 – pranje egalizatorjev
<i>Instanca recepta:</i>	1 – normalno pranje s tlačno črpalko
	2 – generalno pranje z visokotlačno črpalko

7.6.1.4 Zamenjava kakovosti surovin

S tem opravilom zamenjamo kakovost surovin. Uporabljamo ga pri izpeljavi eksperimentov, v katerih preučujemo vpliv kakovosti surovin na potek in stroške proizvodnje ter kakovost izdelkov.

7.6.2 Razvrstitev in proženje opravil

Vsaki vrsti opravila ustreza postopek (slika 7-6), ki ga opisuje ustrezen diagram



Slika 7-6: Postopek za vodenje šarže na reaktorju R-A

stevilka_opravila	status	vrsta	instanca	hitrost	reaktor	reaktorRx	egalizator	stevilka	stevilka_sin	stroski	zacetek	konec	trajanje	t_prehodni	t_prehodni_zac
1	3	30	1	1	1	1	1	0	1	000 EUR	21308	21311	3	0	0
2	3	1	1	1	1	1	1	1	1	648.033 EUR	21917	84408	62491	540	21311
3	3	1	2	1	2	2	2	2	1	431.598 EUR	23125	84520	61395	540	22519
4	3	2	1	0.5	3	2	3	3	1	567.151 EUR	32185	106388	74203	1054.8	30975
5	3	10	1	1.3	1	1	1	0	1	100.000 EUR	85337	92354	7017	205.56	84731
6	3	20	2	1.3	1	1	1	0	1	30.000 EUR	86545	88348	1803	205.56	85939
7	3	1	1	1.3	1	1	4	6	1	646.214 EUR	89961	146282	57321	231.12	88355
8	3	1	2	0.5	2	1	2	4	1	431.460 EUR	35205	153666	118461	1054.8	33995
9	3	2	1	0.5	3	2	3	5	1	566.971 EUR	43057	177344	134287	1054.8	41847
10	3	10	2	1.3	1	1	2	0	1	100.000 EUR	154797	162938	8141	205.56	154191
11	3	20	2	1.3	2	1	1	0	1	30.000 EUR	156005	157808	1803	205.56	155399
12	3	1	1	1.3	1	1	4	7	1	646.377 EUR	102853	194074	91221	231.12	102247
13	3	1	2	1.3	2	2	1	10	1	429.874 EUR	181373	233020	51647	231.12	180767
14	3	2	1	1.3	3	2	3	8	1	723.381 EUR	109497	224172	114675	231.12	108891
15	3	10	3	2.199	1	1	3	0	1	100.000 EUR	224861	235556	10695	246.82122	224255
16	3	20	2	2.199	3	1	1	0	1	30.000 EUR	226069	227872	1803	246.82122	225463
17	3	1	1	1.3	1	1	4	9	1	646.494 EUR	148757	242932	94175	231.12	148151
18	3	1	2	1.3	2	2	1	11	1	429.833 EUR	189829	283252	93423	231.12	189223
19	3	2	1	2.199	3	1	2	12	1	723.854 EUR	228485	281774	53289	313.84244	227879
20	3	10	1	3.031	1	1	4	0	1	100.000 EUR	243585	255354	11769	358.41442	242979
21	3	20	2	3.031	1	1	1	0	1	30.000 EUR	244793	246596	1803	358.41442	244187
22	3	1	1	15243	1	1	3	15	1	648.224 EUR	285885	365098	79233	1029.7529	284655
23	3	1	2	3.031	2	2	1	13	1	430.444 EUR	235129	337290	102161	536.82883	234523
24	3	2	1	3.031	3	1	2	14	1	724.720 EUR	238753	333100	94347	536.82883	238147
25	3	10	2	2.985	1	1	1	0	1	100.000 EUR	338413	348402	9989	515.19727	337807
26	3	20	2	2.985	2	1	1	0	1	30.000 EUR	339621	341424	1803	515.19727	339015
27	3	1	1	15243	1	2	4	16	1	648.090 EUR	288469	435808	149339	1029.7529	285259
28	3	1	2	2.985	2	1	2	18	1	431.026 EUR	342641	418640	73999	850.39454	341431
29	3	2	1	15541	3	1	3	17	1	725.529 EUR	300361	398934	98573	999.14085	299151

Slika 7-7: Razvrstitev opravil v tabeli Sarze v bazi podatkov Access

prehajanja stanj (primer prikazuje slika 7-8) in je v modelu realiziran s stateflow diagramom (primer takšnega diagrama prikazuje slika 7-9). Razvrstitev opravil opravi vodja proizvodnje, ko jih vpiše v podatkovno bazo v tabelo *Opravila*. Primer razvrstitve opravil prikazuje slika 7-7. Razvrstitev in parametre opravil je možno spreminjati tudi med samim simulacijskim tekom preko GUI-ja s pomočjo ukazov za premik in spreminjanje opravil, opravila pa se lahko tudi dodaja in odstranjuje.

7.6.2.1 Status opravila

Status opravila lahko zavzame naslednje vrednosti:

- 1: čaka na izvajanje,
- 2: v izvajanju,
- 3: zaključeno,
- 4: priprava na izvajanje.

Status čaka na izvajanje

Opravilo s tem statusom čaka, da ga sistem za proženje opravil zažene. To je privzeto stanje, ki ga opravilo zavzame pri vnosu v tabelo *Opravila*.

Status priprava na izvajanje

Status *priprava na izvajanje* smo dodali zaradi boljšega opisovanja razmer v času, ko je proizvodnja manjša (v zimskem in spomladanskem času). Tedaj so prehodni časi med šaržami večji, saj je časa za izvajanje šarž dovolj in tako se na začetku in na koncu šarže pojavljajo zakasnitve, ki jih s tem stanjem lažje opišemo. Iz statusa opravil, ki jih sistem za proženje opravil pregleduje, je možno razbrati, kateri viri so ali bodo zasedeni, prav

tako velja tudi za postopke, ki so potrebni za izvajanje opravil. Zato postopek, ki določa šaržo, lahko pridobi status *priprava na izvajanje*, če:

- je reaktor, na katerem se bo šarža izvajala, prost oziroma so izpolnjeni pogoji za pričetek priprave surovin za to šaržo (vemo, da je šarža, ki se pripravlja v reaktorju, dobra, tako da bo reaktor v kratkem razpoložljiv),
- je kateri od pomožnih reaktorjev za pripravo raztopine alkohola R1 ali R2 prost,
- pred to šaržo ni nobenega generalnega pranja reaktorja,
- pred to šaržo ni opravila *egalizacija* za egalizator, v katerega se bo pretočila šarža, ki ima status *čaka na izvajanje* ali *v izvajanju*,
- je za izdelavo opravila dovolj časa (predvidena zaustavitev proizvodnje).

Sistem za proženje opravil tedaj izračuna prehodni čas, rezervira reaktor za pripravo alkoholne emulzije (R1 ali R2) in spremeni status opravila na 4 – *priprava na izvajanje*. Podobno velja tudi za opravila *Egalizacija* in *Pranje reaktorjev/egalizatorjev*.

Status v izvajanju

Sistem za proženje opravil spremeni status opravila iz *priprava na izvajanje* v *v izvajanju* po preteku prehodnega časa. Tedaj se aktivira postopek za izvajanje opravila v Simulinku. Slika 7-6 prikazuje takšen postopek za izvajanje šarže na reaktorju R-A.

Status zaključeno

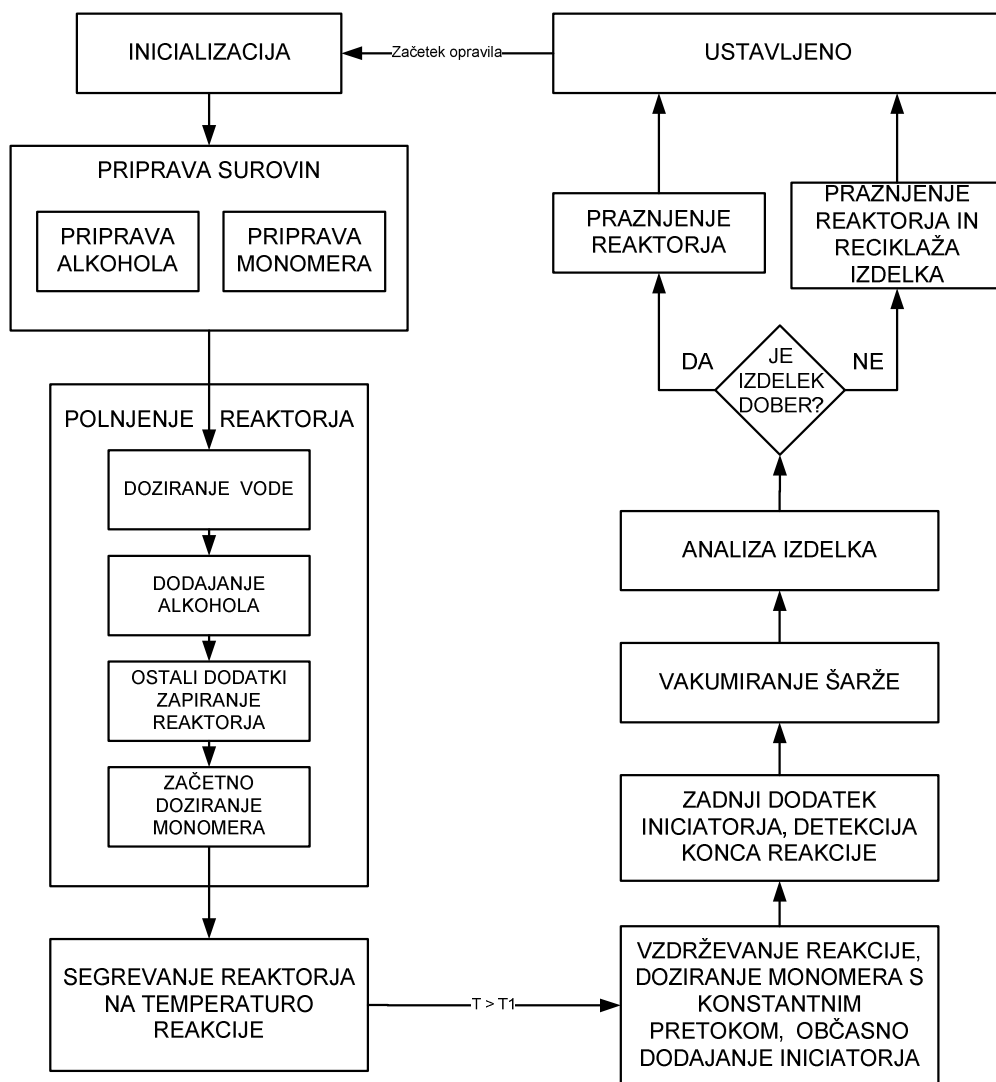
Status zaključeno pove, da je bilo opravilo uspešno zaključeno. Takšno opravilo vsebuje vse podatke o začetku, trajanju, zaključku izvajanja opravila, stroških opravila, itd.

7.6.3 Postopek izvajanja šarže

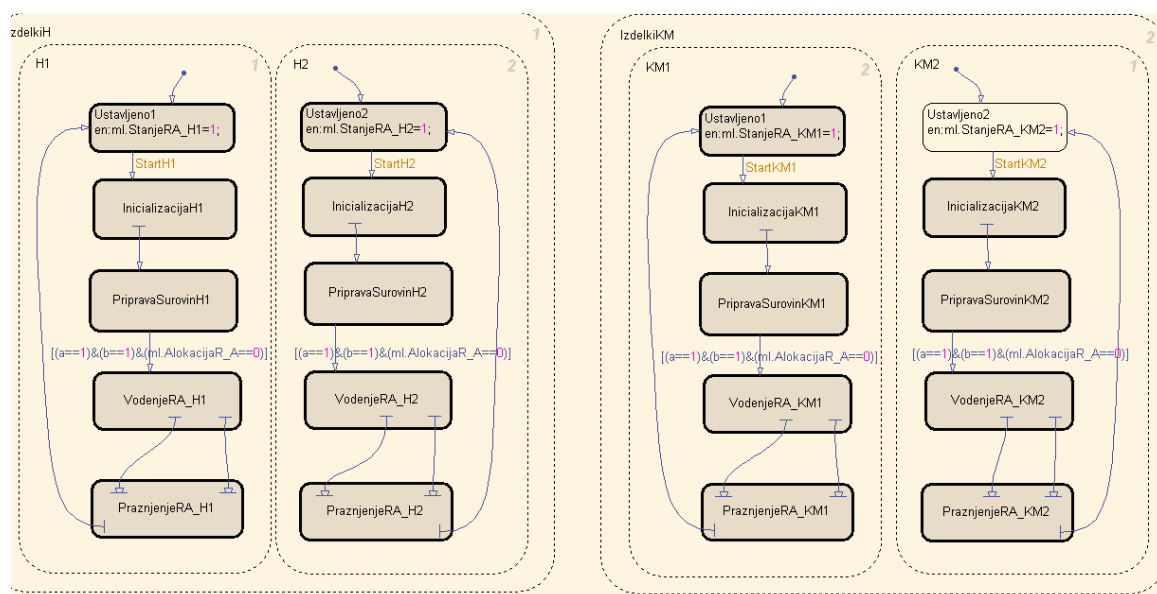
Poenostavljen diagram prehajanja stanj za izvajanje šarže v procesu polimerizacije prikazuje slika 7-8 in je sestavljen iz naslednjih korakov:

- priprava surovin,
- polnjenje reaktorja,
- segrevanje reaktorja,
- reakcija (doziranje monomera in iniciatorja),
- zaključek reakcije,
- postopek vakumiranja,
- analiza proizvedene šarže in praznjenje reaktorja.

V primeru, da proizvedena šarža ne dosega predpisanih kriterijev kakovosti, je potrebna reciklaža šarže, ki se izvede tako, da se izdelek prečrpa v katero od prostih posod (cisterna, reaktor, egalizator) in se nato vmešava v naslednje šarže. To vnaša v proizvodnjo dodatne zakasnitve, delo in posledično tudi stroške. V primeru, da je izdelek popolnoma neuporaben, se ga v celoti zavrže. Slika 7-9 prikazuje stateflow diagram, s katerim je realiziran postopek izvajanja šarže.



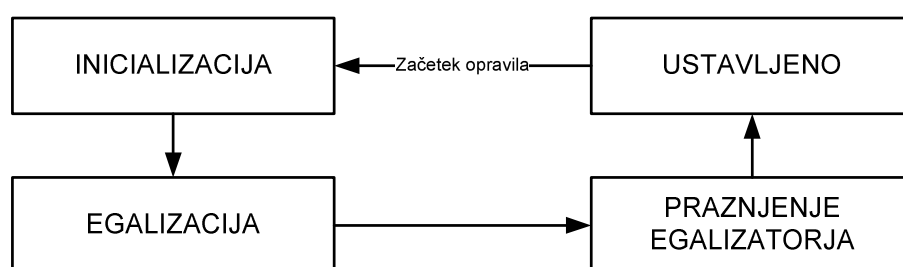
Slika 7-8: Diagram prehajanja stanj za postopek *izvajanje šarže* na enem od glavnih reaktorjev R-A, R-B ali R-C v obratu polimerizacija



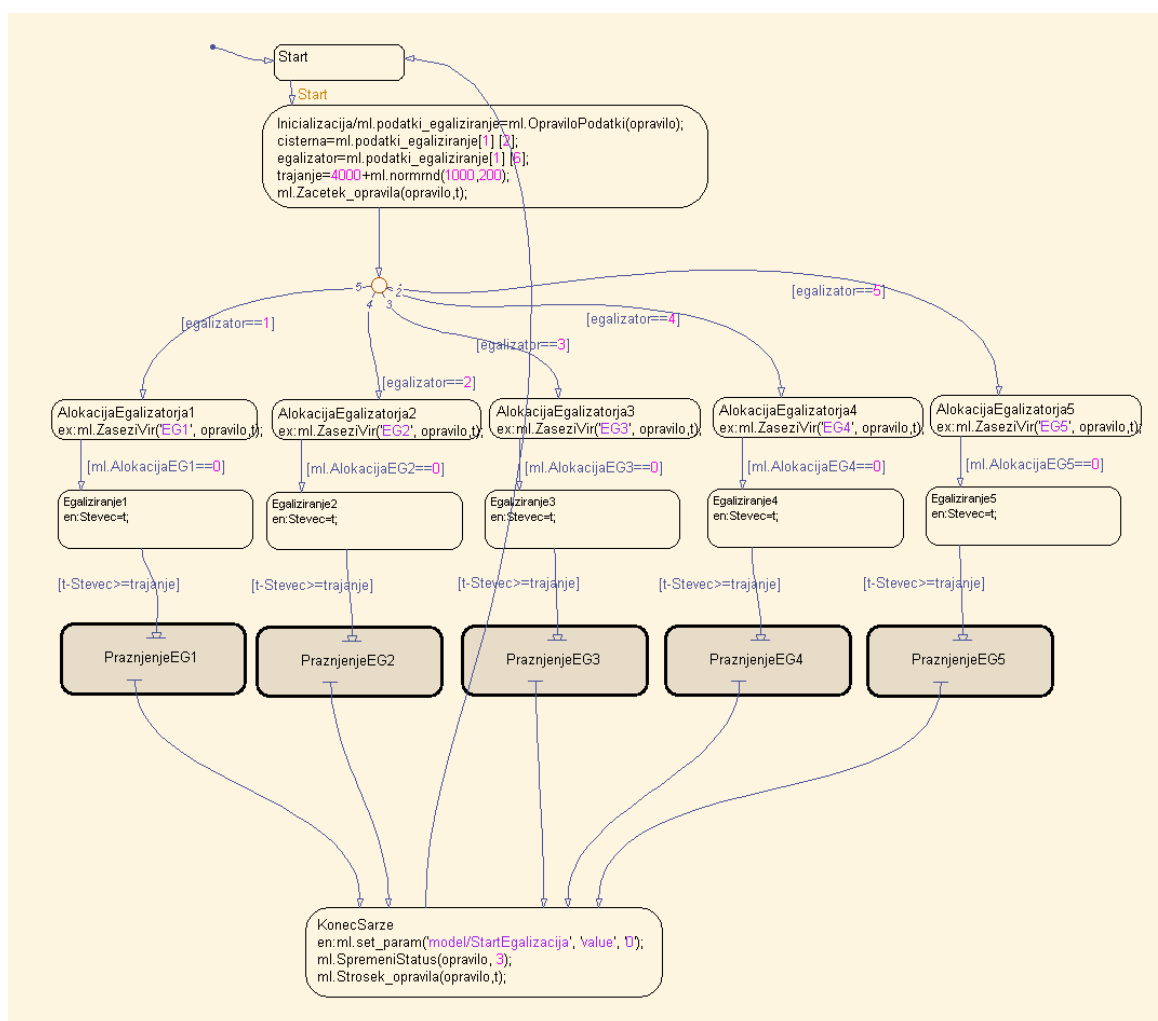
Slika 7-9: Koda za postopkovno vodenje postopka *izvajanje šarže* v orodjarni Stateflow

7.6.4 Postopek egalizacije

Postopek egalizacije se začne tako, da se izdelek v egalizatorju najprej dobro premeša, nato se v primeru prevelike viskoznosti doda voda in izdelek še enkrat premeša. Sledi prečrpavanje izdelka preko filtra v skladiščno cisterno ali avtocisterno. Diagram prehajanja stanj za postopek egalizacije prikazuje slika 7-10, realizacijo tega diagrama v orodjarni Stateflow pa slika 7-11.

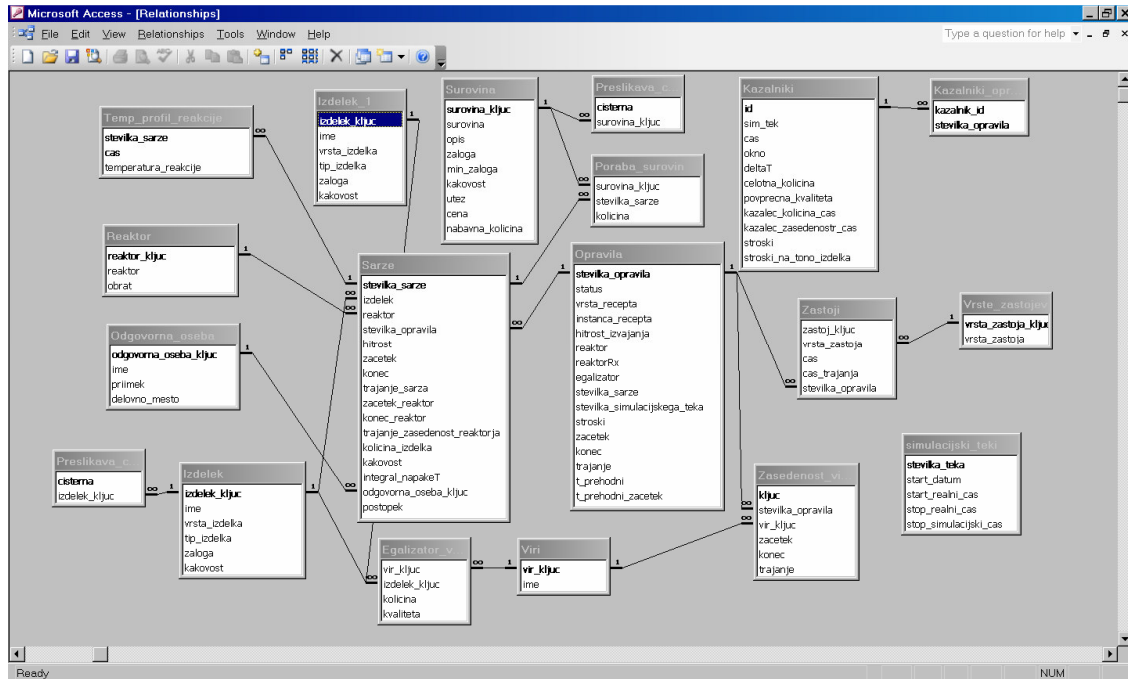


Slika 7-10: Diagram prehajanja stanj za postopek egalizacije



Slika 7-11: Koda za postopkovno vodenje postopka egalizacije v orodjarni Stateflow

7.7 Podatkovni model proizvodnje

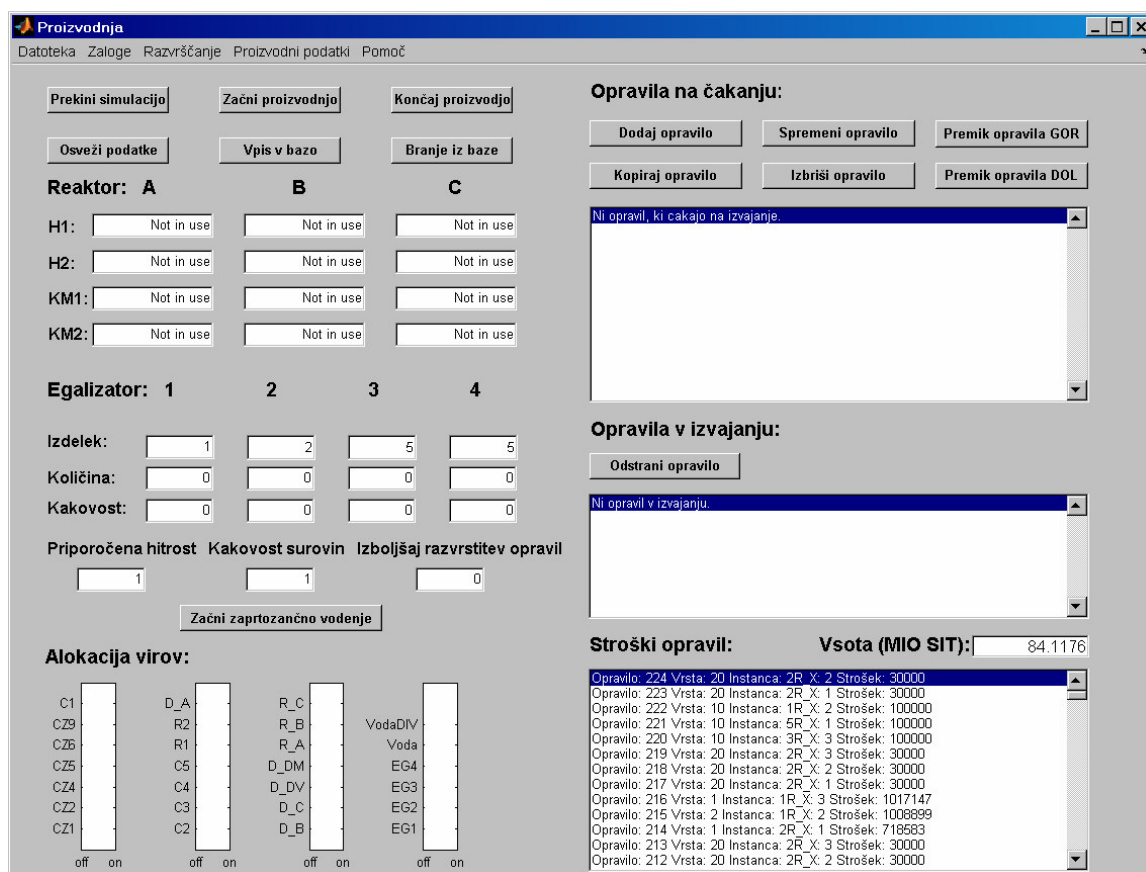


Slika 7-12: Relacije med tabelami podatkovne baze v MS Access, v kateri se shranjujejo proizvodni podatki

Za uspešno upravljanje proizvodnih podatkov smo razvili tudi entitetno-relacijski podatkovni model, ki nam omogoča shranjevanje in poznejše analiziranje proizvodnih podatkov. Slika 7-12 prikazuje realizacijo takšnega modela v podatkovni bazi MS Access.

7.8 Grafični uporabniški vmesnik GUI

Grafični uporabniški vmesnik je sestavni del modela proizvodnje. Omogoča nam nadzor nad potekom proizvodnega procesa v času simulacije, spreminjanje zaporeda opravil (plana dela), pregledovanje različnih zgodovinskih in trenutnih podatkov o proizvodnji, kazalnikov pPI, itd. Slika 7-12 prikazuje osnovno okno GUI-ja.



Slika 7-13: Grafični uporabniški vmesnik GUI za model proizvodnega procesa Polimerizacija

7.9 Modeliranje preostalih delov procesa

Ocene nekaterih lastnosti procesa in končnih produktov so izpeljane na podlagi statističnih analiz procesnih podatkov in na podlagi ekspertnega znanja o tehnoloških procesih, ki ga imajo operaterji, tehnologi in vodja proizvodnje.

7.9.1 Alokacija in spremljanje zasedenosti virov

Ker se v proizvodnji lahko izvaja več šarž istočasno in si reaktorji delijo določene naprave, je bilo potrebno modelirati tudi alokacijo virov in uvesti potreben sistem, s katerim zagotovimo, da samo en postopek lahko zaseže določen vir. V postopkovnem vodenju procesa pred zaseganjem vira preverimo, ali je vir prost, in šele nato ta vir zasežemo. Model alokacije virov nima čakalnih vrst in ne dodeljuje virov glede na prioriteto.

7.9.2 Zastoji v proizvodnji

V modelu proizvodnega procesa smo definirali naslednje zastoje:

- ročni vnos alkohola v trdnem stanju v pomožni reaktor pri pripravi alkoholne emulzije,

- ročni dodatki in zapiranje reaktorja pred začetkom postopka polimerizacije,
- izpad sistema za ogrevanje glavnega reaktorja,
- zasedenost ali izpad sistema za vakumiranje,
- zastoj pri izvajanju kontrole kakovosti izdelka po končani šarži,
- izpad filtra pri filtriranju šarže.

Njihova pogostost je definirana z verjetnostjo, ki je odvisna od pogostosti nastopanja zastoja v dejanski proizvodnji. S povečano hitrostjo proizvodnje se izvaja več opravil hkrati, kar vodi v večjo obremenitev delovne sile in opreme, krajšanje izdelovalnih časov posameznih operacij in s tem povečevanje možnosti za zastoje. Zato so verjetnosti za zastoje povečujejo s povečevanjem hitrosti proizvodnje.

7.9.3 Modeliranje kakovosti izdelka

Proizvodni podatki, s katerimi smo razpolagali v procesu modeliranja proizvodnje, niso obsegali meritev kakovosti posamezne šarže, saj je edini pravi pokazatelj kakovosti proizvedene šarže porazdelitev velikosti delcev (verig) polimerov v emulziji. Te meritve se izvajajo vzorčno na zunanji instituciji, tako da je natančna statistična analiza podatkov bila nemogoča.

Posredni indikatorji ustreznosti so viskoznost izdelka in preostala suha snov v izdelku, ki pa se merijo v egizatorjih, ko se v njih nahaja mešanica do treh šarž določenega izdelka, tako da neposredna analiza korelacije med kakovostjo proizvodnega procesa in viskoznostjo izdelka ni bila možna.

V modelu proizvodnje imajo vpliv na kakovost izdelka naslednji parametri:

- kakovosti surovin,
- število šarž od zadnjega pranja reaktorja,
- hitrosti proizvodnje,
- kakovosti regulacije temperature v času reakcije,
- število zastojev, ki se pojavijo med proizvodnjo posamezne šarže.

Produkt normaliziranih faktorjev, ki podajajo prej navedene parametre, ki vplivajo na končno kakovost izdelka, nam podaja kakovost posamezne šarže Q_K , kot to podaja enačba (7.1):

$$Q_K = q_{KS} \cdot q_R \cdot q_H \cdot q_{RT} \cdot q_Z \quad (7.1)$$

Parameter vpliv kakovosti surovin q_{KS} izračunamo kot povprečno vrednost kakovosti posameznih surovin q_i , ki so pomnožene z utežnimi faktorji k_i , kot to podaja enačba (7.2). n predstavlja število surovin, ki so uporabljene pri izdelavi izdelka. Vsaka surovina ima svoj utežnostni faktor k_i , tako da lahko razlikujemo med surovinami z različnimi vplivi na kakovost končnega produkta.

$$q_{KS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_i q_i \quad (7.2)$$

Normaliziran faktor, ki definira *vpliv čistoče reaktorja* q_R , ocenimo s pomočjo enačbe (7.3), kjer n predstavlja število šarž, ki so se izdelale v reaktorju od zadnjega pranja reaktorja. V primeru zamenjave izdelka, ki se izdeluje v določenem reaktorju, je potrebno temeljito očistiti reaktor in cevovode, tako da se prepreči vpliv takšne zamenjave na kakovost izdelka. Izbira ustreznega postopka čiščenja je upoštevana na nivoju razvrščanja opravil kot omejitev procesa.

$$q_R = (1 + 0.02)^{-n} \quad (7.3)$$

S povečevanjem hitrosti proizvodnje se posamezne faze proizvodnje skrajšujejo, kot je to npr. faza vakumiranja, ki se izvede po končanem procesu polimerizacije. Z vakumiranjem se odstrani preostali del nezreagiranega monomera v končnem produktu. S povečano hitrostjo proizvodnje se faza vakumiranja krajša in s tem se povečuje delež monomera v končnem produktu in posledično se zmanjšuje kakovost izdelka. Poleg tega se s povečano hitrostjo proizvodnje povečuje število opravil, ki se istočasno izvajajo v proizvodnem procesu, posledično pa se zmanjšujejo zmožnosti operaterjev, da ob pravem času ročno dodajajo iniciator v reaktor, kar se odraža v slabši regulaciji temperature, kar spet vpliva na kakovost končnega produkta. Faktor *vpliva hitrosti proizvodnje* q_H na kakovost izdelka podaja enačba (7.4), kjer normaliziran faktor s_P označuje hitrost proizvodnje.

$$q_H = 1 - s_P \quad (7.4)$$

Kakovost regulacije temperature v reaktorju tudi vpliva na kakovost izdelka, njen vpliv podaja faktor *vpliva regulacije temperature* q_{RT} . Če je regulacija temperature med reakcijo slaba, imamo večja nihanja temperature in posledično se v izdelku povečuje delež večjih delcev, kar podaljšuje čas filtriranja, količino odpadkov in posledično kakovost in stroške proizvodnje. Faktor vpliva regulacije temperature q_{RT} ocenjujemo z enačbo (7.5), kjer odstopanja temperature od želenega temperaturnega profila merimo s pomočjo integrala kvadrata temperaturne razlike. Vrednost integrala primerjamo s pričakovano vrednostjo C , nadalje pa celoten izraz še normaliziramo s pomočjo konstante C_1 . Konstanti C in C_1 sta definirani s pomočjo statistične obdelave podatkov.

$$q_{RT} = 1 + \frac{C - \int (T - T_{REF})^2 dt}{C_1} \quad (7.5)$$

Zastoji v proizvodnji zaposlujejo operaterje in posledično motijo njihovo sposobnost vodenja reakcije ali kako drugače motijo proizvodni proces. Faktor *vpliva zastojev* q_Z je definiran na enak način kot faktor vpliva čistoče reaktorja q_R , le da v tem primeru n pomeni število zastojev v procesu izdelave posamezne šarže.

7.9.4 Stroški proizvodnje

Tabela 7-1: Povprečni stroški za kilogram emulzije za posamezen izdelek za leto 2004 v EUR/kg

TIP IZDELKA	SUROVIN E	AMORTIZA CIJA	DELO	ENERGIJ A	SKUPA J
MEKOLIT KM	0.560	0.024	0.025	0.003	0.613
MEKOLIT HB	0.489	0.019	0.019	0.003	0.530
MEKOLIT H45	0.431	0.019	0.019	0.003	0.472

Stroške proizvodnje lahko v grobem razdelimo na fiksne stroške (amortizacija, delovna sila) in variabilne stroške (stroški surovin, energije, potrošni material, itd.). Na proizvodni strošek kilograma emulzije tako vpliva poleg uporabljenih surovin tudi izkoriščenost virov (oprema, delovna sila, itd.).

Tabela 7-2: Proizvedene količine posameznih tipov izdelkov na reaktorjih R-A, R-B in R-C v obratu polimerizacija za leto 2004

IZDELEK	KOLIČINA (T)
MEKOLIT H	164
MEKOLIT HB	1472
MEKOLIT H45	1125
MEKOLIT H55	231
MEKOLIT KM	2614
OSTALO	124
SKUPAJ	5730

Pri modeliranju stroškov proizvodnje smo razpolagali samo s povprečnimi stroški za kilogram proizvedene emulzije, kot jih prikazuje tabela 7-1 in podatki o celotnih proizvedenih količinah po posameznih tipih izdelkov, kot jih prikazuje tabela 7-2. Tabela 7-3 prikazuje oceno stroškov amortizacije in dela po posameznih vrstah izdelkov za leto 2004. Iz opisanih stroškov smo ocenili celotne fiksne stroške proizvodnje (amortizacija in delo) za kilogram emulzije brez upoštevanja reaktorja R-E, ki proizvaja Mekolit PA. Nadalje smo te stroške preračunali na uro proizvodnje, tako da smo celotne fiksne stroške za eno leto delil z delovnim časom v letu 2004 (tabela 7-4).

Tabela 7-3: Ocena stroškov amortizacije in dela po posameznih vrstah izdelkov za leto 2004

VRSTA IZDELKA	KOLIČINE (t)	AMORTIZACIJA (EUR/kg)	DELO (EUR/kg)	FIKSNI STROŠKI (EUR/kg)
HOMOPOLIMERI	2992	0.024	0.025	0.049
KOPOLIMERI	2614	0.019	0.019	0.038
OSTALO	124	0.025	0.029	0.054
SKUPAJ	5730	0.021	0.023	0.044

Tabela 7-4: Ocena fiksnih stroškov proizvodnje za eno uro proizvodnje za leto 2004

CELOTNI FIKSNI STROŠKI ZA LETO 2004 (EUR)	ŠTEVILO DELOVNIH DNI (DAN)	FIKSNI STROŠEK (EUR/H)
5730000 KG × 0.044 EUR/KG = 252,239.4 EUR	257	40.9

Pri izdelavi posamezne šarže nastopajo tudi variabilni stroški, kot so stroški porabljene energije, surovin, potrošnega materiala (filtri, itd.), čiščenje odplak, itd. Te stroške smo modelirali tako, da smo posameznemu opravilu izračunali dodatne stroške po teh postavkah. Nekatera opravila imajo fiksno postavko (pranje reaktorja, egalizacija), druga pa ne (šarža). Postavke za strošek posameznega opravila so shranjene v podatkovni bazi v tabeli *Stroškovnik*, tako da se stroški proizvodnje upravljajo enotno z enega mesta. Formula za oceno stroškov proizvodnje za določeno obdobje je podana z enačbo (7.6)

$$S = \sum_{i=1}^n S_{ti} + s_c \cdot T_p \quad (7.6)$$

kjer S predstavlja *strošek proizvodnje za dano časovno obdobje*, S_{ti} strošek i -tega opravila, s_c postavko fiksnih stroškov in T_p časovno obdobje.

Pri izračunavanju stroškov proizvodnje za krajše časovno obdobje, npr. 50 ur, prihaja do problema, ker se nekatere šarže ali druga opravila v večji meri izdelujejo izven tega obdobja, stroški in izplen proizvodnje pa se upoštevajo, kot da bi se takšne šarže (opravila) v celoti izvajale v opazovanem časovnem obdobju. Zato je potrebna korekcija izračuna stroška šarže ali drugega opravila. Enačba (7.7) podaja način izračunavanja korigiranega stroška opravila S_{ic} , tako da vpeljemo korekcijski faktor k_i , s katerim pomnožimo strošek opravila S_i . Korekcijski faktor k_i izračunamo kot kvocient *izdelovalnega časa opravila v oknu T_w in celotnega izdelovalnega časa opravila T_i* .

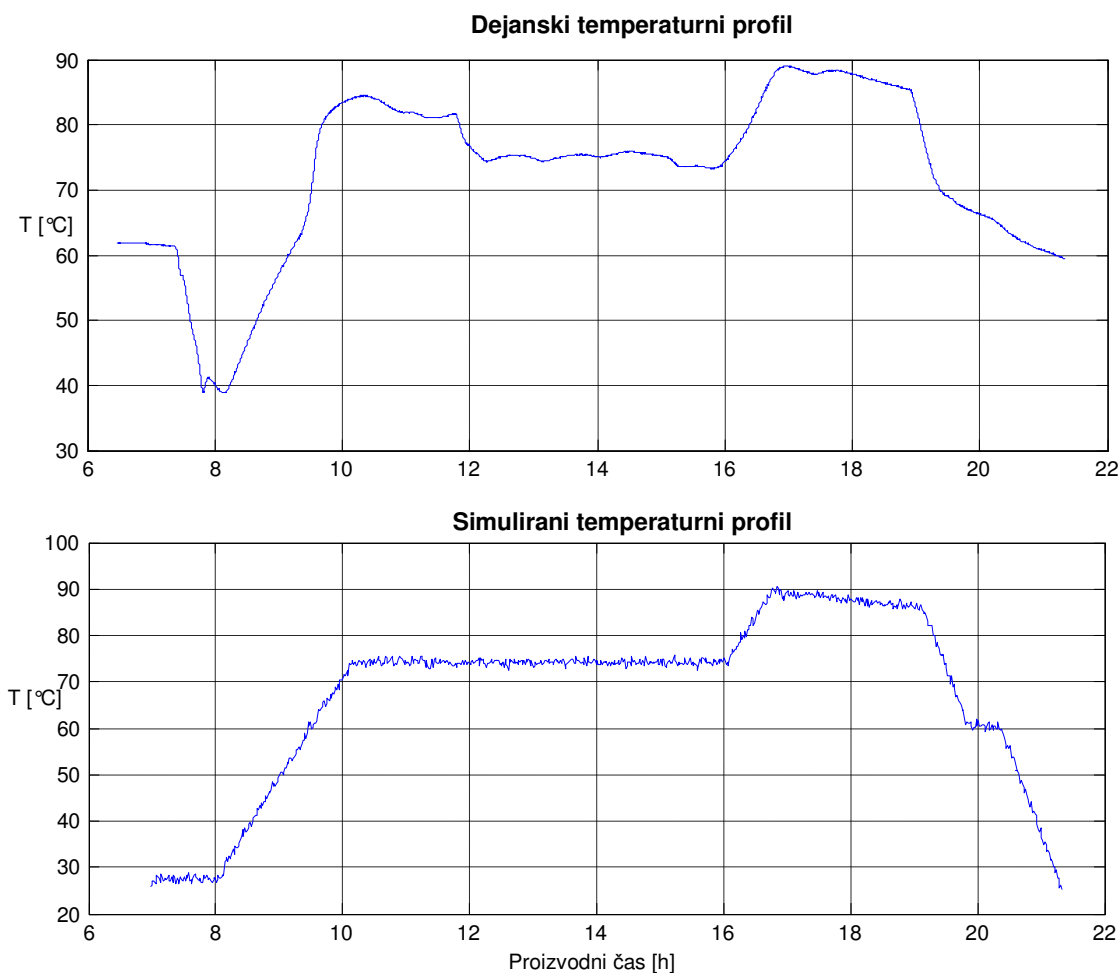
$$S_{ic} = k_i \cdot S_i = \frac{T_w}{T_i} \cdot S_i \quad (7.7)$$

7.10 Verifikacija in validacija modela

Verifikacija modela podaja konsistentnost in natančnost simulacijskega programa glede na ustrezni matematični model procesa. Z verifikacijo preverjamo ustreznost simulacijskega programa. Validacija modela se ukvarja s stopnjo ujemanja med matematičnim opisom in realnim sistemom, ki ga z modelom opisujemo. Validacija modela je odločilen del postopka izdelave simulacijskega modela. Brez validacije je vrednost modela zelo majhna. Osnovni cilj validacije modela naj bo ugotovitev, ali

model dovolj dobro opisuje modelirani sistem oziroma ali so cilji modeliranja doseženi (Hvala in drugi, 2005).

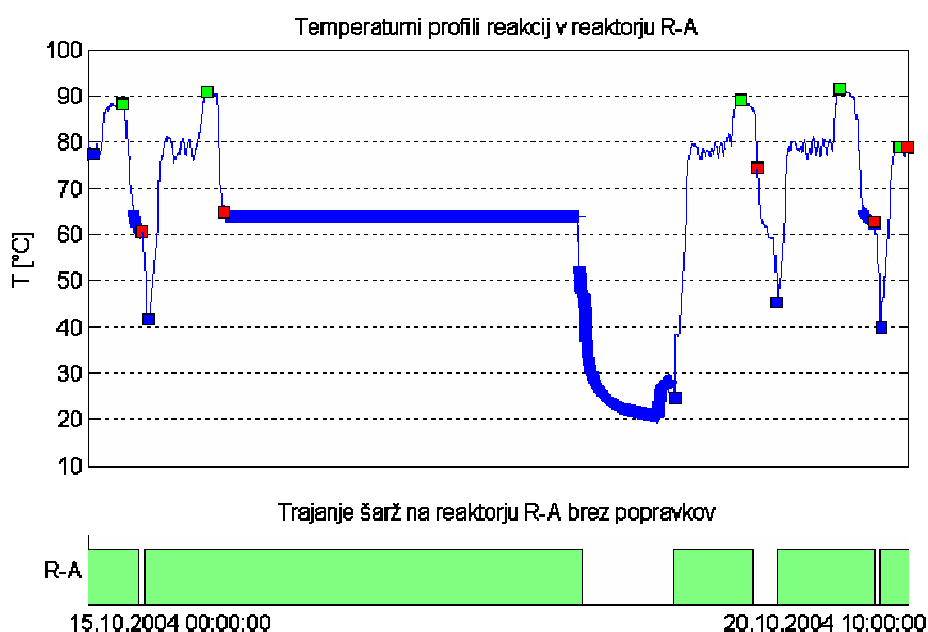
Najbolj pogosti postopek validacije modela je preučevanje ujemanja izhodnih signalov modela in realnega procesa. Slika 7-14 prikazuje primerjavo dejanskega temperaturnega profila reakcije v reaktorju R-C za šaržo št. 400155 in temperaturnega profila, ki ga daje model. Ujemanje temperaturnih profilov ni zelo popolno, vendar je za namen uporabe modela zadovoljivo. Predvsem je pomembno trajanje posamezne šarže vključno s fazami v sami šarži in odstopanje temperaturnega profila od reference, saj to odstopanje vpliva na kakovost končnega izdelka. Odstopanja temperaturnega profila šarž v proizvodnji od reference so velika zaradi ročne regulacije temperature v reaktorju. Temperatura v reaktorju je odvisna od koncentracije monomera v reaktorju, količine iniciatorja, hlajenja reaktorja in drugih vplivov. Temperatura v reaktorju se regulira z ročnim dodajanjem iniciatorja v reaktor in občasno s hlajenjem reaktorja.



Slika 7-14: Primerjava dejanskega temperaturnega profila in simuliranega temperaturnega profila reakcije za izdelek Mekolit HB za šaržo št. 400155

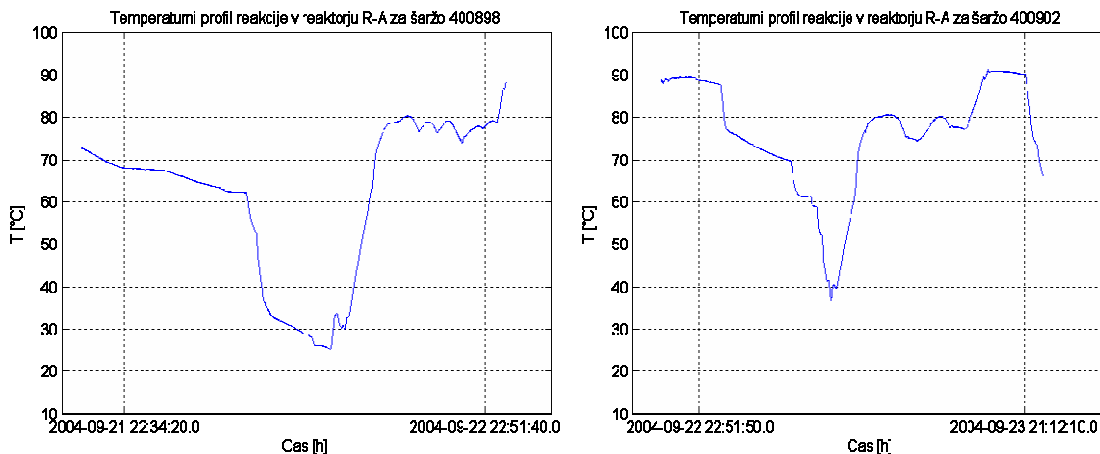
V proizvodnji se emulzije proizvajajo v šaržah, med posameznimi šaržami pa nastopajo prehodni časi, ko reaktorji niso koristno uporabljeni. Preučevanje in posledično zmanjševanje prehodnih časov lahko poveča zasedenost reaktorjev in posledično produktivnost proizvodnje. V tovarni beležijo proizvodne podatke z dvema sistemoma: sistemom SCADA in proizvodnim informacijskim sistemom PIS, ki je nekakšen sistem MES za izmenjavo podatkov med sistemoma ERP in SCADA. Pri preučevanju arhivskih podatkov za proizvodnjo smo ugotovili, da so časi trajanja šarž in prehodni časi, kot jih beleži sistem SCADA, le delno v skladu z dejanskim potekom proizvodnje. Poleg tega so podatki o trajanju šarž in prehodnih časih v sistemu MES drugačni od podatkov, ki jih vsebuje sistem SCADA, kar posledično onemogoča resnejše analize obstoječih podatkov.

Prvi primer neustreznega beleženja podatkov o trajanju šarže prikazuje slika 7-15, kjer imamo primer šarže, katere reakcija se je zaključila v petek, 15. 10. 2004 ponoči, vendar je sistem SCADA zabeležil zaključek šarže šele v ponedeljek zjutraj, ko je operater v sistemu SCADA formalno zaključil šaržo in potem tudi izpraznil reaktor. Ker proizvodnja čez vikend stoji, je takšno podaljšanje trajanja šarže neutemeljeno. Reakcija se je dejansko zaključila v petek zvečer, le da je šarža ostala v reaktorju do ponedeljka zjutraj, ko jo je operater prečrpal v egalizator. Pri statistični obravnavi proizvodnih



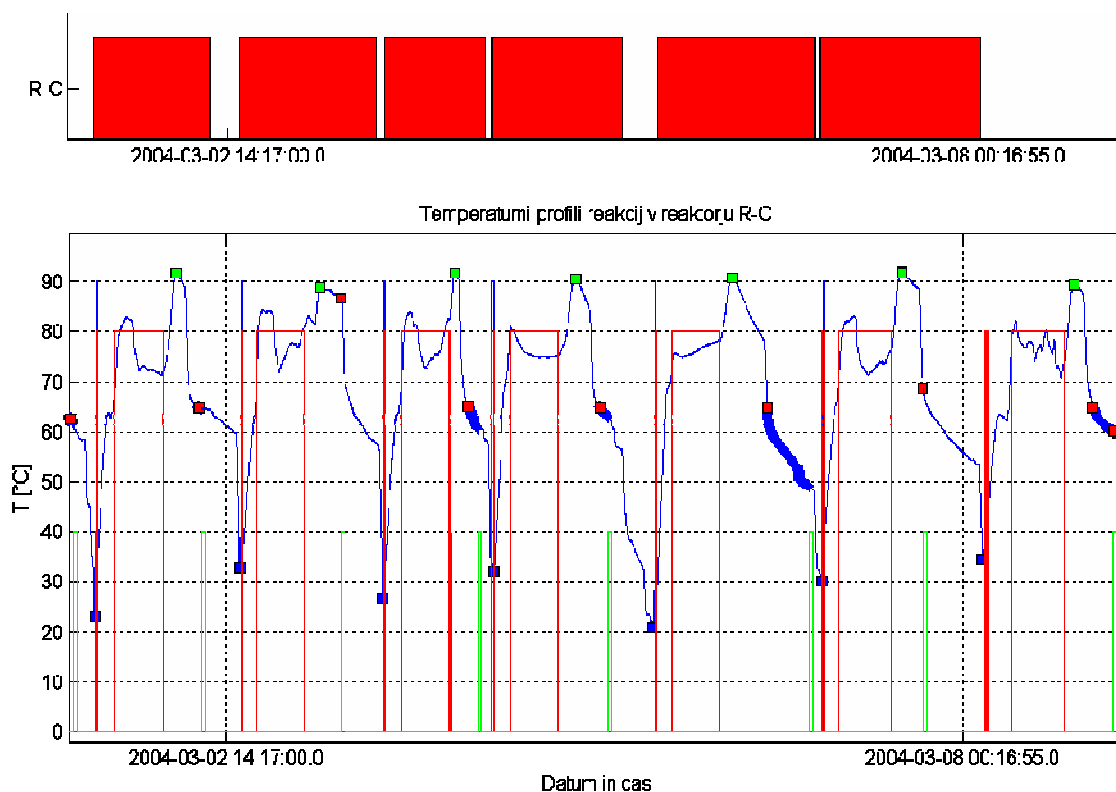
Slika 7-15: Temperaturni profili reakcij v reaktorju R-A (zgoraj) in neustrezno beleženje trajanja šarž, kot jih beleži sistem SCADA (spodaj)

časov za posamezne izdelke pomenijo opisani primeri veliko motnjo, kar se odraža v povečani standardni deviaciji za ocenjene povprečne proizvodne čase.



Slika 7-16: Temperaturni profil reakcije za šaržo s številko 400898 (levo) in 400902 (desno)

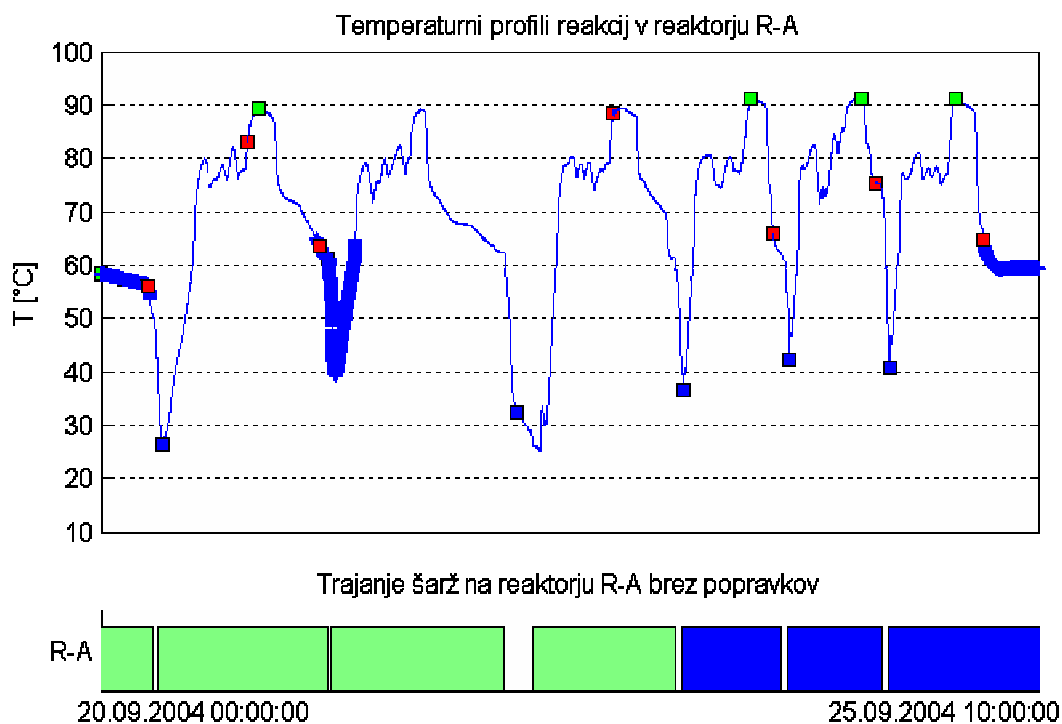
Drugi problem, ki se je pojavil pri analizi arhivskih podatkov v sistemu SCADA, je neustrezno pripisovanje proizvodnih podatkov posameznim šaržam. To pomeni, da sistem SCADA občasno posamezni šarži predpiše podatke, ki pripadajo tudi sosednji šarži, hkrati pa določen del podatkov, ki pripadajo tej šarži, pripiše naslednji šarži. Levi diagram na sliki 7-16 prikazuje temperaturni profil, ki pripada šarži s številko 400898.



Slika 7-17: Zgornji diagram prikazuje trajanje posamezne šarže, kot ga beleži sistem MES. Spodnji diagram prikazuje temperaturne profile reakcij v reaktorju R-C vključno z osnovnimi fazami posameznih šarž ter pretoki surovin v fazah priprave surovin in same reakcije.

Iz poteka temperaturnega profila je razvidno, da se začetek šarže dejansko začne v predhodni šarži, kjer se končuje faza vakumiranja šarže, nadalje pa se sama šarža zaključi še pred lastno fazo vakumiranja. Enak vzorec opazimo tudi na desnem diagramu na sliki 7-16, ki prikazuje temperaturni profil, ki pripada šarži s številko 400902. Ta šarža vključuje fazo vakumiranja, analize in umerjanja izdelka ter praznjenja reaktorja predhodne šarže 400898 ter normalen potek šarže 400902. Opisane problema nismo zasledili v podatkih o trajanju šarž, ki jih beleži sistem MES.

Vzrok za opisani problem je v sistemu SCADA. Postopek izdelave posamezne šarže sestoji iz faze priprave surovin in faze izdelave izdelka. Ko operater prične s pripravo surovin za naslednjo šaržo na danem reaktorju, sistem SCADA avtomatsko prične pripisovati proizvodnim podatkom številko te nove šarže, četudi le ti pripadajo trenutno izvajajoči se šarži na reaktorju. Te napake v sistemu MES ne zasledimo, saj so v njem podatki o trajanju posamezne šarže in prehodnih časih med šaržami skladni s temperaturnimi profili posameznih šarž, kar lahko vidimo na sliki 7-17. Spodnji diagram na sliki 7-17 prikazuje temperaturni profil reakcije (modri diagram), pripravo surovin (zeleni diagram, ki ponazarjajo pretok monomera pri polnjenju dozirne posode), začetno polnitev v reaktor (modre in rdeče konice, ki se pokrivajo) ter rdeči diagram, ki podaja dotok monomera v reaktor v času reakcije.



Slika 7-18: Temperaturni profili reakcij brez popravkov z avtomatsko detekcijo faz za posamezne šarže, kot jih beleži sistem SCADA (zgoraj), in trajanje šarž, kot jih beleži sistem MES (spodaj)

Da bi popravili prej opisane napake v podatkih, kakor jih beleži sistem SCADA, smo razvili poseben algoritem, ki iz temperaturnega profila avtomatsko diagnosticira osnovne faze v postopku izdelave šarže. Te faze so razvidne na temperaturnem profilu na spodnjem diagramu slike 7-18 kot modri, rdeči in zeleni kvadrati. Moder kvadrati označuje začetek šarže, definiran pa je kot čas, ko nastopi najnižja temperatura v začetni fazi reakcije, ko je reaktor prazen in se prične polnjenje reaktorja z reagenti. Ta trenutek kar dobro sovpa z začetkom polnjenja monomera v reaktor, ki predstavlja začetno fazo reakcije. Zeleni kvadrat označuje najvišjo temperaturo reakcije, kar načeloma ustreza koncu reakcije v reaktorju. Konec šarže označuje rdeči kvadrat, ki je definiran kot trenutek, ko je temperatura v reaktorju manjša od 65 °C in je odvod temperature v reaktorju nadpovprečen, kar sovpa s praznjenjem reaktorja. Vendar se je opisani algoritem soočal s prej navedenim problemom, da SCADA sistem občasno posamezni šarži predpiše podatke, ki pripadajo tudi predhodni šarži in hkrati izpusti del podatkov, ki pripadajo obravnavani šarži. To lepo prikazuje slika 7-18, kjer je na zgornjem diagramu razvidno, da avtomatska detekcija ne deluje najbolje zaradi prej opisanih napak, medtem ko se trajanje šarž, kot ga definira sistem MES in je prikazano na spodnjem diagramu, lepo prilega temperaturnim profilom šarž. Opisano neskladje v proizvodnih podatkih je bilo precej moteče, tako da smo porabili precej časa za analizo proizvodnih podatkov, iz katerih smo želeli pridobiti čim več informacij o dejanskem trajanju faz in prehodnih časih med šaržami. Da bi ta neskladja popravili, smo ročno vnašali določene popravke v podatke; šarže, ki so se prehitro zaključile, smo podaljšali do časa, ko nastopi praznjenje reaktorja. S takšnimi popravki je avtomatska detekcija faz dobro delovala.

7.10.1 Validacija velikosti in trajanja šarž ter prehodnih časov med šaržami

V proizvodnem procesu polimerizacije se izdeluje več izdelkov, vendar predstavlja proizvodnja izdelkov MEKOLIT HB, MEKOLIT H45 in MEKOLIT KM okrog 90% proizvodnje. Tabela 7-5 podaja povprečne količine za proizvedene šarže, povprečne čase trajanja šarž in prehodne čase med posameznimi šaržami za te izdelke na posameznem reaktorju. Statistika je bila izvedena na celoletnih proizvodnih podatkih za leto 2004. Iz tabele 7-5 je razvidno, da so količine šarž precej stabilne in nihajo v povprečju za $\pm 3.5\%$, trajanje šarž niha za izdelke HB okrog 30 %, izdelke H45 okrog 45 % na reaktorju R-A in 20 % na reaktorju R-C ter za izdelke KM okrog 50 % na reaktorju R-B in 35 % na reaktorju R-C. Nihanja v trajanju šarž so zelo velika, kar je posledica podaljšanih šarž, ki trajajo čez cel vikend in eno od njih prikazuje slika 7-15.

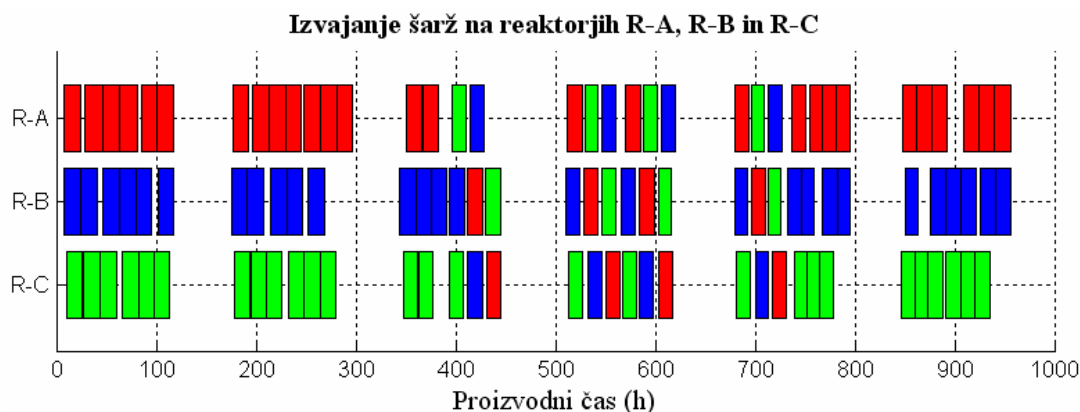
Tabela 7-5: Statistični podatki o količini in trajanju šarž ter prehodnih časih med šaržami za posamezni reaktor in izdelek, dobljeni iz proizvodnih podatkov za leto 2004, ki smo jih dobili iz sistema MES

Reaktor	Izdelek	Število šarž	Količina (kg)	T _{ŠARŽA} (h)	T _{PREHOD} (h)
R-A	HB	127	6324 ± 206	15.6 ± 5.1	7.7 ± 12.3
	H45	96	6472 ± 201	16.6 ± 7.4	9.5 ± 25.5
	KM	36	5388 ± 236	15,8 ± 6.4	12.3 ± 28.0
R-B	HB	0	0	0	0
	H45	0	0	0	0
	KM	266	5565 ± 219	16.7 ± 7.7	12.6 ± 30.8
R-C	HB	94	6845 ± 193	14.6 ± 4.6	14.6 ± 4.6
	H45	65	6814 ± 271	15.1 ± 3.2	12.2 ± 3.2
	KM	122	6271 ± 252	15.3 ± 5.5	5.6 ± 16.6

Podatke, ki smo jih dobili z avtomatsko detekcijo faz za posamezne šarže, prikazuje tabela 7-6. V tabeli opazimo, da se za izdelek HB trajanje šarže bistveno ne spremeni, za izdelka H45 in KM na reaktorjema R-A in R-C se trajanje šarže precej zmanjša in sicer v povprečju za dve do tri ure. Trajanje šarž za izdelek KM na reaktorju R-B se bistveno ne spremeni. Velike razlike nastopijo pri prehodnih časih, saj se ti precej zmanjšajo. Primerjava prehodnih časov ni povsem relevantna, saj smo pri avtomatski detekciji faz hkrati analizirali podatke za v povprečju dva tedna in prehodnega časa pri zadnji šarži nismo uspeli pravilno oceniti, tako da je bil ocenjen z 0. Vidimo pa, da so standardne deviacije še vedno zelo velike in se v določenih primerih močno razlikujejo v primerjavi s podatki, ki jih zajema sistem MES. Podrobnejša analiza prehodnih časov iz opisanih podatkov ni možna, saj se ne beleži dodatnih dogodkov, ki vplivajo nanje, zato le-ti predstavljajo nedorečenost proizvodnega procesa in rezerve, v katerih se

Tabela 7-6: Statistični podatki o trajanju šarž na posameznih reaktorjih za leto 2004, ki smo jih pridobili z avtomatsko detekcijo faz

Reaktor	Izdelek	Količina (kg)	T _{ŠARŽA} (h)	T _{PREHOD} (h)
R-A	HB	6300 ± 114	15.0 ± 6.4	3.1 ± 2.5
	H45	6441 ± 247	12.6 ± 3.1	3.6 ± 3.3
	KM	5401 ± 243	12.1 ± 6.5	8.4 ± 15.4
R-B	HB	0	0	0
	H45	0	0	0
	KM	5528 ± 176	15.3 ± 6.5	4.5 ± 19.9
R-C	HB	6787 ± 168	12.6 ± 2.3	3.6 ± 2.3
	H45	6790 ± 256	12.8 ± 1.9	5.7 ± 10.2
	KM	6174 ± 183	13.8 ± 1.7	5.4 ± 28.5



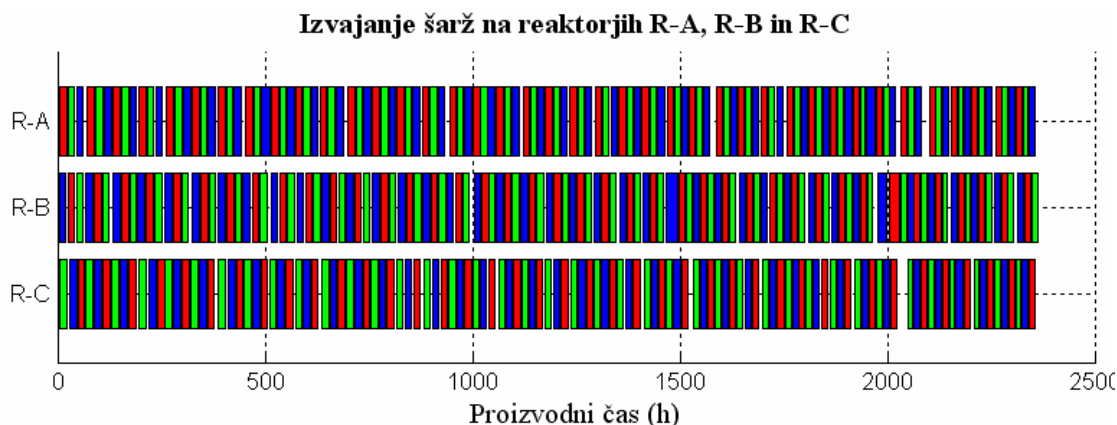
Slika 7-19: Zasedenost reaktorjev pri simulaciji izvajanja raznovrstnih izdelkov s prekinitvami dela med vikendi

skrivajo možnosti za njihovo zmanjševanje in posledično večjo izkoriščenost reaktorjev in s tem produktivnost proizvodnje.

Slika 7-19 prikazuje razpored šarž za proizvodnjo treh vrst izdelkov, ki smo ga dobili s simulacijo na modelu proizvodnje. Upoštevali smo 120-urni tedenski delavnik s prekinitvijo dela čez vikend. Na sliki je razvidno, da se v prvem delu simulacije proizvaja na vsakem reaktorju samo en izdelek, drugi del proizvodnje pa je takšen, da se izdelki, ki se proizvajajo na posameznem reaktorju, stalno menjajo. Tudi hitrost proizvodnje se med simulacijo spreminja, tako da se tako prehodni časi kot časi trajanja posameznih šarž spreminjajo. Tabela 7-7 podaja statistične podatke za opisani simulacijski tek.

Tabela 7-7: Statistični podatki o trajanju šarž na posameznih reaktorjih, ki smo jih pridobili s simulacijo proizvodnje razgibanega sortimenta izdelkov pri konstantni kakovosti surovin in spreminjajoči se hitrosti proizvodnje in s prekinitvijo dela čez vikend

Reaktor	Izdelek	Število šarž	Količina (kg)	T _{ŠARŽA} (h)	T _{PREHOD} (h)
R-A	HB	28	6342 ± 3	15.5 ± 1.29	5.6 ± 10.8
	H45	4	6488 ± 3	13.9 ± 0.3	12.1 ± 5.3
	KM	4	5574 ± 2	13.3 ± 0.3	3.7 ± 0.4
R-B	HB	4	6338 ± 1	14.2 ± 1	3.6 ± 0.3
	H45	28	6492 ± 3	15.1 ± 1.2	4.2 ± 5.6
	KM	4	5597 ± 2	13.3 ± 0.8	10.4 ± 4.7
R-C	HB	4	6832 ± 2	14.2 ± 0.3	9.6 ± 5.5
	H45	4	6823 ± 2	14.3 ± 0.8	3.9 ± 0.6
	KM	27	6300 ± 3	14.6 ± 1.3	3.4 ± 6.2



Slika 7-20: Zasedenost reaktorjev pri simulaciji izvajanja raznovrstnih izdelkov brez prekinitev dela čez vikende.

Slika 7-20 prikazuje rasporeditev šarž pri simulaciji proizvodnje, v kateri poteka proizvodnja treh izdelkov, pri čemer se izdelki na posameznih reaktorjih stalno menjavajo. Proizvodnja poteka neprekinjeno, tudi ob vikendih, tako da so prehodni časi zaradi tega manjši. Tabela 7-8 prikazujejo statistične podatke za takšno simulacijo proizvodnje.

Tabela 7-9 prikazuje primerjavo med dejanskimi in simuliranimi količinami izdelkov, pri čemer so podatki zbrani iz tabel od 7-5 do 7-8. Primerjava količin nam pokaže, da se dejanske in simulirane količine šarž dobro ujemajo. Opazimo tudi, da imajo simulirane količine zelo majhno standardno deviacijo, kar je posledica natančnega algoritma, ki ne upošteva nihanj, ki nastopajo v realnem procesu.

Tabela 7-8: Statistični podatki o trajanju šarž na posameznih reaktorjih, ki smo jih pridobili s simulacijo proizvodnje razgibanega sortimenta izdelkov pri konstantni kakovosti surovin in spreminjajoči se hitrosti proizvodnje brez prekinitev dela čez vikend

Reaktor	Izdelek	Število šarž	Količina (kg)	T _{ŠARŽA} (h)	T _{PREHOD} (h)
R-A	HB	40	6343 ± 5	15.3 ± 1.3	3.3 ± 0.3
	H45	40	6486 ± 3	15.4 ± 1.5	6.8 ± 4.0
	KM	40	5570 ± 4	14.5 ± 1.3	3.7 ± 0.6
R-B	HB	40	6340 ± 1	15.5 ± 2.2	3.4 ± 0.4
	H45	40	6488 ± 5	15.5 ± 2.2	3.7 ± 0.5
	KM	40	5595 ± 1	14. ± 1.2	6.6 ± 2.9
R-C	HB	40	6834 ± 2	15.4 ± 1.2	5.9 ± 4.4
	H45	40	6830 ± 6	15.3 ± 1.2	3.7 ± 0.5
	KM	40	6292 ± 12	14.5 ± 1.2	4.0 ± 0.7

Tabela 7-9: Primerjava med dejanskimi in simuliranimi povprečnimi količinami šarž

Reaktor	Izdelek	Količina (kg) MES	Količina (kg) Avtomatska detekcija faz	Količina(kg) Simulacija s prekinitvami	Količina(kg) Simulacija brez prekinitev
R-A	HB	6324 ± 206	6300 ± 114	6342 ± 3	6343 ± 5
	H45	6472 ± 201	6441 ± 247	6488 ± 3	6486 ± 3
	KM	5388 ± 236	5401 ± 243	5574 ± 2	5570 ± 4
R-B	HB	0	0	6338 ± 1	6340 ± 1
	H45	0	0	6492 ± 3	6488 ± 5
	KM	5565 ± 219	5528 ± 176	5597 ± 2	5595 ± 1
R-C	HB	6845 ± 193	6787 ± 168	6832 ± 2	6834 ± 2
	H45	6814 ± 271	6790 ± 256	6823 ± 2	6830 ± 6
	KM	6271 ± 252	6174 ± 183	6300 ± 3	6292 ± 12

Tabela 7-10 prikazuje primerjavo časov trajanja šarž v prej obravnavanih primerih (tabele od 7-5 do 7-8). Kot Najprej opazimo, da se povprečni časi trajanja šarž pri avtomatski detekciji v povprečju zmanjšajo za 2 do 3 ure, v nekaterih primerih pa se zmanjšajo tudi standardne deviacije. Ta zmanjšanja nastopajo zato, ker zaključek šarž ni časovno jasno definiran (končne faze šarže, kot so faza preverjanja ustreznosti izdelka, njegovo umerjanje ter prečrpavanje izdelka v egalizatorje s filtriranjem) in močno vpliva na celoten čas šarže. Srednje vrednosti simuliranih časov trajanja šarž se ne pokrivajo v celoti z dejanskimi srednjimi vrednostmi trajanja šarž, vendar to ni moteče, saj so standardne deviacije dejanskih časov zelo velike. Pri časih, ki jih dobimo s simulacijo s prekinitvami, opazimo, da so nekatere standardne deviacije zelo majhne (manj kot eno uro), kar je posledica majhnega števila simuliranih šarž (glej tabelo 7-7).

Tabela 7-10: Primerjava med dejanskimi in simuliranimi časi trajanja šarž

Reaktor	Izdelek	T _{ŠARŽA} MES	T _{ŠARŽA} Avtomatska detekcija faz	T _{ŠARŽA} Simulacija s prekinitvami	T _{ŠARŽA} Simulacija brez prekinitev
R-A	HB	15.6 ± 5.1	15.0 ± 6.4	15.5 ± 1.29	15.3 ± 1.3
	H45	16.6 ± 7.4	12.6 ± 3.1	13.9 ± 0.3	15.4 ± 1.5
	KM	15.8 ± 6.4	12.1 ± 6.5	13.3 ± 0.3	14.5 ± 1.3
R-B	HB	0	0	14.2 ± 1	15.5 ± 2.2
	H45	0	0	15.1 ± 1.2	15.5 ± 2.2
	KM	16.7 ± 7.7	15.3 ± 6.5	13.3 ± 0.8	14. ± 1.2
R-C	HB	14.6 ± 4.6	12.6 ± 2.3	14.2 ± 0.3	15.4 ± 1.2
	H45	15.1 ± 3.2	12.8 ± 1.9	14.3 ± 0.8	15.3 ± 1.2
	KM	15.3 ± 5.5	13.8 ± 1.7	14.6 ± 1.3	14.5 ± 1.2

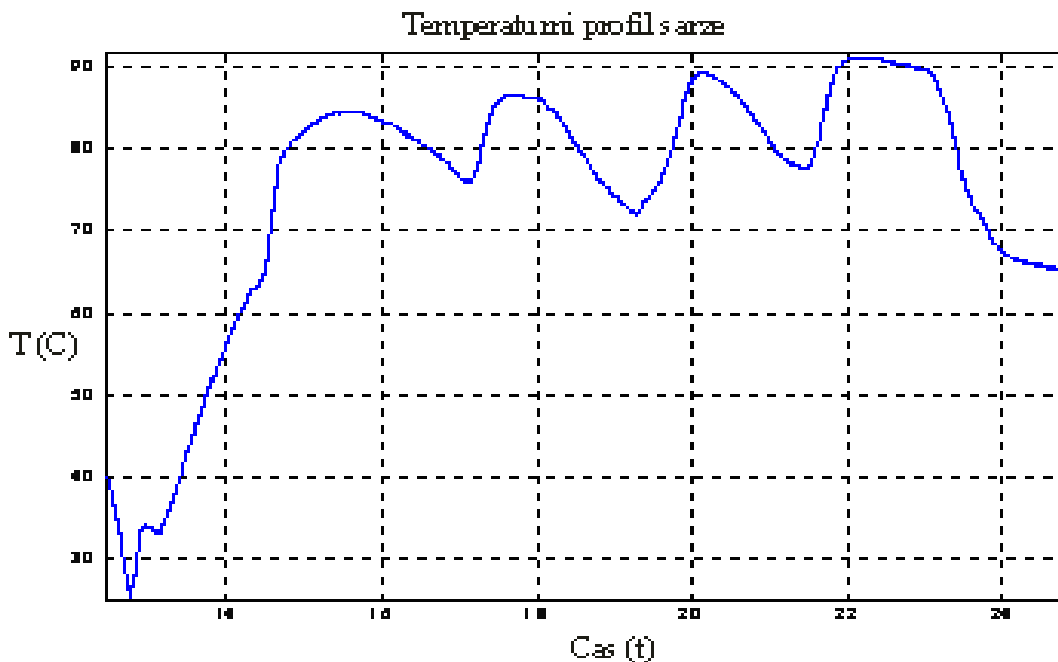
Tabela 7-11: Primerjava med dejanskimi in simuliranimi prehodnimi časi med šaržami

Reaktor	Izdelek	T _{PREHODNI} MES	T _{PREHODNI} Avtomatska detekcija faz	T _{PREHODNI} Simulacija s prekinitvami	T _{PREHODNI} Simulacija brez prekinitvev
R-A	HB	7.7 ± 12.3	3.1 ± 2.5	5.6 ± 10.8	3.3 ± 0.3
	H45	9.5 ± 25.5	3.6 ± 3.3	12.1 ± 5.3	6.8 ± 4.0
	KM	12.3 ± 28.0	8.4 ± 15.4	3.7 ± 0.4	3.7 ± 0.6
R-B	HB	0	0	3.6 ± 0.3	3.4 ± 0.4
	H45	0	0	4.2 ± 5.6	3.7 ± 0.5
	KM	12.6 ± 30.8	4.5 ± 19.9	10.4 ± 4.7	6.6 ± 2.9
R-C	HB	14.6 ± 4.6	3.6 ± 2.3	9.6 ± 5.5	5.9 ± 4.4
	H45	12.2 ± 3.2	5.7 ± 10.2	3.9 ± 0.6	3.7 ± 0.5
	KM	5.6 ± 16.6	5.4 ± 28.5	3.4 ± 6.2	4.0 ± 0.7

Tabela 7-11 prikazuje primerjavo med dejanskimi in simuliranimi prehodnimi časi med šaržami (tabele od 7-5 do 7-8). Iz tabele je razvidno, da imajo vsi prehodni časi zelo veliko standardno deviacijo in da so kot taki zelo slabo definirani. Zato so razhajanja med dejanskimi in simuliranimi prehodnimi časi pričakovana. Pomembno je opazanje, da se prehodni časi v primeru prekinitve dela čez vikend povečajo, kar pričujoče simulacije potrjujejo, saj se ti časi v povprečju podvojijo v primerjavi s prehodnimi časi, ki jih beležimo v primeru kontinuiranega dela. Enako opazanje je lahko opazimo tudi pri resničnih proizvodnih podatkih, saj se pri avtomatski detekciji faz izognemo že prej obravnavanim artefaktom, kar se odrazi v krajših povprečnih časih in predvsem nižjih standardnih deviacijah.

7.10.2 Validacija modela za opisovanje kakovosti izdelkov

Glavni pokazatelj kakovosti izdelkov (polimernih in kopolimernih emulzij) je porazdelitev velikosti delcev (polimernih verig) v emulziji. Te meritve se izvajajo v zunanjem laboratoriju, in sicer v primeru slabega izdelka ali vzorčno enkrat na mesec. Podatkov, ki jih dobimo s takšnimi meritvami, je tako premalo, da bi bila možna statistična analiza odvisnosti kakovosti izdelkov od različnih vplivnih faktorjev (kakovost surovin, kakovost regulacije temperature v reaktorju, vpliv čistoče reaktorja, itd.). Po zaključku reakcije v reaktorju se izvede meritev deleža suhe snovi v emulziji in njena viskoznost, ki sta posredna pokazatelja kakovosti izdelka, na podlagi katerih se vrši umerjanje izdelka, vendar teh podatkov uprava podjetja ni bila voljna posredovati in nam niso bili na voljo. Razpolagali smo z vzorčnimi podatki o kakovosti emulzij v egalizatorjih, kjer so povečini premešane tri šarže enakega izdelka, vendar zaradi tega dejstva ni bilo možno sklepati, katera šarža in posledično kateri faktorji v postopku izdelave šarže so vplivali na kakovost emulzije. Opazili pa smo, da so bile pri nekaterih emulzijah z manjšo viskoznostjo vsebovane šarže, pri katerih je temperatura v času



Slika 7-21: Temperaturni profil šarže, pri kateri temperatura v reaktorju v času reakcije (od 16. do 22. ure) močno niha

reakcije močno nihala. Primer temperaturnega profila takšne šarže prikazuje slika 7-21. Emulzija, ki je vsebovala to šaržo, je imela viskoznost 27500 mPas, dovoljene vrednosti viskoznosti pa so v območju od 26000 do 34000 mPas, normalno pa imajo emulzije viskoznost okrog 32000 mPas. Zaradi opisanih dejstev validacija kakovosti izdelka v normalnem smislu primerjanja simuliranih in dejanskih rezultatov ni bila možna. Validacijo smo zato izpeljali s pomočjo vodje proizvodnje in tehnologov, katerim smo predstavili v poglavju 7.9.3 opisani način modeliranja kakovosti izdelkov in ti so potrdili, da je opisana logika pravilna.

Namen modela proizvodnje je simulacija dogajanja v proizvodnji, kot ga vidimo s proizvodnega nivoja vodenja, kjer poskušamo z implementacijo zaprtostančnega vodenja na osnovi regulatorjev in pPI-jev voditi proizvodnjo. Za ta namen model dovolj dobro opiše proizvodnjo in dogajanje v njej.

8. Kazalniki za proizvodni proces polimerizacije

Za izbrani proces polimerizacije smo iz množice splošnih kazalnikov za proizvodni nivo vodenja pPI izbrali tri karakteristične kazalnike.

8.1 Produktivnost

Definirana je tudi kot dejanska hitrost proizvodnje (angl. *production rate*) in izplen proizvodnje. Produktivnost je na splošno definirana kot razmerje med dejanskim izhodom in enim ali več vhodi v proces, ki se uporabljajo za doseg danega izhoda.

$$P = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n k_i \cdot M_i \quad (8.1)$$

Za opisani proizvodni proces je bila produktivnost P definirana kot količina vseh izdelkov, ki so bili proizvedeni v danem časovnem oknu T (enačba 8.1). Enota kazalnika je kg/h . Za izračun uporabimo vse šarže, ki so se v celoti izvedle v časovnem oknu, ustrezni del proizvedene količine tistih šarž, ki so se delno zaključile v danem časovnem oknu in ustrezni del ocene za proizvedeno količino šarž, ki so v fazi izvajanja. Pri tem uporabljamo *korekcijski faktor* k_i , ki določa delež šarže, ki je bil izdelan v časovnem oknu T , s katerim pomnožimo količino izdelka M_i , ki je bila proizvedena z dano šaržo. n podaja število šarž, ki so se delno ali v celoti proizvajale v časovnem oknu T . Kazalnik ima tem večjo vrednost, čim krajše so šarže in preklopni časi med šaržami ter čim manj je drugih motečih faktorjev, ki vnašajo v proizvodnjo zakasnitve.

Modificirana verzija kazalnika za produktivnost je količina proizvedenega izdelka na uro zasedenosti reaktorja. Ta kazalnik nam prikazuje učinkovitost reaktorjev, saj se pri hitrejšem polnjenju reaktorja, hitrejši analizi in umerjanju izdelka ter praznjenju reaktorja manjša zasedenost reaktorja pri enaki količini proizvedenega izdelka. Ta kazalnik ni najbolj primeren za ocenjevanje učinkovitosti celotne proizvodne linije, saj kazalnik ne upošteva prehodnih časov med šaržami in drugih zastojev v proizvodnem procesu, ki bistveno vplivajo na izkoriščenost proizvodne linije.

V primeru proizvodnje heterogenih izdelkov z raznolikimi proizvodnimi stroški in proizvodnimi časi je potrebno podatke o proizvedenih količinah za posamezne vrste izdelkov ustrezno normirati in šele nato obravnavati na zgoraj opisani način. Normiranje lahko izvajamo glede na ceno ali proizvodni čas ali količino, odvisno od kriterija, po katerem bomo izdelke primerjali. V našem primeru proizvodnje smo zaradi majhnih razlik v proizvodnih časih, količinah in cenah med posameznimi izdelki kazalnik produktivnosti izračunavali brez dodatnega normiranja.

8.2 Kakovost izdelkov

Naslednji pomemben kazalnik za vodenje proizvodnje je povprečna kakovost proizvedenih izdelkov Q . Izračunamo jo kot povprečje faktorjev kakovosti posameznih šarž Q_i , ki so se izdelovale v danem časovnem oknu T , pri čemer n predstavlja število šarž, ki jih obravnavamo (enačba 8.2).

$$Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad (8.2)$$

Konstantna in visoka kakovost izdelkov zagotavlja večje zadovoljstvo strank in zmanjšuje količino odpadnih materialov.

8.3 Proizvodni stroški

Proizvodni stroški so sestavljeni iz materialnih stroškov, stroškov za porabljeno energijo, drugih operativnih stroškov in fiksnih stroškov proizvodnje (amortizacija, delovna sila, itd.). Povprečni stroški proizvodnje na kilogram proizvedenega izdelka S se izračunajo kot vsota vseh stroškov, s katerimi je proizvodnja obremenjena v opazovanem časovnem oknu, deljeno s proizvedeno količino izdelkov v tem časovnem oknu (enačba 8.3). Ta ocena je uporabna za določitev delovnega področja, kjer so stroški proizvodnje na enoto izdelka najmanjši.

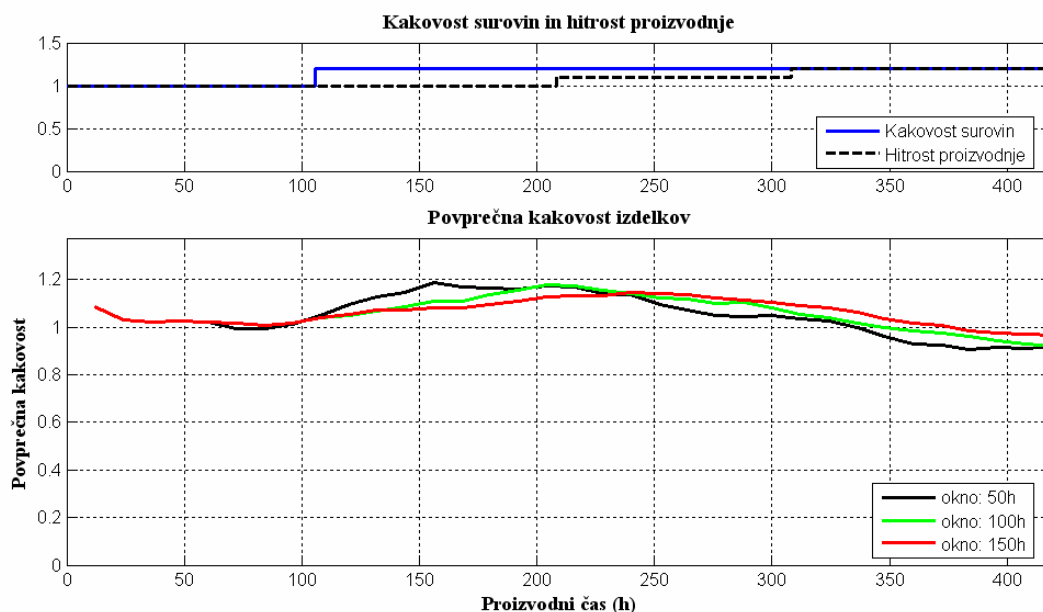
$$S = \frac{\sum_{i=1}^m k_i \cdot S_i + T \cdot S_f}{\sum_{j=1}^n k_j \cdot M_j} \quad (8.3)$$

V danem časovnem oknu imamo tudi opravila, ki so se samo delno izvajala, bodisi da so se začela izvajati pred začetkom okna ali da se še izvajajo, zato je potrebno takšna opravila ustrezno ovrednotiti s pomočjo korekcijskih faktorjev. Pri izračunu kazalnika upoštevamo variabilne stroške tako, da seštejemo s *korekcijskim faktorjem* k_i pomnožene *stroške opravil* S_i (m opravil), fiksne stroške izračunamo kot produkt *postavke fiksnih stroškov* S_f in *časovnega okna* T , medtem ko količino proizvedenih

izdelkov izračunamo kot vsoto s *korekcijskim faktorjem* k_j pomnoženih *proizvedenih količin za posamezno šaržo* M_j (n šarž).

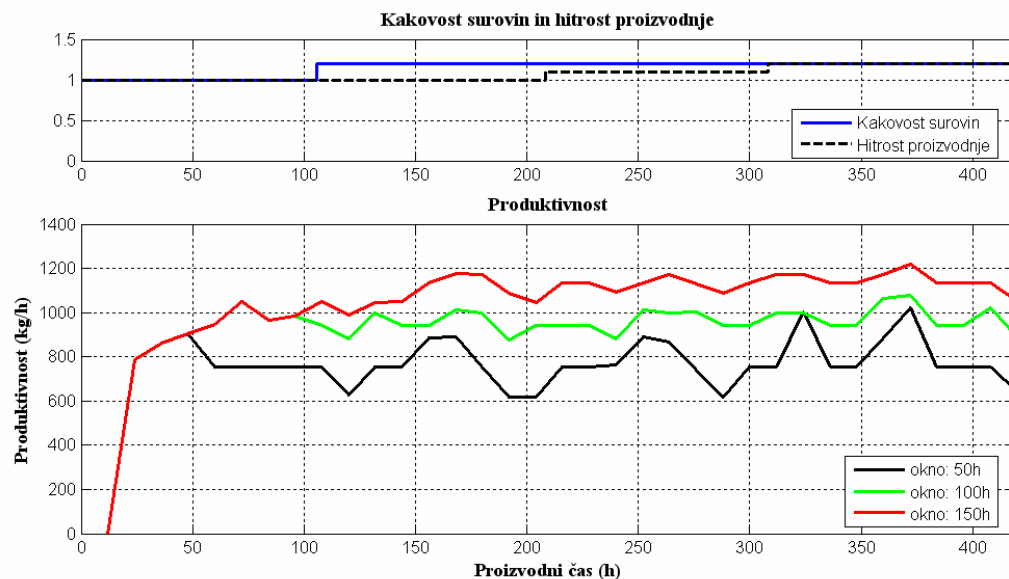
8.4 Implementacija kazalnikov

Slika 8-1 prikazuje primer kazalnika *Kakovost izdelkov*, ki je bil izračunan s periodo 12 ur in je za svoje izračunavanje uporabljal tri različna časovna okna: 50, 100 in 150 ur. Na začetku simulacije še nimamo proizvodnih podatkov, zato so ocene za kazalnike približne, količina podatkov pa je za vsa tri časovna okna enaka, zato so kazalniki za vsa tri časovna okna na začetku enaki. V nadaljevanju opazimo, da ima kazalnik s časovnim oknom 50 ur večjo dinamiko kot preostala dva; že v istem dnevu, v katerem je nastopila sprememba (npr. sprememba kakovosti surovin v 105 uri proizvodnje), se to odraži na spremembi vrednosti kazalnika, medtem ko se na kazalnikoma s časovnim oknom 100 in 150 ur to odraži šele po dvakrat oziroma trikrat večjem času. Tudi sprememba je na začetku pri prvem kazalniku večja, vendar se po preteku 100 ur od nastopa motnje vrednosti kazalnikov skoraj izenačijo. Enak vzorec obnašanja opazimo tudi v nadaljevanju po nastopu druge (210. ura) in tretje spremembe (310. ura) v manipulativnih spremenljivkah procesa (*Kakovost surovin* in *Hitrost proizvodnje*).



Slika 8-1: Vpliv časovnega okna na kazalnik *Kakovost izdelkov*

Večja odstopanja med kazalniki z različnimi časovnimi okni so opazna pri izračunavanju kazalnika *Produktivnost* (slika 8-2). V tem primeru kazalnik s časovnim oknom 50 ur zavzema občutno manjše vrednosti kot kazalnika s časovnim oknom 100 in 150 ur, kar je posledica karakteristike proizvodnega procesa. *Produktivnost* je definirana kot kvocient količine proizvedenih izdelkov in proizvodnega časa za dano

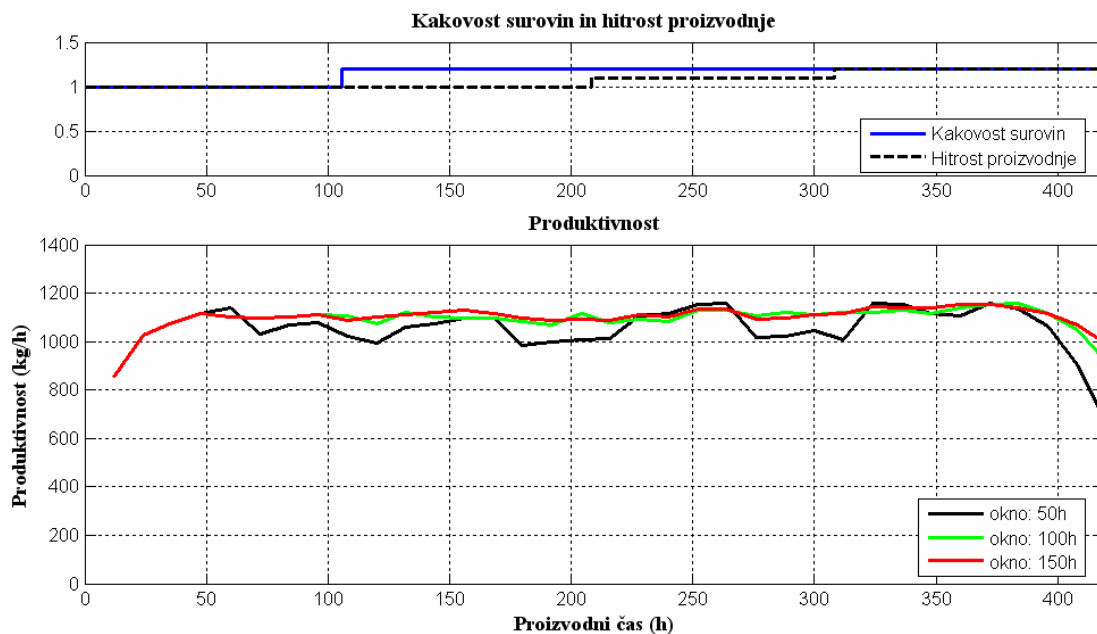


Slika 8-2: Kazalnik *Produktivnost* za tri različna časovna okna brez upoštevanja šarž, ki se niso v celoti izvedle v časovnem oknu

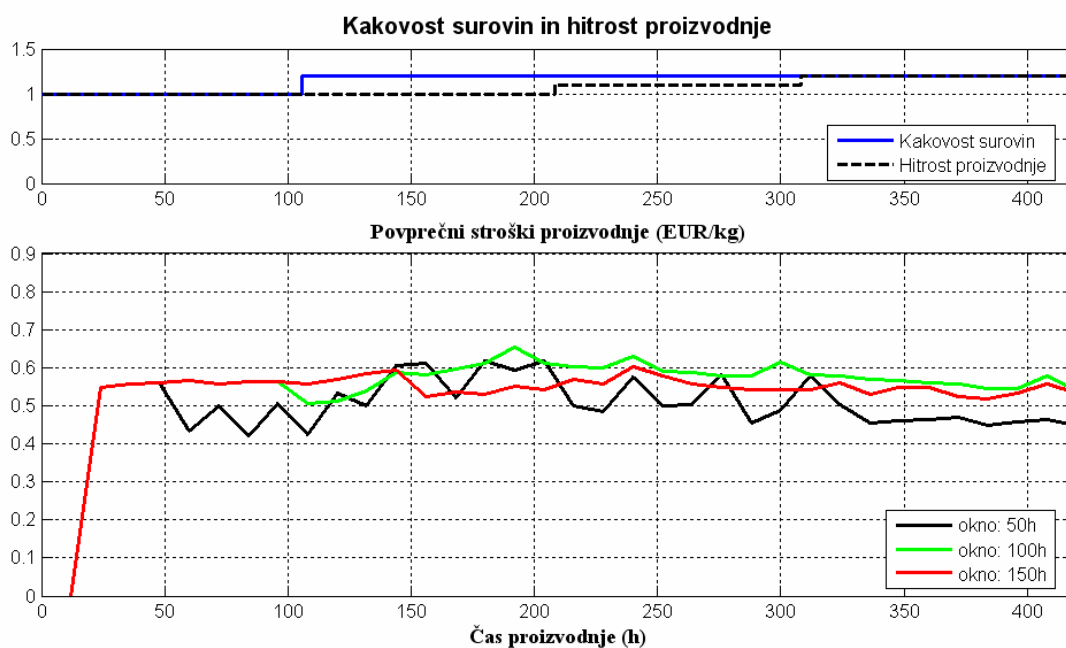
časovno okno. Povprečni izdelovalni čas za šaržo znaša 15 ur in v časovnem oknu 50 ur je le nekaj šarž, ki so se v celoti izvedle, znaten delež pa je tistih, ki so se začele izvajati pred začetkom časovnega okna ali so v fazi izvajanja. Tudi te šarže je potrebno upoštevati z ustrezno korekcijo:

1. *Šarže, ki so se pričele izvajati pred začetkom časovnega okna:* upošteva se jih tako, da se upošteva samo tisti del proizvedene količine in stroškov, ki je proporcionalen izdelovalnemu času šarže, ki pade v časovno okno.
2. *Šarže, ki so v izvajanju:* pri teh šaržah ne vemo, kakšen bo izdelovalni čas, proizvedena količina in kakovost izdelka, zato vzamemo za izračun povprečno vrednost teh parametrov na danem reaktorju in jih pomnožene s korekcijskim faktorjem upoštevamo pri izračunu kazalnikov.

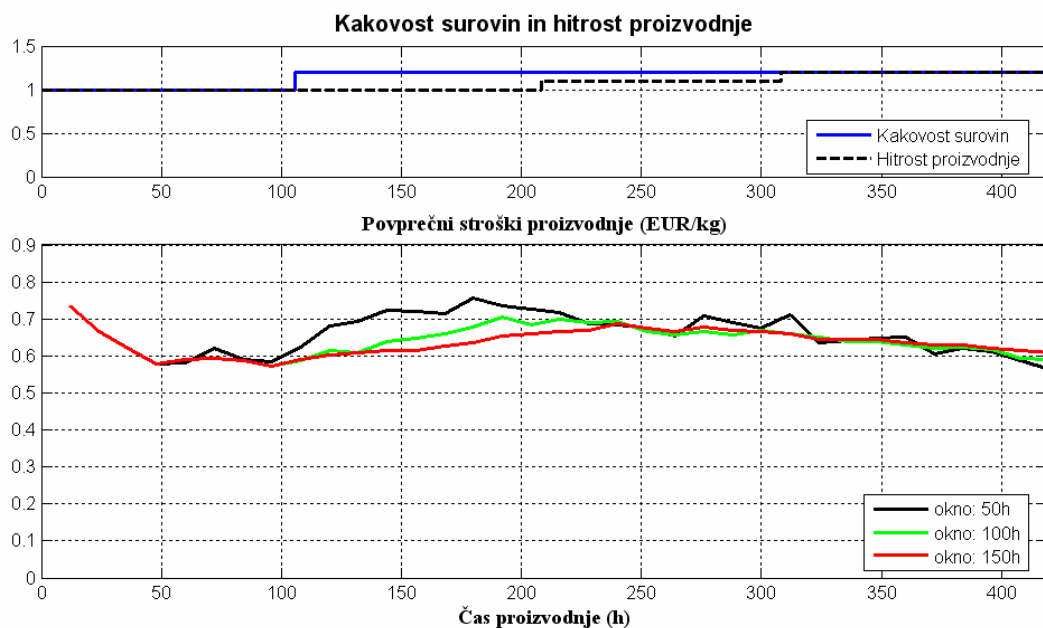
Z opisanim pristopom dobimo kazalnike *Produktivnosti*, kot jih prikazuje slika 8-3. Opazimo, da se razlike med kazalniki z različnimi časovnimi okni občutno zmanjšajo, manjša so tudi nihanja v samih vrednostih kazalnikov, saj se je z opisanim pristopom ocena produktivnosti izboljšala in so zato rezultati bolj verodostojni.



Slika 8-3: Kazalnik *Produktivnost* za tri različna časovna okna z upoštevanjem šarž, ki se niso v celoti izvedle v časovnem oknu



Slika 8-4: Kazalniki *Proizvodni stroški* brez upoštevanja opravi, ki so se le delno izvajala v časovnem oknu



Slika 8-5: Kazalnik *Proizvodni stroški* z upoštevanjem opravil, ki so se le delno izvajala v časovnem oknu

Sedaj si lahko pogledamo še primer kazalnikov, ki prikazujejo proizvodne stroške na kilogram izdelka za različna časovna okna. Slika 8-4 prikazuje kazalnike v primeru, ko ne upoštevamo opravil, ki so se le delno izvajala v danem časovnem oknu, medtem ko slika 8-5 prikazuje kazalnike v primeru, ko upoštevamo tudi ta opravila. V drugem primeru imamo manjša razhajanja med vrednostmi kazalnikov z različnimi časovnimi okni, opazimo pa tudi, da je vrednost kazalnikov v drugem primeru nekoliko višja kot v prvem, kar je posledica dejstva, da v oceni kazalnikov upoštevamo nekoliko več opravil in z njimi povezanih stroškov. V drugem primeru je opaziti tudi večjo dinamiko kazalnika s časovnim oknom 50 ur, kar je posledica boljše odzivnosti kazalnika na trenutne razmere v proizvodnji in nepopolne korekcije stroškov tistih opravil, ki se niso v celoti izvedla v danem časovnem oknu.

Iz opisanih primerov lahko povzamemo, da mora biti časovno okno, ki ga upoštevamo pri izračunavanju kazalnikov, prilagojeno časovni konstanti proizvodnega procesa, katerega ocenjujemo s kazalniki. Kazalniki z večjim časovnim oknom predstavljajo dolgoročno povprečje dogajanja v procesu, manj pa odražajo trenutno dogajanje v procesu in kot taki niso primerni za sprotno vodenje proizvodnje. Pri izračunavanju kazalnikov pa je potrebno upoštevati tudi tista opravila, ki so se le delno izvajala v danem časovnem oknu, še posebej v primerih, ko ni izpolnjen pogoj, da je časovna konstanta opravil veliko manjša od časovnega okna.

8.5 Občutljivost pPI-jev na spremembe manipulativnih spremenljivk

Nazorno predstavitev odvisnosti pPI-jev na spremembe manipulativnih spremenljivk predstavljajo rezultati, ki smo jih dobili z eksperimentoma, v katerih smo sistematično spreminjali vrednosti manipulativnih spremenljivk in preučevali njihov vpliv na potek pPI-jev. V prvem eksperimentu smo simulirali monotono proizvodnjo treh vrst izdelka, pri čemer se je v vsakem reaktorju izdeloval samo en tip izdelka. V drugem eksperimentu smo simulirali raznovrstno proizvodnjo, v kateri se izdelki, ki se izdelujejo v posameznih reaktorjih, stalno menjavajo.

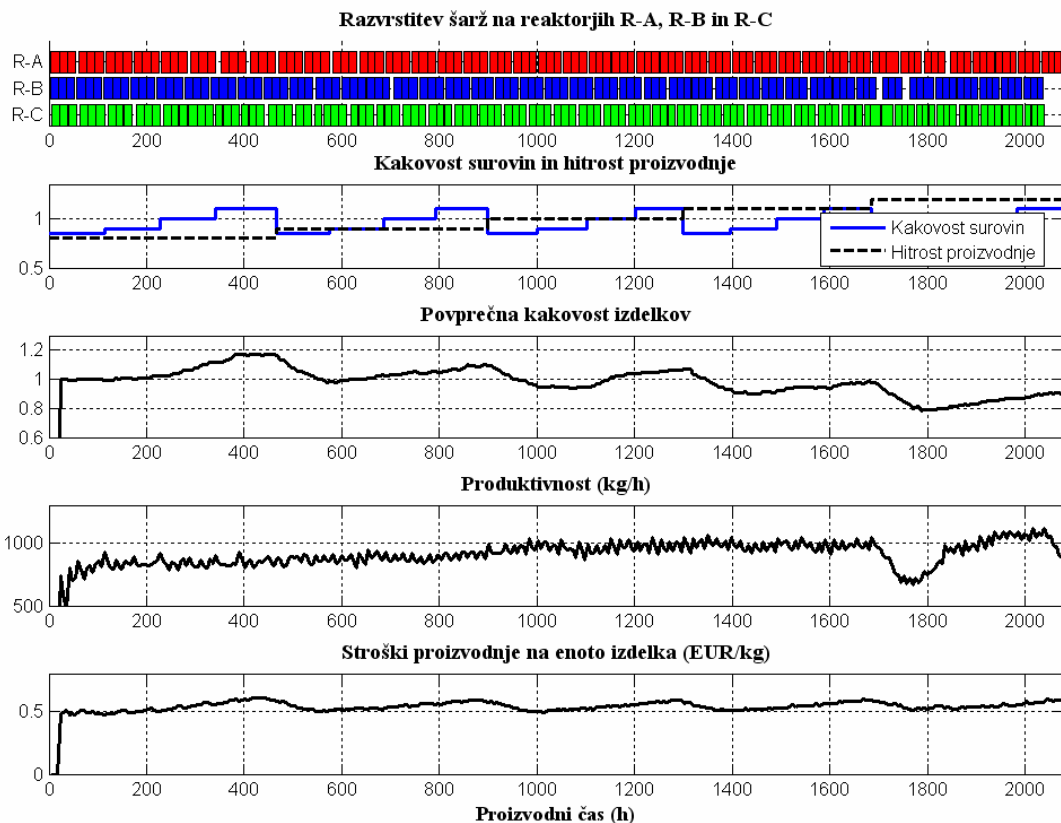
8.5.1 Monotona proizvodnja

Eksperiment je sestavljen iz petih faz, vsako fazo definira *Hitrost proizvodnje*, ki se spreminja od podpovprečne (vrednost je 0.8) preko vmesnih vrednosti 0.9, 1, 1.1 do nadpovprečne vrednosti 1.2. V vsaki fazi smo spreminjali še *Kakovost surovin* od podpovprečne vrednosti 0.85 preko vrednosti 0.9 in 1 do nadpovprečne vrednosti 1.1. Za vsak par vrednosti hitrosti in kakovosti surovin smo predpisali enako zaporedje opravil, ki se morajo izvesti. Vzorec iz razporeda opravil, ki je vsebovan v tabeli *Opravila* v podatkovni bazi in se je izvajal tekom celotnega eksperimenta, prikazuje slika 8-6.

Opravila : Table																
	stevilka_opravila	status	vrsta	instanca	hitrost	reaktor	reaktorRx	egalizator	stevilka	stevilka_sir	stroski	zacetek	konec	trajanje	L_prehodni	L_prehodni_zac
+	233	3	20	2	0.9	3	1	1	0	1	125 EUR	3E+06 2875460	1803	360		2873052
+	234	3	1	1	0.9	1	2	4	141	1	3.324 EUR	3E+06 3017098	69149	540		2947344
+	235	3	1	2	0.9	2	1	2	135	1	2.288 EUR	3E+06 2890972	69863	540		2820504
+	236	3	2	1	0.9	3	2	3	138	1	3.844 EUR	3E+06 2950860	62707	540		2887548
+	237	3	1	1	0.9	1	1	4	142	1	3.326 EUR	3E+06 3074990	120397	540		2953988
+	238	3	1	2	0.9	2	1	2	137	1	2.274 EUR	3E+06 2945660	111263	540		2833792
+	239	3	2	1	0.9	3	1	3	139	1	3.847 EUR	3E+06 3006926	113941	540		2892380
+	240	3	1	1	0.9	1	1	4	145	1	3.325 EUR	3E+06 3133472	113647	540		3019220
+	241	3	1	2	0.9	2	2	2	140	1	2.214 EUR	3E+06 3001868	101635	540		2899628
+	242	3	2	1	0.9	3	2	3	143	1	3.846 EUR	3E+06 3061498	99657	540		2961236
+	243	3	10	3	0.9	1	1	4	0	1	417 EUR	3E+06 3145950	11365	360		3133980
+	244	3	10	5	0.9	1	1	2	0	1	417 EUR	3E+06 3012694	9781	360		3002308
+	245	3	10	1	0.9	2	1	3	0	1	417 EUR	3E+06 3073196	11091	360		3061500
+	246	3	20	2	0.9	1	1	1	0	1	125 EUR	3E+06 3137596	1803	360		3135188
+	247	3	20	2	0.9	2	1	1	0	1	125 EUR	3E+06 3005924	1803	360		3003516
+	248	3	20	2	0.9	3	1	1	0	1	125 EUR	3E+06 3065116	1803	360		3062708
+	249	3	30	0.85	1	1	1	1	0	1	000 EUR	3E+06 3136396	3			
+	250	3	1	1	1	1	1	1	151	1	2.631 EUR	3E+06 3205350	67141	540		3137604
+	251	3	1	2	1	2	2	2	144	1	2.210 EUR	3E+06 3071472	61311	540		3009556
+	252	3	2	1	1	3	2	3	147	1	3.841 EUR	3E+06 3132340	58759	540		3072976
+	253	3	1	1	1	1	1	1	152	1	2.754 EUR	3E+06 3259014	106913	540		3151496
+	254	3	1	2	1	2	2	2	146	1	2.212 EUR	3E+06 3125436	104403	540		3020428
+	255	3	2	1	1	3	1	3	148	1	2.941 EUR	3E+06 3187468	110263	540		3078600
+	256	3	1	1	1	1	1	1	155	1	2.754 EUR	3E+06 3313120	105451	540		3207064
+	257	3	1	2	1	2	2	2	149	1	1.750 EUR	3E+06 3180602	96753	540		3083244
+	258	3	2	1	1	3	2	3	150	1	2.381 EUR	3E+06 3239142	105765	540		3132772
+	259	3	10	3	1	1	1	1	0	1	417 EUR	3E+06 3325576	11603	360		3313368
+	260	3	10	5	1	1	1	2	0	1	417 EUR	3E+06 3191538	9841	360		3181092
+	261	3	10	1	1	2	1	3	0	1	417 EUR	3E+06 3251708	11423	360		3239680

Slika 8-6: Osnovni razpored opravil, ki smo ga izvajal pri različnih *Hitrostih proizvodnje* in *Kakovostih surovin*

Prvi diagram na sliki 8-7 prikazuje razpored šarž na reaktorjih R-A, R-B in R-C; na reaktorju R-A se je izdeloval izdelek MEKOLIT HB, na reaktorju R-B izdelek MEKOLIT H45 in na reaktorju R-C izdelek MEKOLIT KM. Slika prikazuje vse šarže, ki so se izvedle v eksperimentu, v katerem je bilo simuliranih 87 delovnih dni oziroma nekaj čez 2000 delovnih ur. Drugi diagram prikazuje, kako sta se spreminjali manipulativni spremenljivki *Kakovost surovin* in *Hitrost proizvodnje* tekom eksperimenta, tretji diagram prikazuje potek kazalnika *Kakovost izdelkov* in s tem njegovo odvisnost od *Kakovosti surovin* in *Hitrosti proizvodnje*. Vidimo, da je povprečna kakovost izdelkov tem večja, čim boljše so surovine in čim manjša je hitrost proizvodnje. Z zmanjševanjem hitrosti proizvodnje se ključne faze v proizvodnji bolj kakovostno izvedejo; predvsem imamo v mislih regulacijo temperature v reaktorju in fazo vakumiranja. Četrty diagram prikazuje potek kazalnika *Produktivnost*, iz katerega je razvidno, da se produktivnost s povečevanjem hitrosti proizvodnje nekoliko povečuje (pri povečanju hitrosti proizvodnje za 50 % se produktivnost poveča za nekaj čez 20 %). Iz grafa ni razvidna odvisnost produktivnosti od kakovosti surovin razen v zadnjem delu grafa, kjer produktivnost drastično pade za okrog 40 %. Vzrok za takšen padec tiči v dejstvu, da je proizvodnja tedaj zelo pospešena in da je kakovost surovin zelo slaba, kar se odraža v slabih šaržah, ki jih je potrebno reciklirati, (to pomeni dodatne analize

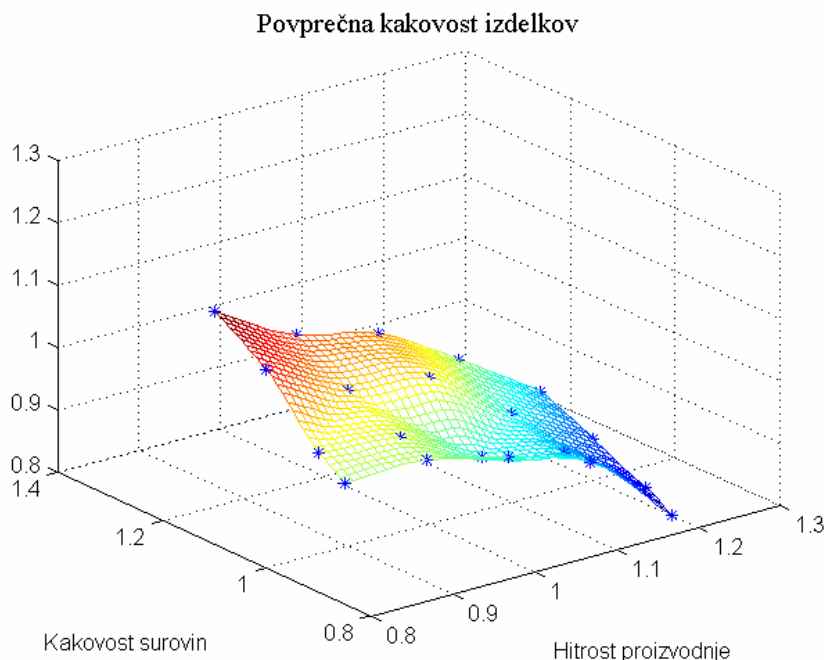


Slika 8-7: Razvrstitev šarž na reaktorjih R-A, R-B in R-C za monotono proizvodnjo in potek manipulativnih spremenljivk *Kakovost surovin* in *Hitrost proizvodnje* ter kazalnikov *Kakovost izdelkov*, *Produktivnost* in *Stroški proizvodnje*

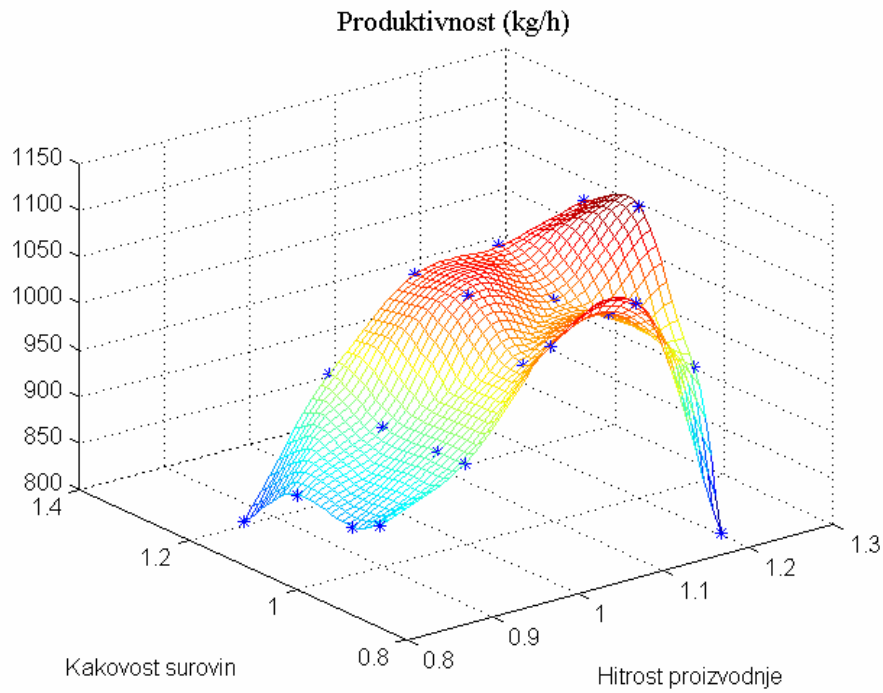
izdelka, prečrpavanje izdelka včasne depositne posode, vmešavanje v druge šarže), kar vnaša v proizvodni proces dodatno delo, stroške in zakasnitve. Zadnji graf prikazuje kazalnik *Proizvodni stroški*. Iz kazalnika je razvidna odvisnost proizvodnih stroškov od kakovosti surovin, medtem ko kazalnik ne izkazuje zaznavne odvisnosti proizvodnih stroškov od hitrosti proizvodnje. To pomeni, da s pospešeno hitrostjo proizvodnje stroški proizvodnje nekoliko naraščajo, vendar so tudi proizvedene količine izdelkov na časovno enoto nekoliko večje, tako da se stroški proizvodnje na kilogram proizvedenega izdelka manj izrazito spreminjajo. To pa ne pomeni, da je sedaj hitrejša proizvodnja tudi boljša, saj so proizvedeni izdelki manj kakovostni in tako je njihova tržna vrednost nižja, kar pa opisani kazalnik ne prikazuje.

Ena od osnovnih prednosti izvajanja eksperimentov na modelu pred eksperimentiranjem na samem proizvodnem procesu je ta, da na modelu lahko preizkušamo tudi tiste scenarije vodenja, ki jih v normalnem proizvodnem procesu zaradi varnostnih in ekonomskih razlogov, kot tudi zaradi nerazpoložljivosti proizvodnega procesa za eksperimentiranje (proizvodnja poteka kontinuirano brez večjih prekinitev), ne moremo preizkusiti. Ena od zanimivih možnosti, ki jih zgoraj opisani eksperiment ponuja, je tridimenzionalna predstavitev odvisnosti pPI-jev *Kakovost izdelkov* in *Produktivnost* od manipulativnih spremenljivk *Kakovost surovin* in *Hitrost proizvodnje*, kar prikazujejo slike 8-8, 8-9 in 8-10. Zadnji dve sliki prikazujeta dva načina izračuna produktivnosti:

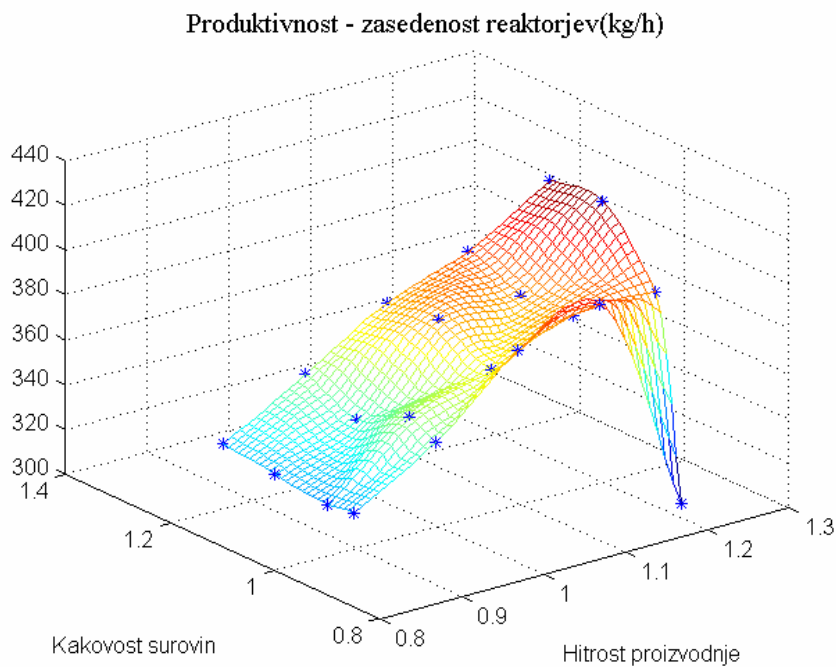
- produktivnost na uro proizvodnje
- produktivnost na uro zasedenosti reaktorja.



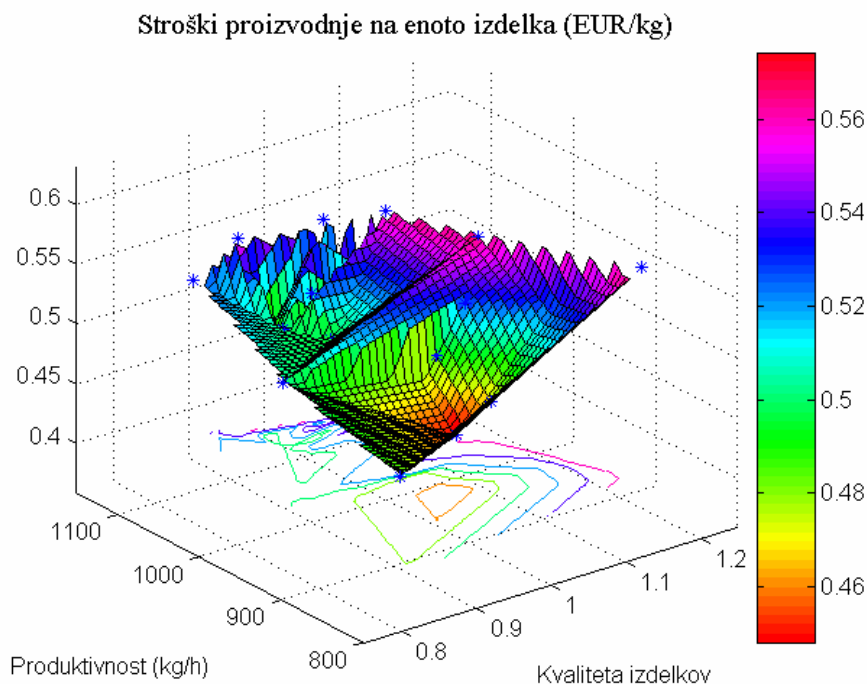
Slika 8-8: Vpliv *Kakovosti surovin* in *Hitrosti proizvodnje* na *Kakovost izdelkov*



Slika 8-9: Vpliv *Kakovosti surovin* in *Hitrosti proizvodnje* na *Produktivnost*, ki je izražena kot količina proizvedenih izdelkov na uro proizvodnje



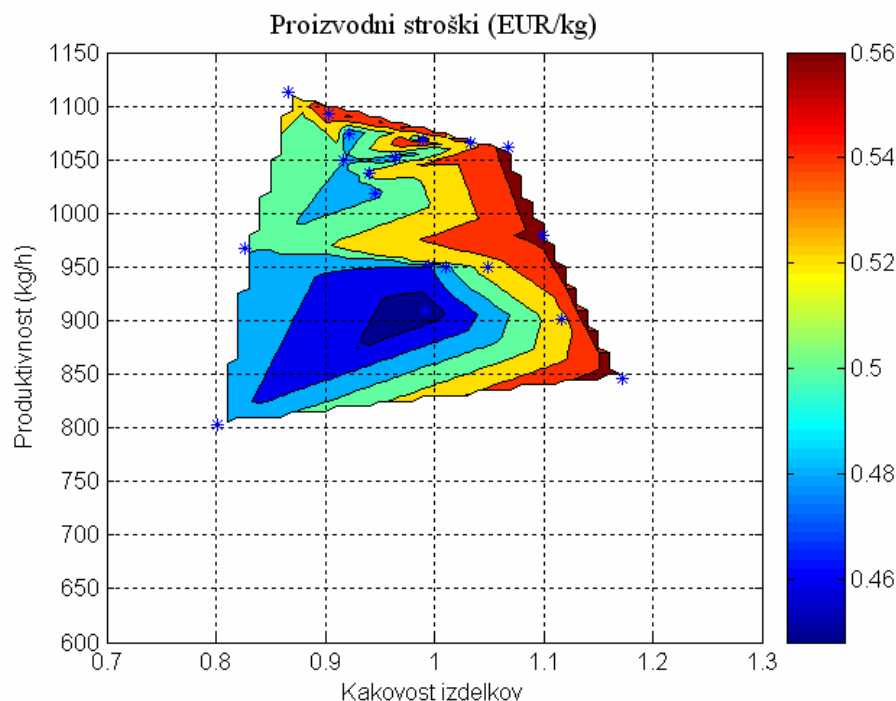
Slika 8-10: Vpliv *Kakovosti surovin* in *Hitrosti proizvodnje* na *Produktivnost*, ki je izražena kot količina proizvedenih izdelkov na uro zasedenosti reaktorja



Slika 8-11: Relacija med kazalniki *Proizvodni stroški*, *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov*

Iz grafov na slikah 8-9 in 8-10 je razvidno, da se produktivnost glede na zasedenost reaktorjev bolj linearno spreminja v primerjavi s produktivnostjo glede na proizvodni čas. To je razumljivo, saj se s spreminjanjem hitrosti spreminjajo tudi prehodni časi med šaržami, kar vnaša dodatne nelinearnosti v produktivnost glede na proizvodni čas. Produktivnost na uro proizvodnje upošteva proizvodnjo vseh treh reaktorjev, medtem ko produktivnost na uro zasedenosti reaktorja upošteva povprečno proizvodnjo enega reaktorja. V nadaljevanju bom uporabljal kazalnik *Produktivnost* na uro proizvodnje.

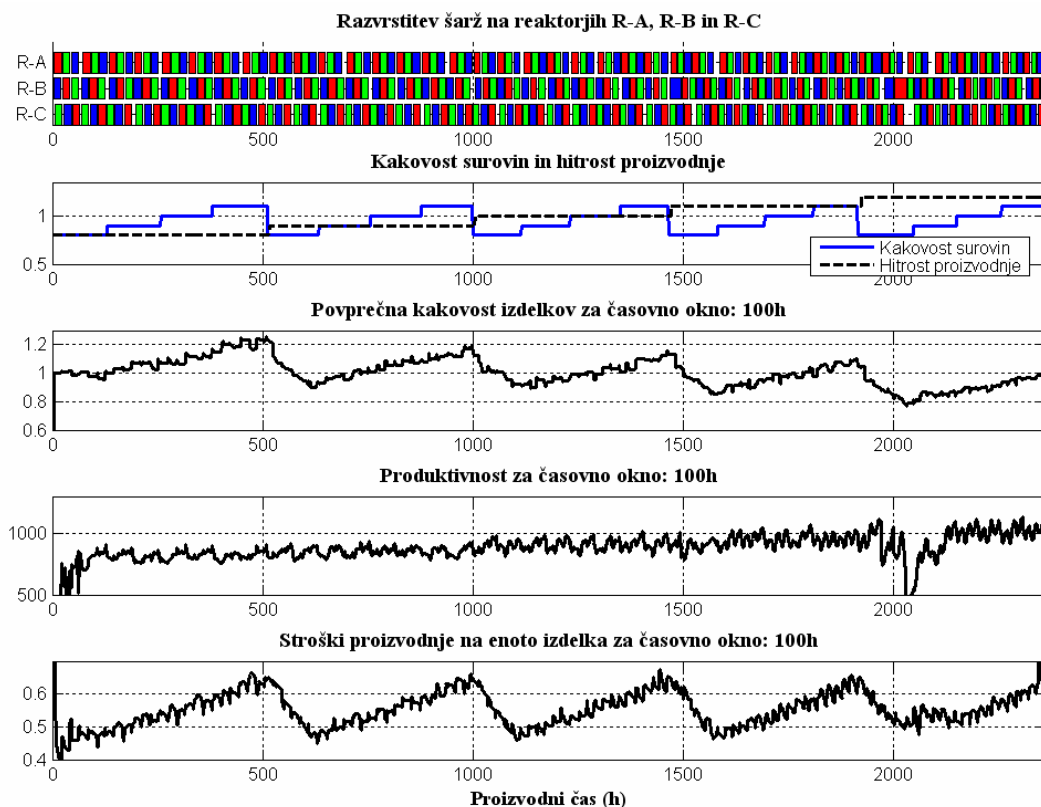
Še bolj zanimiva je relacija med kazalniki *Proizvodni stroški* na enoto izdelka, *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov*, ki jo prikazujeta sliki 8-11 in 8-12. Na slikah je razviden lokalni in globalni maksimum, ki podaja stroškovno najbolj učinkovito področje obratovanja proizvodnega procesa za dano razporeditev opravil v proizvodnji. Iz opisanih relacij lahko definiramo začetne vrednosti za pPI-je *Produktivnost* in *Kakovosti izdelkov*, tako da dobimo optimalno stroškovno obratovanje za dani tip proizvodnje, ki ga določa razporeditev opravil.



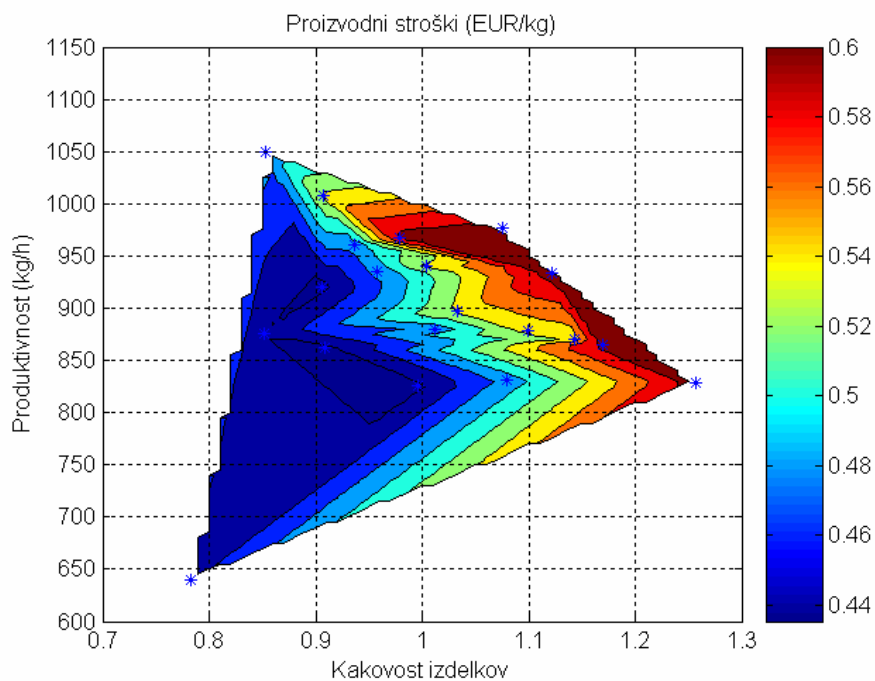
Slika 8-12: Tlorisni pogled na relacije med kazalniki *Proizvodni stroški*, *Produktivnosti* in *Kakovosti izdelkov*

8.5.2 Raznovrstna proizvodnja

Sedaj si pogledjmo še primer raznovrstne proizvodnje, kjer se izdelki, ki se izdelujejo na posameznem reaktorju, stalno menjavajo. Razvrstitev šarž na reaktorjih za takšen tip proizvodnje prikazuje prvi diagram na sliki 8-13, kjer rdeči pravokotnik pomeni zasedenost reaktorja pri proizvodnji šarže MEKOLITA HB, modri pravokotnik proizvodnjo šarže MEKOLITA H45 in zeleni pravokotnik proizvodnjo šarže MEKOLITA KM. Drugi diagram prikazuje potek manipulativnih spremenljivk, zadnji trije pa potek pPI-jev. Na sliki 8-14 lahko opazujemo relacije med kazalniki *Proizvodni stroški*, *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov* za takšno proizvodnjo in jo primerjamo s sliko 8-12, kjer so prikazani proizvodni stroški za monotono proizvodnjo. Iz opisanih diagramov je razvidno, da se glavne karakteristike diagrama ohranjajo, razlike nastopajo predvsem v vrednostih kazalnikov. Omembe vredno je področje (na slikah 8-12 in 8-14 spodaj levo), kjer so vrednosti kazalnikov *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov* najmanjše in predstavlja proizvodnjo s slabimi šaržami. Temu področju delovanja se je v praksi potrebno izogibati. Na slikah je to področje tudi slabo definirano, saj ga določa samo ena izračunana točka, ostale točke so dobljene z interpolacijo.



Slika 8-13: Razvrstitev šarž na reaktorjih R-A, R-B in R-C za raznovrstno proizvodnjo in potek manipulativnih spremenljivk *Kakovost surovin* in *Hitrost proizvodnje* ter kazalnikov *Kakovost izdelkov*, *Produktivnost* in *Proizvodni stroški*



Slika 8-14: Tlorisni pogled na relacije med kazalniki *Proizvodni stroški*, *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov* pri raznovrstni proizvodnji

Funkcija razvrščanja kot tretja manipulativna spremenljivka proizvodnega procesa predstavlja kompleksno funkcijo proizvodnega nivoja vodenja, ki za sprotno uporabo v proizvodnji zahteva uporabo dodatnega orodja za razvrščanje opravil, s katerim pa se v okviru tega dela nismo ukvarjali. Z opisanimi eksperimentoma smo pokazali razlike, ki nastopajo v pPI-jih za dve popolnoma različni razvrstitvi opravil v proizvodnji. Osnovni vzorec odvisnosti pPI-jev od manipulativnih spremenljivk se za ta dva tipa proizvodnje bistveno ne spreminja, opazimo predvsem spremembe v absolutnih vrednostih kazalnikov pri enakih vrednostih manipulativnih spremenljivk.

8.6 Identifikacija proizvodnega procesa po metodi najmanjših kvadratov

V dosedanjem izvajanju smo predstavili odvisnost pPI-jev od manipulativnih spremenljivk in relacije med pPI-ji na opisen način. Proizvodni proces lahko opišemo tudi matematično kot časovno diskretni dinamični proces s prenosno funkcijo $G(z^{-1})$. Enačba (8.4) podaja prenosno funkcijo splošnega diskretnega dinamičnega procesa (Matko, 1992).

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} z^{-d} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} z^{-d} \quad (8.4)$$

Enačba (8.5) podaja časovni potek izhoda procesa $y(k)$ v odvisnosti od preteklih vrednosti izhoda procesa $y(k-i)$, preteklih vrednosti vhodne spremenljivke $u(k-i)$ in motnje $v(k)$.

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_n y(k-n) + b_1 u(k-d-1) + b_2 u(k-d-2) + \dots + b_n u(k-d-n) + v(k) \quad (8.5)$$

Matrično obliko zapisa modela procesa podaja enačba (8.6),

$$y(k) = [-y(k-1) \quad \dots \quad -y(k-n) \quad u(k-d-1) \quad \dots \quad -u(k-d-n)] \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \\ b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} + v(k) \\ = \Psi^T(k) \Theta + v(k) \quad (8.6)$$

kjer sta vektorja Ψ in Θ definirana z enačbo (8.7).

$$\Psi^T(k) = [-y(k-1) \quad \dots \quad -y(k-n) \quad u(k-d-1) \quad \dots \quad -u(k-d-n)] \\ \Theta^T = [a_1 \quad \dots \quad a_n \quad b_1 \quad \dots \quad b_n] \quad (8.7)$$

Naša želja je oceniti parametre a_i in b_i (vektor Θ) iz vhodnih ($u(k)$) in izhodnih ($y(k)$) merjenih veličin procesa. Model procesa, ki ga dobimo s pomočjo meritev vhodnih in izhodnih veličin procesa, podaja enačba (8.8).

$$\hat{y}(k) = \Psi^T(k)\hat{\Theta} \quad (8.8)$$

Ocene parametrov procesa $\hat{\Theta}$ se razlikujejo od dejanskih vrednosti parametrov procesa, zato jih označujemo s strešico. Za oceno vektorja $\hat{\Theta}$ je v praksi potrebno več meritev, kot je število meritev vhodnih in izhodnih veličin procesa, ki so vsebovane v vektorju Ψ . V splošnem lahko pogrešek modela zapišemo kot $e(k)$ v enačbi (8.9) in predstavlja razliko med dejansko vrednostjo izhoda $y(k)$, ki je motena z merilnim šumom in z vrednostjo izhoda $\hat{y}(k)$, ki jo daje model procesa na podlagi izmerjenih preteklih vrednosti izhodnih in vhodnih veličin procesa.

$$y(k) - \hat{y}(k) = y(k) - \Psi^T(k)\hat{\Theta} = e(k) \quad (8.9)$$

Sistem enačb za določitev ocene parametrov $\hat{\Theta}$ dobimo tako, da napišemo enačbo (8.9) za N opazovanj, pri čemer mora biti število opazovanj N mnogo večje od števila parametrov, ki jih ocenjujemo ($N \geq 2n$). Sistem enačb se tako glasi (enačba (8.10))

$$\begin{aligned} y(k-N+1) - \Psi^T(k-N+1)\hat{\Theta} &= e(k-N+1) \\ y(k-N+2) - \Psi^T(k-N+2)\hat{\Theta} &= e(k-N+2) \\ \dots & \\ y(k-1) - \Psi^T(k-1)\hat{\Theta} &= e(k-1) \\ y(k) - \Psi^T(k)\hat{\Theta} &= e(k) \end{aligned} \quad (8.10)$$

Če vpeljemo vektorja \mathbf{e} in \mathbf{y} ter matriko Ψ (enačba (8.11)),

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y(k-N+1) \\ \vdots \\ y(k) \end{bmatrix} \quad \mathbf{e} = \begin{bmatrix} e(k-N+1) \\ \vdots \\ e(k) \end{bmatrix} \quad \Psi = \begin{bmatrix} \Psi^T(k-N+1) \\ \vdots \\ \Psi^T(k) \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

lahko sistem enačb zapišemo v vektorsko matrični obliki (enačba (8.12)).

$$\mathbf{y} - \Psi\hat{\Theta} = \mathbf{e} \quad (8.12)$$

Z minimizacijo kriterijske funkcije V ,

$$V = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = [\mathbf{y} - \Psi\hat{\Theta}]^T [\mathbf{y} - \Psi\hat{\Theta}] \quad (8.13)$$

tako da jo odvajamo na vektor $\hat{\Theta}$ in z upoštevanjem pogojev, da je odvod enak 0 in drugi odvod pozitiven (minimum funkcije) ter nekaj preoblikovanj, dobimo optimalno oceno vektorja $\hat{\Theta}$ v smislu najmanjših kvadratov (enačba 8.14)

$$\hat{\Theta} = [\Psi^T \Psi]^{-1} \Psi^T y \quad (8.14)$$

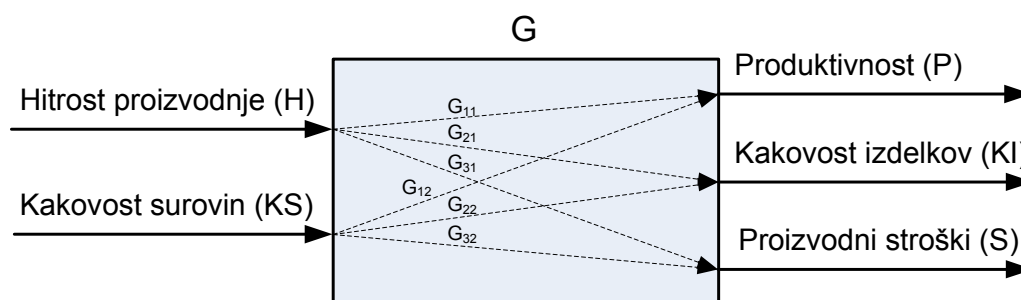
Matematično analizo odvisnosti pPI-jev od manipulativnih spremenljivk smo izvedli z uporabo identifikacije po metodi najmanjših kvadratov. Identifikacijo smo izvedli na podatkih, ki smo jih dobili z izvajanjem eksperimentov na proceduralnem modelu proizvodnje. Kot rezultat identifikacije smo dobili 6 prenosnih funkcij 1. reda G_{xy} , ki podajajo funkcijske odvisnosti pPI-jev od manipulativnih spremenljivk (slika 8-15).

Identifikacijo smo izvedli v eni delovni točki procesa, ki jo definirata vrednosti za vhodni spremenljivki *Hitrost proizvodnje* in *Kakovost surovin* in izbrani razpored opravil. Drugačen razpored opravil določa drugačno vrsto proizvodnje in posledično določa drugačno delovno točko procesa, v kateri se pokažejo nekoliko spremenjene statične in dinamične karakteristike proizvodnega procesa. Opisane razlike so opisane v poglavju 8.5.

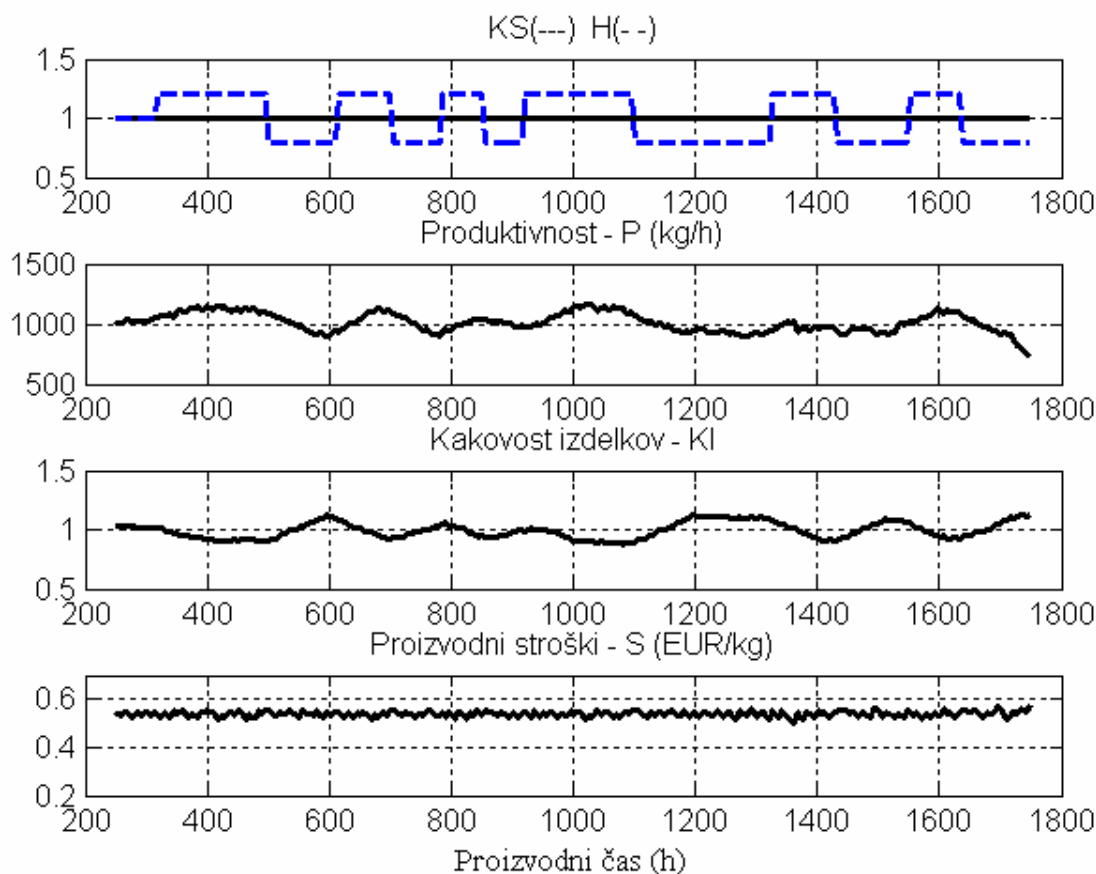
Slika 8-15 prikazuje poenostavljeno blokovno shemo proizvodnega procesa z relacijami med manipulativnimi in reguliranimi spremenljivkami procesa. Z identifikacijskim postopkom smo dobili prenosne funkcije G_{xy} , ki sestavljajo prenosno funkcijo G procesa (enačba 8.4).

$$\begin{bmatrix} P \\ KI \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \\ G_{31} & G_{32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H \\ KS \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \\ G_{31} & G_{32} \end{bmatrix} \quad (8.15)$$

Pri identifikaciji predpostavljamo, da imamo linearen multivariabilen proces. V prvem eksperimentu smo spreminjali *Hitrost proizvodnje* H pri konstantni *Kakovosti surovin* KS (slika 8-16), iz dobljenih podatkov smo nato identificirali prenosne funkcije $G_{11}=P(H)$, $G_{21}=KI(H)$ in $G_{31}=S(H)$, ki podajajo odvisnost posameznih pPI-jev od *Hitrosti proizvodnje*. V drugem eksperimentu smo spreminjali *Kakovost surovin* pri konstantni *Hitrosti proizvodnje* in identificirali še preostale tri prenosne funkcije $G_{12}=P(KS)$, $G_{22}=KI(KS)$ in $G_{32}=S(KS)$, ki podajajo odvisnost pPI-jev od *Kakovosti surovin*.



Slika 8-15: Prenosne funkcije G_{xy} podajajo odvisnost reguliranih spremenljivk (pPI) od manipulativnih spremenljivk



Slika 8-16: Odziv pPI-jev na spreminjajoči vhodni signal *Hitrost proizvodnje* pri konstantni *Kakovosti surovin*

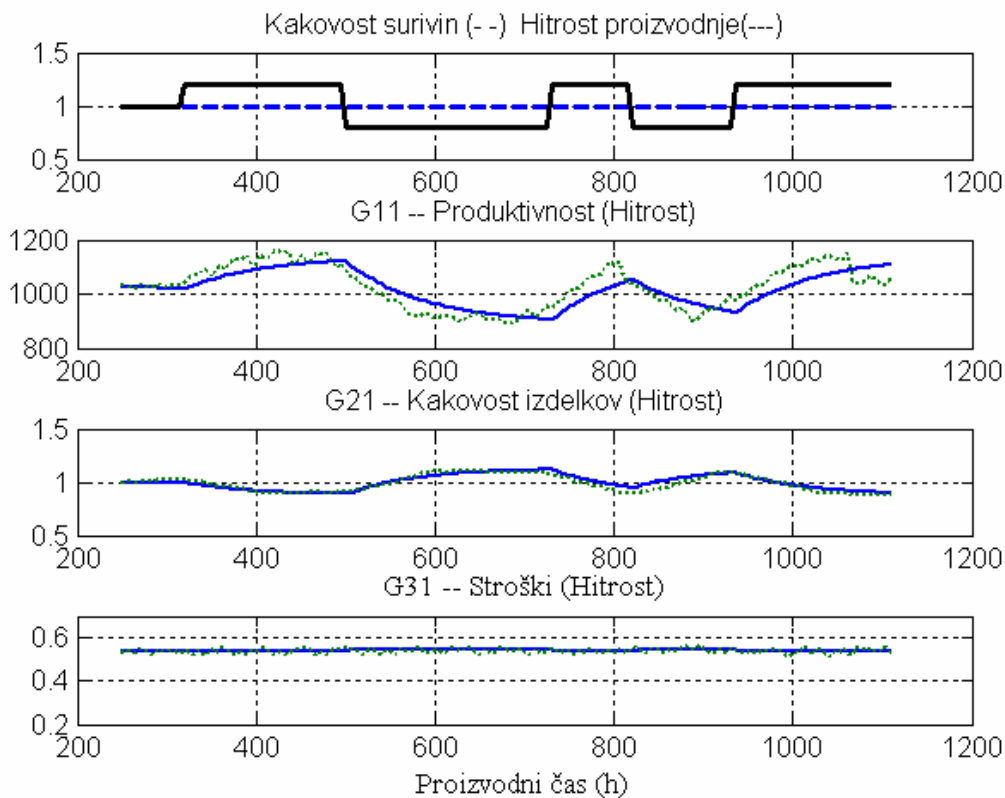
Za opis dinamičnega sistema prvega reda uporabimo prenosno funkcijo, ki jo podaja enačba (8.16).

$$G(z^{-1}) = \frac{Y(z^{-1})}{U(z^{-1})} = \frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} = \frac{b_1}{z + a_1} \quad (8.16)$$

Slika 8-16 prikazuje odziv pPI-jev na spreminjajočo se *Hitrost proizvodnje* za razpored opravil, ki določa monotono proizvodnjo. Čas vzorčenja (izračunavanja kazalnikov) T_S je bil 5 ur, časovno okno za izračunavanje kazalnikov T je bilo 100 ur in število vzorcev N je bilo 300. Z identifikacijo smo izračunali prenosne funkcije, ki jih podajajo enačbe od (8.17) do (8.19).

$$G_{11}(z) = P(H) = \frac{34.47}{z - 0.9444} \quad (8.17)$$

$$G_{21}(z) = KI(H) = \frac{-0.0395}{z - 0.9376} \quad (8.18)$$

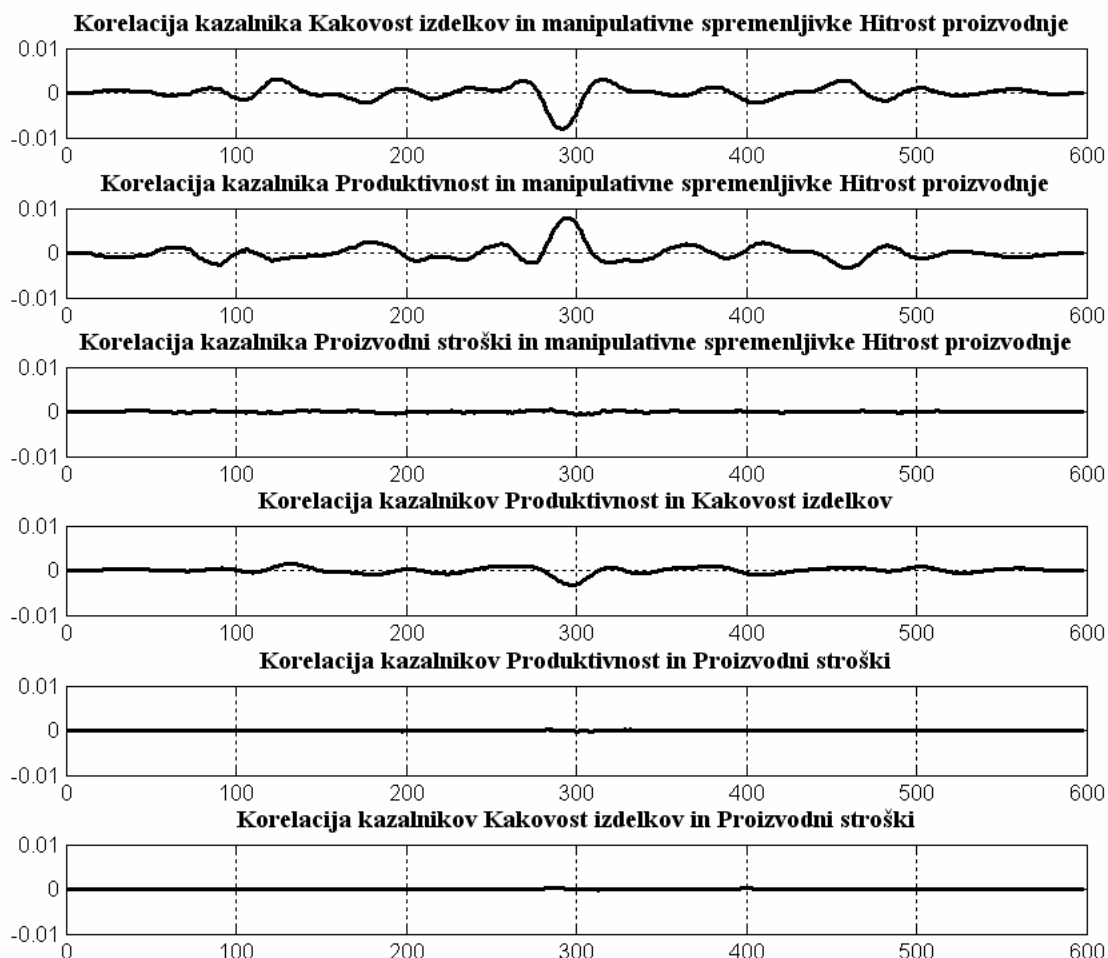


Slika 8-17: Validacija prenosnih funkcij G_{X1} , kjer primerjamo odzive modela z dejanskimi poteki pPI-jev pri spreminjanju *Hitrosti proizvodnje* in konstantni *Kakovosti surovin*

$$G_{31}(z) = S(H) = \frac{-0.008}{z - 0.0598} \quad (8.19)$$

Dobljeni model smo validirali na testni množici podatkov, ki je bila drugačna od učne množice podatkov in dobili odzive, ki jih prikazuje slika 8-17. Drugi, tretji in četrti diagram prikazuje odvisnost pPI-jev od *Hitrosti proizvodnje* pri konstantni *Kakovosti surovin*. Modre črte prikazujejo odzive modela, ki smo ga dobili z identifikacijo, zelene črte pa potek pPI-jev, ki smo jih dobili s simulacijo odziva proceduralnega modela proizvodnje.

Slika 8-18 prikazuje korelacijske funkcije med pPI-ji in manipulativno spremenljivko *Hitrost proizvodnje* (prvi trije diagrami) ter korelacijske funkcije med samimi pPI-ji. Iz slike je razvidno, da sta kazalnika *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov* močno korelirana z manipulativno spremenljivko *Hitrost proizvodnje* in posledično sta tudi ta dva kazalnika med seboj v manjši meri korelirana. Po drugi strani je kazalnik *Proizvodni stroški* na enoto izdelka slabo koreliran s *Hitrostjo proizvodnje* in posledično je ta kazalnik tudi slabo koreliran s preostalima kazalnikoma. Korelacijske funkcije veljajo za učno množico podatkov, ki jo prikazuje slika 8-16.



Slika 8-18: Korelacijske funkcije, ki jih dobimo med pPI-ji in manipulativno spremenljivko *Hitrost proizvodnje*

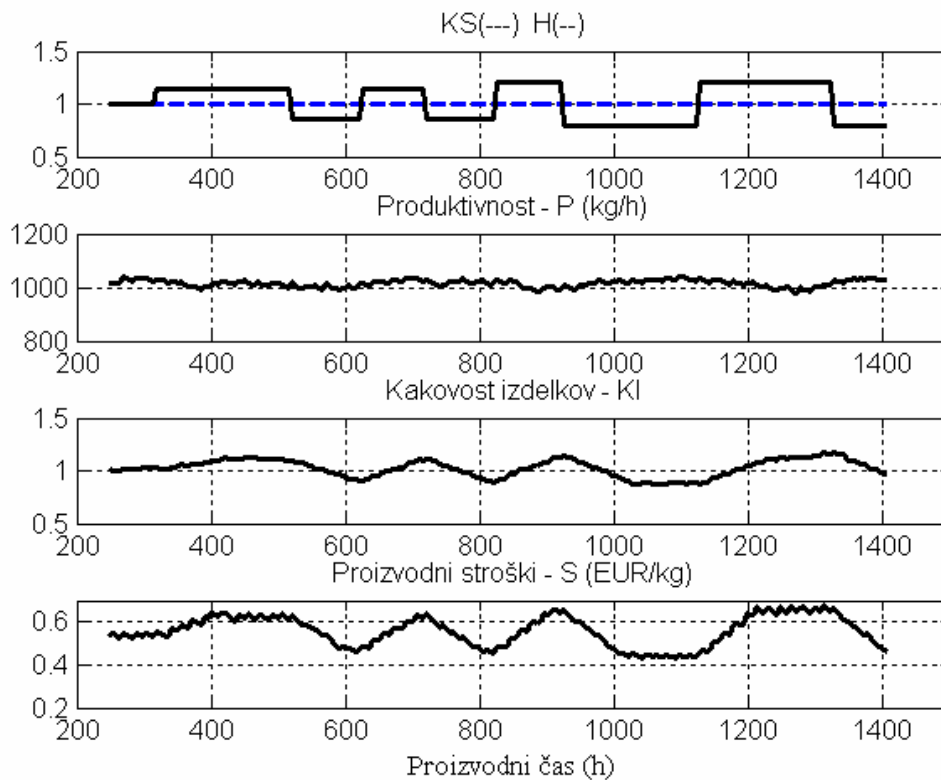
Na enak način, le da smo spreminjali *Kakovost surovin* pri konstantni *Hitrosti proizvodnje* (slika 8-19), smo identificirali še preostale tri prenosne funkcije G_{x2} (enačbe od (8.20) do (8.22)), ki podajajo odvisnost pPI-jev od *Kakovosti surovin*. Čas vzorčenja T_S je bil 5 ur, časovno okno T za izračunavanje kazalnikov je bilo 100 ur in število vzorcev N je bilo 232.

$$G_{12}(z) = P(K) = \frac{-5.3140}{z - 0.8091} \quad (8.20)$$

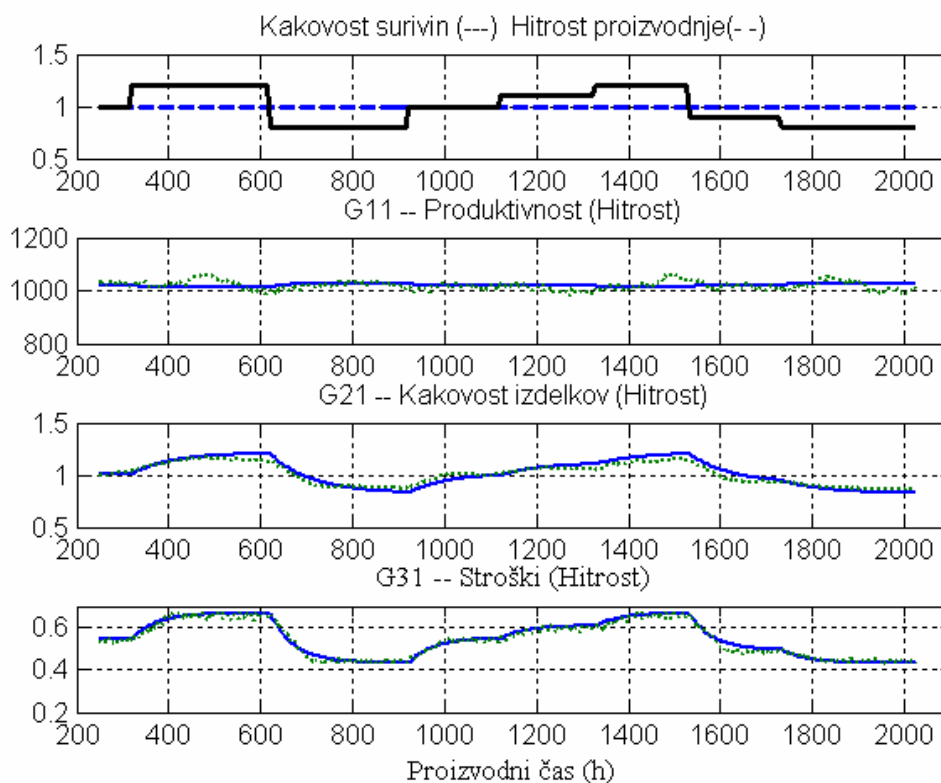
$$G_{22}(z) = KI(K) = \frac{0.05329}{z - 0.9455} \quad (8.21)$$

$$G_{32}(z) = S(K) = \frac{0.0545}{z - 0.9069} \quad (8.22)$$

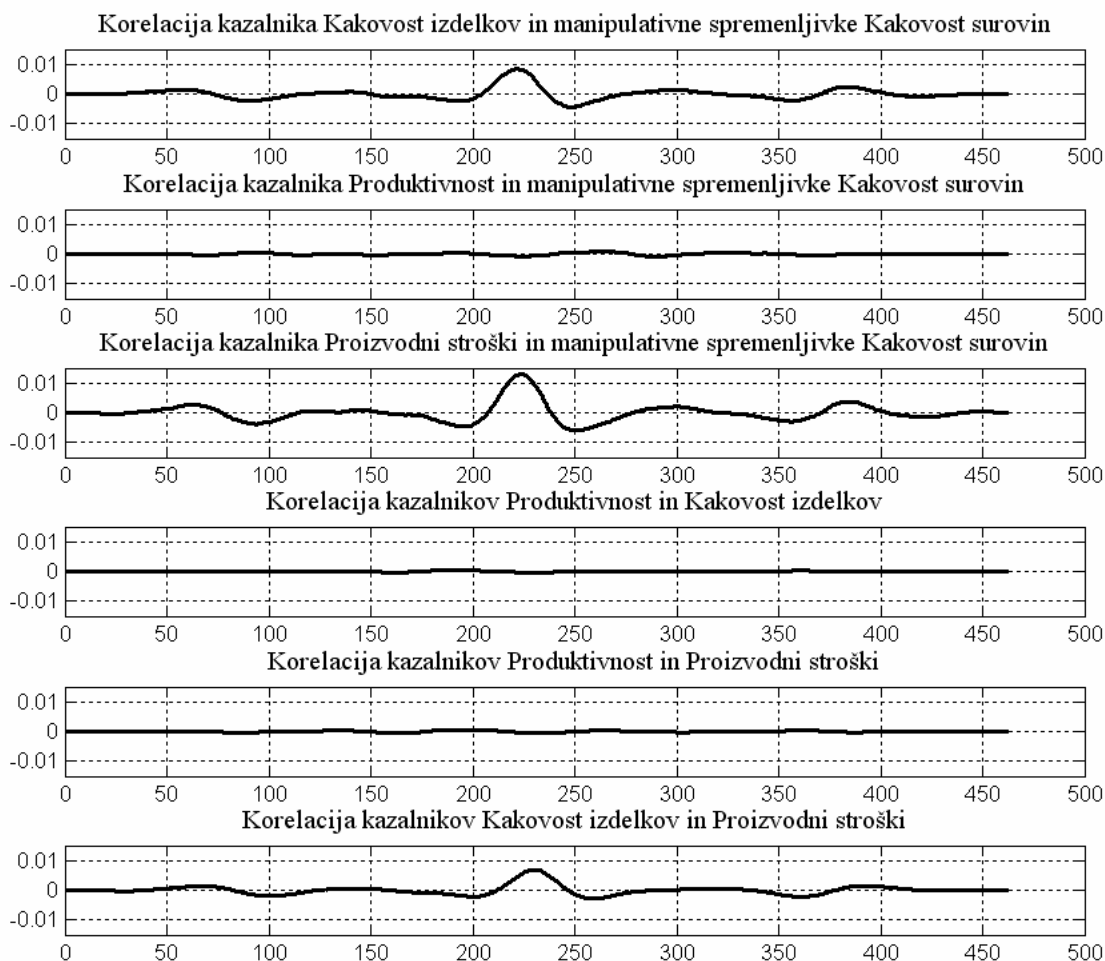
Slika 8-20 prikazuje validacijo modelov na testni množici podatkov, ki se je razlikovala od učne množice podatkov. Prikazani odzivi prikazujejo dobro ujemanje rezultatov modela s testnimi podatki.



Slika 8-19: Odziv pPI-jev na spreminjajoči vhodni signal *Kakovost surovin* in konstantno *Hitrost proizvodnje*



Slika 8-20: Validacija prenosnih funkcij G_{X2} , kjer primerjamo odzive modela z dejanskimi poteki pPI-jev pri spreminjanju *Kakovosti surovin* in konstantni *Hitrosti proizvodnje*

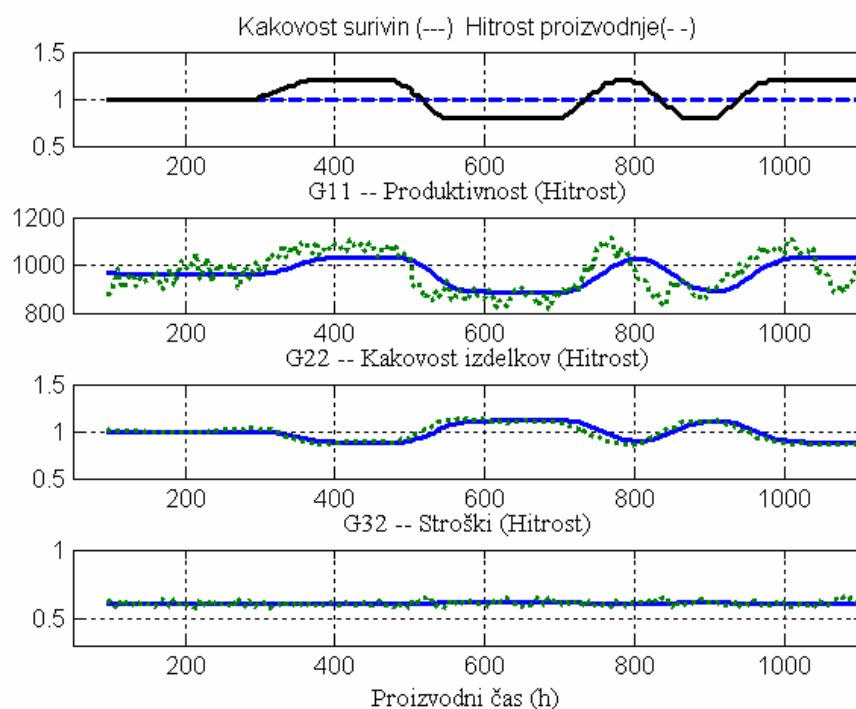


Slika 8-21: Korelacijske funkcije, ki jih dobimo med pPI-ji in manipulativno spremenljivko *Kakovost surovin*, ko spreminjamo *Kakovost surovin*, *Hitrost proizvodnje* pa je konstantna

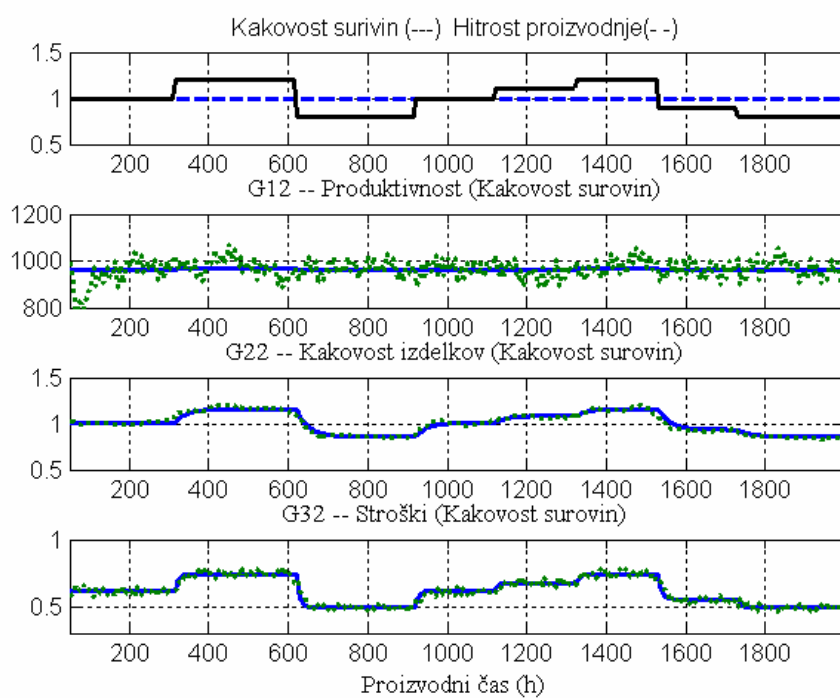
Slika 8-21 prikazuje korelacijske funkcije med pPI-ji in manipulativno spremenljivko *Kakovost surovin* (prvi trije diagrami) ter korelacijske funkcije med samimi pPI-ji. Iz slike je razvidno, da sta kazalnika *Kakovost izdelkov* in *Stroški proizvodnje* močno korelirana z manipulativno spremenljivko *Kakovost surovin* in posledično sta tudi ta dva kazalnika med seboj v manjši meri korelirana. Korelacijske funkcije veljajo za učno množico podatkov, ki jo prikazuje slika 8-19.

Enačbe od (8.17) do (8.22) tako sestavljajo dinamičen model prvega reda, ki opisuje odvisnost pPI-jev na spremembe manipulativnih spremenljivk, in sicer v eni delovni točki (monotona proizvodnja treh vrst izdelkov na treh reaktorjih, *Hitrost proizvodnje*=1 in *Kakovost surovin*=1).

Postopek identifikacije smo izvedli še za krajše časovno okno $T=50\text{h}$, prenosne funkcije pa podaja enačba (8.23). Za identifikacijo prenosnih funkcij G_{x1} smo uporabili 118 točk, medtem ko smo za identifikacijo prenosnih funkcij G_{x2} uporabili 139 točk.



Slika 8-22: Validacija prenosnih funkcij G_{X1} za časovno okno izračunavanja kazalnikov $T=50h$



Slika 8-23: Validacija prenosnih funkcij G_{X2} za časovno okno izračunavanja kazalnikov $T=50h$

$$\begin{bmatrix} P \\ KI \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \\ G_{31} & G_{32} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H \\ KS \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{92.17}{z-0.7499} & \frac{6.796}{z-0.4658} \\ \frac{-0.1287}{z-0.7823} & \frac{0.1137}{z-0.8486} \\ \frac{-0.0165}{z-0.148} & \frac{0.2956}{z-0.5164} \end{bmatrix}, T_S=5h \quad (8.23)$$

Sliki 8-22 in 8-23 prikazujeta ujemanje signalov, dobljenih z identificiranim modelom, z učnimi signali, ki predstavljajo pPI-je. Opazimo, da je ujemanje med modelom in dejanskimi podatki za kazalnik *Produktivnost* nekoliko slabše, kot smo ga dobili v primeru časovnega okna 100h.

8.7 Ustreznost pPI-jev za samooptimizirajoče vodenje proizvodnje

V poglavju 5.1.1 smo definirali pogoje, katerim morajo ustrezati regulirane spremenljivke, ki jih želimo uporabiti v samooptimizirajočem sistemu vodenja. V poglavju 9 bomo podrobneje predstavili regulacijsko shemo, iz katere bo razvidno, da se kazalnik *Proizvodni stroški* uporablja na nivoju optimizacije proizvodnje, medtem ko se za doseg želene stroškovne učinkovitosti proizvodnje uporablja kazalnika *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov*.

V prvi vrsti morajo biti optimalne referenčne vrednosti za regulirane spremenljivke, v našem primeru referenci za kazalnika *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov*, neobčutljivi na motnje. V ta namen najprej identificirajmo motnje, ki nastopajo v proizvodnji:

- zastoji (podrobneje obravnavani v poglavju 7.9.2)
- surovine slabe kakovosti
- zasedenost skladiščnih kapacitet

Zastoji predstavljajo manjše prekinitve v proizvodnji, ki so že upoštevani v proceduralnem modelu in ne predstavljajo bistvenih vplivov na izbiro referenčnih vrednosti za kazalnike. Kakovost surovin se preverja na vhodni kontroli in v primeru dobave takšne surovine se le-to zavrne. Surovine so po naravi obstojne in ne predstavljajo potencialnega tveganja, kot je to značilno npr. za živilsko industrijo. Tako se problem slabe surovine odrazi kot problem v dobavi surovine, ki se rešuje na nivoju planiranja proizvodnje in v sklopu predstavljene regulacijske sheme to sodi v področje optimizacije, ki jo izvaja vodja proizvodnje. Tudi problem zasedenosti skladiščnih kapacitet se rešuje na nivoju planiranja proizvodnje, ki ima za posledico drugačen razpored opravil in posledično drugačne referenčne vrednosti za kazalnike.

Naslednji pogoj za regulirane spremenljivke je enostavno merjenje in dobra vodljivost, kar smo v tem podpoglavju izčrpno predstavili. Tudi tretji pogoj, ki pravi, da morajo biti regulirane spremenljivke čim bolj občutljive na spremembe manipulativnih spremenljivk, je v našem primeru izpolnjen. Četrty pogoj zahteva, da je v primeru izbire več reguliranih spremenljivk potrebno zagotoviti slabo koreliranost le-teh. Na sliki 8-18 lahko vidimo, da sta kazalnika *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov* delno korelirana na spremembo hitrosti proizvodnje, na sliki 8-21 pa lahko opazimo delno koreliranost kazalnikov *Kakovost izdelkov* in *Proizvodni stroški* pri spreminjanju *Kakovosti surovin*. Koreliranost kazalnikov je manjša, kot je koreliranost kazalnikov z manipulativnimi spremenljivkami, tako da menimo, da je tudi ta pogoj zadovoljen.

9. Implementacija zaprtozančnega vodenja proizvodnje na modelu proizvodnje

Pri konstrukciji sistema za avtomatsko vodenje proizvodnje se soočamo z različnimi zahtevami, ki so povezane s spreminjajočimi se cilji vodenja proizvodnje kot tudi z raznolikostjo proizvodnje. Slednja je posledica različnih režimov delovanja, kot je npr. proizvodnja enega tipa izdelka na reaktorjih, menjavanje izdelkov na reaktorjih, omejena proizvodnja zaradi okvar (izpad reaktorja, pomanjkanje kapacitet za shranjevanje izdelkov) ali zaradi bolezni (omejeno število opravil, ki jih delavci lahko izvajajo v danem trenutku). Vsak režim delovanja je specifičen in se odraža v spremenjenih parametrih proizvodnega procesa, zato je za optimalno vodenje proizvodnje potrebno upoštevati te razlike.

Poleg tega optimalno vodenje proizvodnje lahko temelji na različnih kriterijih, kot so:

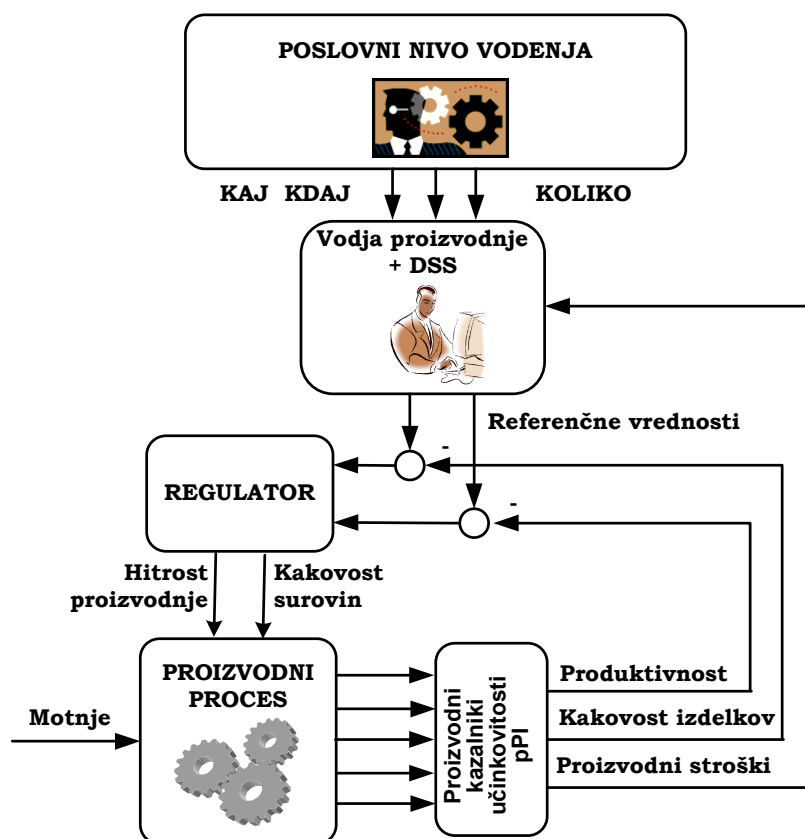
- maksimalni izplen
- maksimalna možna kakovost izdelkov
- minimalni stroški proizvodnje
- uravnotežena proizvodnja

Vsak kriterij obravnava proizvodni proces na drugačen način, saj se le-ti med seboj v določeni meri izključujejo. Tako proizvodnja z minimalnimi stroški ne proizvaja najbolj kakovostnih izdelkov, proizvodnja z maksimalnim izplenom pa ni najbolj prijazna do vseh potreb trga, ki zahteva veliko število različnih izdelkov dobre kakovosti v kratkem času, kar pomeni pogosto menjavanje izdelkov, ki se izdelujejo na posameznem reaktorju.

Opisane zahteve so si med seboj zelo različne, kar pomeni, da je pri realizaciji sistema za optimalno vodenje proizvodnje potrebno za različne režime delovanja uporabiti specifične odločitvene sisteme (regulatorje), vse skupaj pa nato povezati v enoten sistem vodenja. Opisana naloga je zelo kompleksna, namen tega dela pa ni rešiti vseh problemov vodenja, ki se pojavijo med samo implementacijo takšnih sistemov, pač pa predstaviti princip reševanja problema. V nadaljevanju bom predstavil zaprtozančni sistem vodenja proizvodnje, ki temelji na uporabi dveh različnih vrst regulatorjev.

9.1 Regulacijska shema zaprtozančnega vodenja proizvodnje

Pri preučevanju različnih režimov delovanja ugotovimo, da nastopajo določene poenostavitve, ko imajo nekatere manipulativne spremenljivke omejeno ali definirano vrednost. Npr. proizvodnja izdelkov z maksimalno kakovostjo zahteva uporabo dobrih surovin, nizko hitrost proizvodnje in takšen raspored opravil, v katerem imamo čim manjše menjavanje izdelkov na reaktorjih ter pogosto pranje reaktorjev. Vodenje takšnega procesa ni problematično, saj so manipulativne spremenljivke vnaprej znane in omejene, potrebno je predvsem definirati ustrezen raspored opravil. Proizvodnja z maksimalno produktivnostjo zahteva proizvodnjo s čim večjo hitrostjo, čim manjše menjavanje izdelkov na reaktorjih, ne preveč pogosto pranje reaktorjev in uporabo surovin srednje kakovosti. Pri takšni proizvodnji imamo vnaprej definirane ali omejene vrednosti manipulativnih spremenljivk. Ekonomsko najbolj učinkovita proizvodnja nadalje zahteva uporabo čim cenejših surovin, hitro proizvodnjo in raspored opravil, v katerim je čim manjše menjavanje izdelkov in minimalno število pranj reaktorjev. Poznamo pa tudi primer vodenja proizvodnje z določenimi proizvodnimi stroški, ki ga bomo podrobneje obravnavali v nadaljevanju.

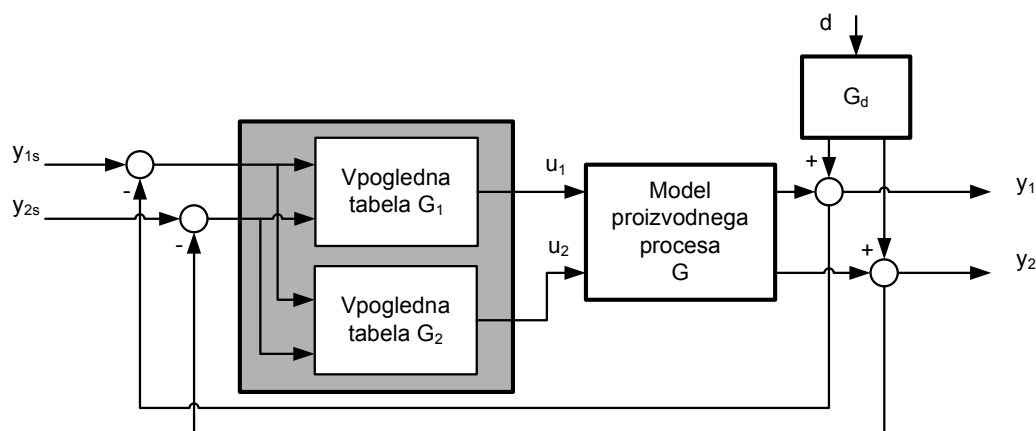


Slika 9-1: Shema zaprtozančnega vodenja proizvodnje z dvema regulacijskima nivojema, kjer v zgornji regulacijski zanki vodja proizvodnje postavlja referenčne vrednosti za pPI-je v spodnji regulacijski zanki, ki jih avtomatsko regulira regulator

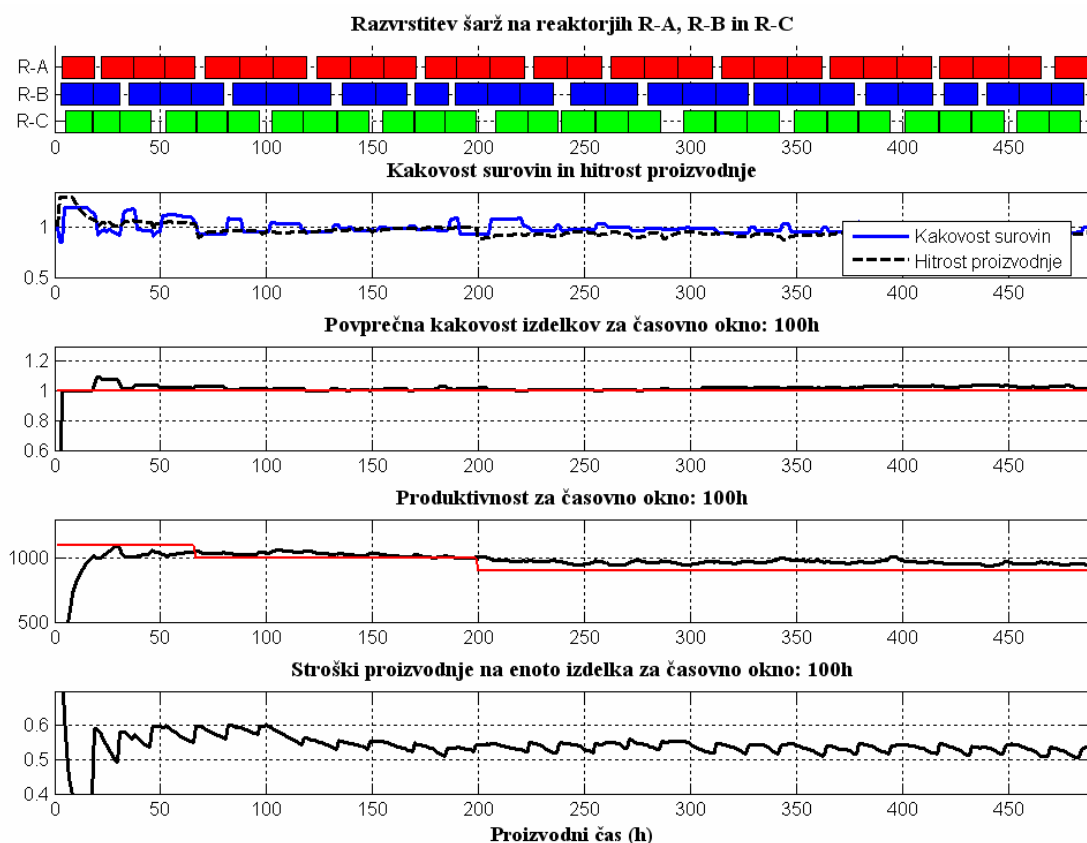
Slika 8-12 prikazuje relacije med kazalniki *Stroški proizvodnje*, *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov* za proizvodnjo treh izdelkov, kjer se na posameznem reaktorju proizvaja samo en tip izdelka. Slika 8-14 prikazuje enako odvisnost za primer zelo raznovrstne proizvodnje, kjer se izdelki, ki se izdelujejo na posameznem reaktorju, stalno menjavajo. V primeru, ko fiksiramo stroške proizvodnje, s tem omejimo tudi vrednosti za preostala dva kazalnika. Vodja proizvodnje glede na želene cilje vodenja proizvodnje (zahteve s poslovnega nivoja, vrsta proizvodnje in režim delovanja, proizvodni stroški) in trenutno situacijo v proizvodnji predpiše referenčni vrednosti za kazalnika *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov*. V nadaljevanju regulator, ki je lahko realiziran z vpoglednimi tabelami (angl. *look-up table*) ali prediktivnim regulatorjem na osnovi modela (angl. *Model Predictive Control MPC*), vodi proizvodnjo, tako da spreminja regulirni spremenljivki *Hitrost proizvodnje* in *Kakovost surovin* in tako regulira opazovana pPI-ja na predpisani referenčni vrednosti. Shema opisanega sistema zaprtozančnega vodenja proizvodnje za proces polimerizacije prikazuje slika 9-1.

9.2 Vodenje z regulatorjem na osnovi vpoglednih tabel

Regulator, ki je osnovan na vpoglednih tabelah, ponazarja delovanje vodje proizvodnje v eni delovni točki procesa. Regulator vsebuje dve vpogledni tabeli, kjer prva tabela na podlagi regulacijskega pogreška upravlja *Hitrost proizvodnje* (u_1), druga pa *Kakovost surovin* (u_2), kot to ponazarja slika 9-2. Tabele so bile definirane na podlagi ekspertnega znanja tehnologov in vodje proizvodnje in na podlagi prej opisanih analiz občutljivosti modela proizvodnega procesa v eni delovni točki (*Produktivnost* $y_1 = 1000$ kg/h in *Kakovost izdelkov* $y_2 = 1$). Prvi diagram na sliki 9-3 prikazuje razpored šarž, ki so se med eksperimentom izvedle na reaktorjih, drugi diagram prikazuje potek manipulativnih spremenljivk, tretji in četrti diagram prikazujeta potek pPI-jev *Kakovost*



Slika 9-2: Regulator na osnovi vpoglednih tabel



Slika 9-3: Prvi diagram prikazuje razvrstitev šarž na reaktorjih R-A, R-B in R-C tekom eksperimenta, drugi diagram prikazuje potek manipulativnih spremenljivk, zadnji trije pa potek reguliranih spremenljivk – pPI-jev s pripadajočimi referenčnimi vrednostmi.

izdelkov in *Produktivnost* vključno z referenčnimi vrednostmi, zadnji diagram pa potek PI-ja *Proizvodni stroški*. Med eksperimentom smo zmanjšali referenčno vrednost za *Produktivnost*. Regulator dobro deluje v delovni točki, za katero je bil skonstruiran (*Produktivnost* = 1000, *Hitrost proizvodnje* = 1), medtem ko v drugih delovnih točkah (npr. *Produktivnost* = 900, *Hitrost proizvodnje* = 1) pa nastopa pogrešek v ustaljenem stanju. Boljše rezultate bi lahko dosegli z uporabo mehke logike, s katero bi povezali med seboj več regulatorjev za različne delovne točke. Namen opisanega regulatorja je bil preveriti smiselnost uporabe predstavljenega koncepta zaprtozančnega vodenja, zato smo levji delež naporov usmerili v konstrukcijo regulatorja MPC.

9.3 Vodenje z regulatorjem MPC

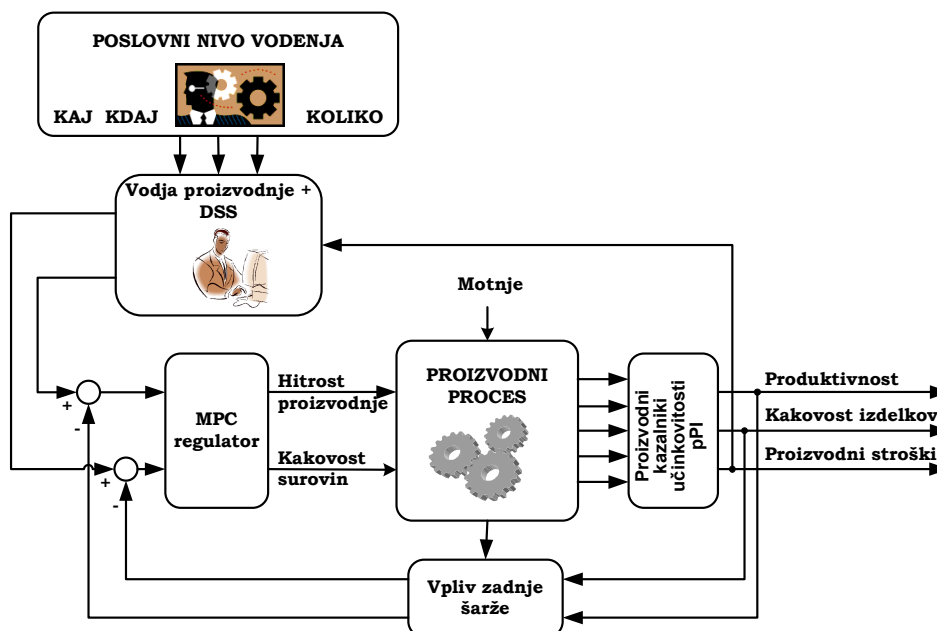
Z identifikacijo modela proizvodnje (poglavje 8.6) smo dobili matematični opis proizvodnega procesa v obliki prenosne funkcije. Matematični model procesa je omogočil konstrukcijo prediktivnega regulatorja na osnovi modela MPC in nadalje vodenje proizvodnega procesa. Regulator MPC lahko uporabimo za vodenje multivaribilnih proizvodnih procesov, saj upošteva interakcije med več vhodi, fizične

omejitve za manipulativne in regulirane spremenljivke in po potrebi vzdržuje vrednosti teh spremenljivk v bližini vnaprej določenih optimalnih vrednosti. Regulatorji MPC so zasnovani za reševanje problemov s takšno problematiko (Morari in Lee, 1999; Qin in Badgwell, 2003), poleg tega so bili tudi precej dobro obdelani s strani različnih raziskovalcev (Škrjanc in drugi, 2004).

Za konstrukcijo regulatorja MPC smo torej uporabili poenostavljen dinamičen model 1. reda za proizvodni proces z dvema vhodoma in dvema izhodoma, ki smo ga dobili pri analizi občutljivosti pPI-jev (enačbe 8.6, 8.7, 8.9 in 8.10). Prenosno funkcijo G za vzorčni čas 5 ur in časovno okno izračunavanja kazalnikov 100 ur podaja enačba (9.1). Regulator MPC smo skonstruirali z uporabo orodjarne MPC v okolju Matlab (Zorzut in drugi, 2006, 2009a, 2009b; Jovan in Zorzut, 2006; Jovan in drugi, 2006).

$$\begin{bmatrix} P \\ KI \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H \\ KS \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} \frac{34.47}{z-0.9444} & \frac{-5.314}{z-0.8091} \\ \frac{-0.0395}{z-0.9376} & \frac{0.0533}{z-0.9455} \end{bmatrix}, T_s=5h \quad (9.1)$$

Največji izziv je predstavljalo ugaševanje regulatorja MPC, tako da je lahko upošteval vse zahteve in omejitve procesa. Ker izhodni signali niso normirani, je potrebno uporabiti različne uteži pri izračunavanju kriterijske funkcije, ki se uporablja za optimizacijo proizvodnje. Optimalno vodenje proizvodnje zahteva počasno spreminjanje manipulativnih spremenljivk in njihovo zadrževanje v sredini delovnega



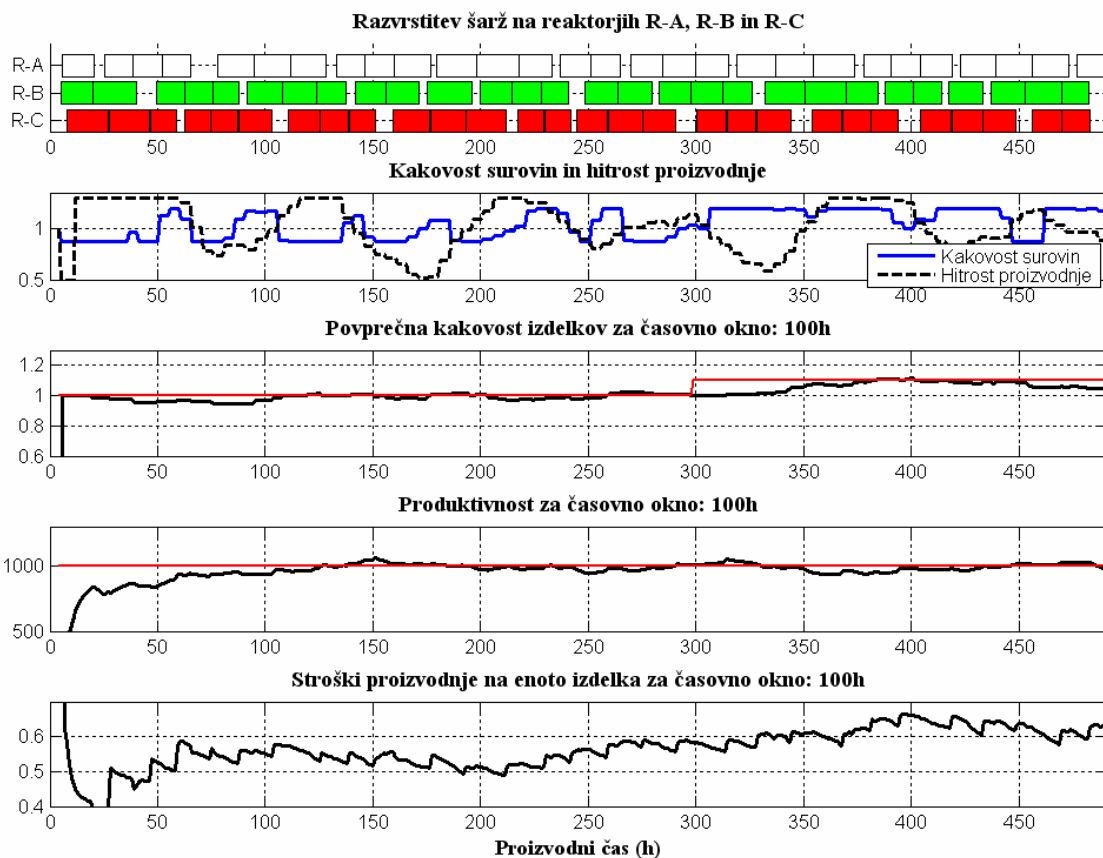
Slika 9-4: Zaprtozančna regulacijska shema z uporabo MPC regulatorja in popravljenimi pPI-ji, pri katerih je poudarjena zadnja šarža

Tabela 9-1: Vrednosti parametrov MPC regulatorja pri vodenju z uporabo pPI-jev s časovnim oknom izračunavanja $T=100h$

Prameter	Opis	Vrednost
T_S	Čas vzorčenja	5 h
T_P	Prediktivni interval	100 h
T_V	Interval vpliva	40 h
P_{MIN}	Minimalna vrednost pPI-ja Produktivnost	700 (kg/h)
P_{MAX}	Maksimalna vrednost pPI-ja Produktivnost	1300 (kg/h)
KI_{MIN}	Minimalna vrednost pPI-ja Kakovost izdelkov	0.87
KI_{MAX}	Maksimalna vrednost pPI-ja Kakovost izdelkov	1.3
H_{MIN}	Minimalna vrednost vhoda Hitrost proizvodnje	0.5
H_{MAX}	Maksimalna vrednost vhoda Hitrost proizvodnje	1.3
KS_{MIN}	Minimalna vrednost vhoda Kakovost surovin	0.85
KS_{MAX}	Maksimalna vrednost vhoda Kakovost surovin	1.2
H_{TARGET}	Želena vrednost za vhod Hitrost proizvodnje	1
KS_{TARGET}	Želena vrednost za vhod Kakovost surovin	1
$P_{UTEŽ}$	Utež za pPI Produktivnost	0.3
$KI_{UTEŽ}$	Utež za pPI Kakovost izdelkov	300
$H_{UTEŽ}$	Utež za vhod Hitrost proizvodnje	7
$KS_{UTEŽ}$	Utež za vhod Kakovost surovin	15
$P_RATE_{UTEŽ}$	Utež za hitrost spreminjanja vhoda Hitrost proizvodnje	100
$KS_RATE_{UTEŽ}$	Utež za hitrost spreminjanja vhoda Kakovost surovin	70

območja, kar smo dosegli z ustreznimi utežmi za posamezne manipulativne spremenljivke. Poleg tega smo postavili tudi omejitve za manipulativne in regulirane spremenljivke. Za uspešno optimizacijo vodenja smo izbrali prediktivni interval 100 ur (angl. *prediction horizon*) in interval vpliva 40 ur (angl. *control horizon*). Orodjarna MPC uporablja reševalnik na osnovi kvadratičnega programiranja (angl. *Quadratic Programming Solver*) za reševanje optimizacijskih problemov s končnimi mejami. Vse parametre regulatorja podaja tabela 9-1.

Pri uglaševanju regulatorja MPC smo se soočili z dejstvom, da pPI-ji vsebujejo preveč pretekle informacije in tako se regulator ne uspe odzivati na trenutne dogodke v proizvodnji pravočasno, kar se kaže v oscilacijah manipulativnih in reguliranih spremenljivk. Krajše časovno okno se sicer hitreje odziva na spremembe v proizvodnji, vendar so ocene, ki jih s takšnimi kazalniki dobimo, zaradi velike časovne konstante posamezne šarže (15 ur) in posledično majhnem številu šarž, ki so zajete v izračun kazalnikov, slabše. Pri reševanju te problematike smo pristopili tako, da smo pri izračunu kazalnikov dodatno upoštevali zadnjo izdelano šaržo. Opisano korekcijo smo izvedli tako, da smo kazalniku *Kakovost izdelkov* prišteli z utežnostnim faktorjem pomnoženo razliko med kakovostjo zadnje šarže in vrednostjo kazalnika. Kazalnik

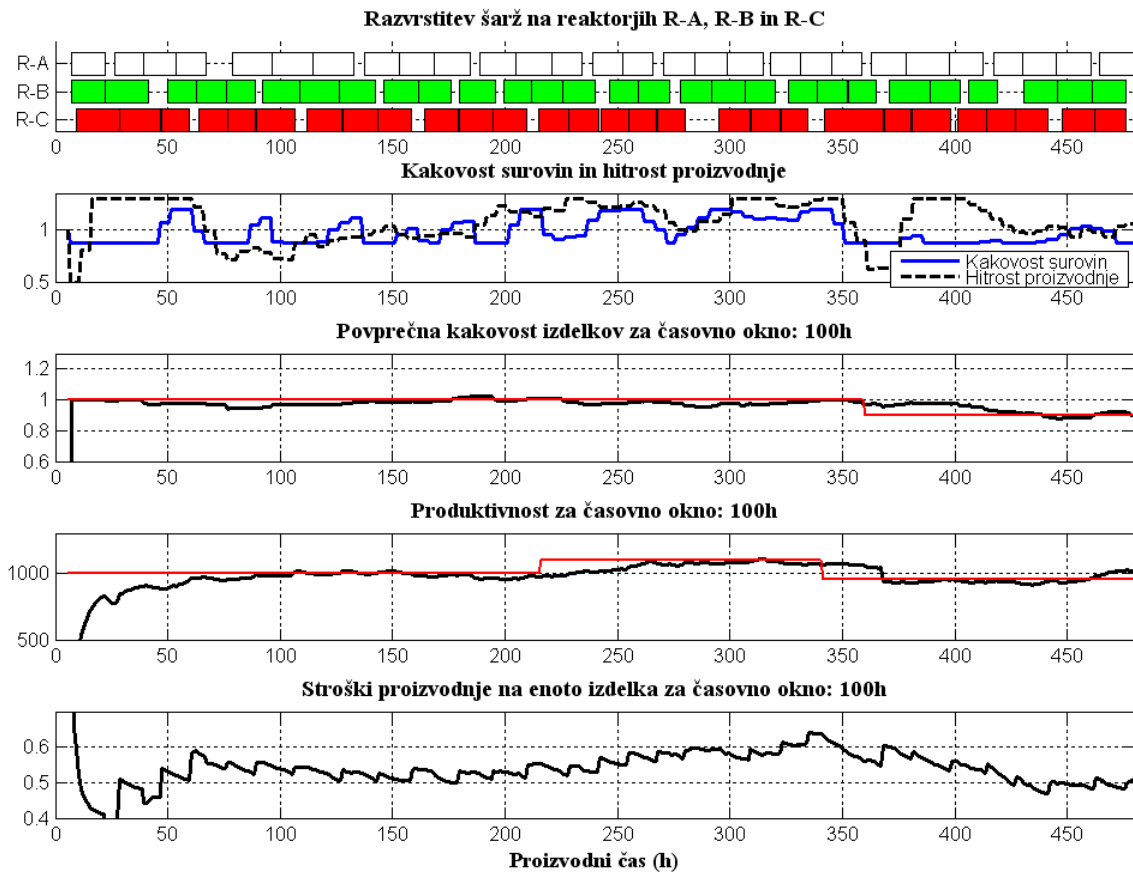


Slika 9-5: Prvi diagram prikazuje razvrstitev šarž na reaktorjih R-A, R-B in R-C tekom eksperimenta, drugi diagram prikazuje potek manipulativnih spremenljivk, zadnji trije pa potek pPI-jev s pripadajočimi referenčnimi vrednostmi.

Produktivnost smo korigirali tako, da smo mu prišteli z utežnostnim faktorjem pomnoženo razliko med kazalnikom in oceno za kazalnik *Produktivnost*, ki je bila izračunana s četrtinskim časovnim oknom glede na časovno okno kazalnikov.

Zaprtozančno vodenje z uporabo regulatorja MPC je bilo uporabljeno v številnih simulacijskih tekih, pri čemer bodo prikazani samo karakteristični, ki prikazujejo obnašanje proizvodnega procesa pri prehajanju med različnimi delovnimi točkami. Delovne točke spreminjamo s spreminjanjem referenčnih vrednosti za kazalnike in s spreminjanjem razvrstitve opravil, ki se izvajajo v proizvodnem procesu.

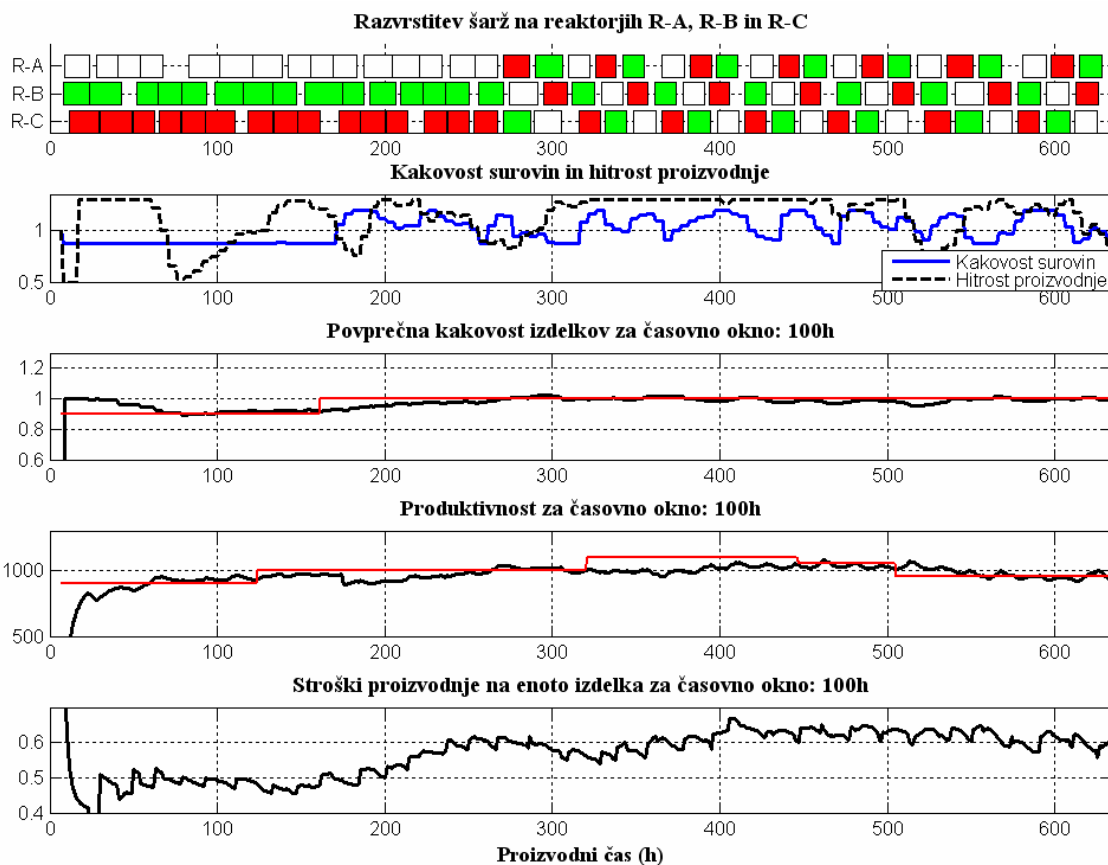
Slika 9-5 prikazuje potek manipulativnih spremenljivk in pPI-jev pri spremembi referenčne vrednosti za kazalnik *Kakovost izdelkov* z 1 na 1.1. V eksperimentu se je izvajal normalen razpored opravil, kjer so se proizvajali trije izdelki, vsak na svojem reaktorju. MPC regulator je uspel izregulirati kazalnika *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov* na referenčne vrednosti. S povečevanjem kazalnika *Kakovost izdelkov* se povečujejo tudi stroški proizvodnje, ki jih prikazuje kazalnik *Proizvodni stroški*.



Slika 9-6: Prvi diagram prikazuje razvrstitev šarž na reaktorjih R-A, R-B in R-C tekom eksperimenta, drugi diagram prikazuje potek manipulativnih spremenljivk, zadnji trije pa potek pPI-jev s pripadajočimi referenčnimi vrednostmi.

Slika 9-6 prikazuje primer, ko najprej spremenimo referenco za kazalnik *Produktivnost* iz 1000 na 1100 kg/h. Regulator s povečanjem hitrosti proizvodnje izregulira kazalnik na novo referenco, hkrati pa ohrani kazalnik *Kakovost izdelkov* na svoji referenčni vrednosti. V nadaljevanju imamo spremembo referenčne vrednosti za kazalnik *Kakovost izdelkov* iz 1 na 0.9 in spremembo reference za kazalnik *Produktivnost* s 1100 na 950. Tudi v tem primeru je regulator uspešno opravil svoje delo. Da kazalniki dosežejo novo vrednost, je potreben čas prehoda, ki znaša okrog 50 h. Potrebna je proizvodnja nekaj šarž, da se to odrazi na kazalniku s časovnim oknom 100 h in iz tega vidika je opisana dinamika popolnoma razumljiva.

Slika 9-7 prikazuje primer, kjer se med poskusom spremeni razvrstitev opravil v proizvodnji – prehod iz monotone v raznovrstno proizvodnjo, kjer se na reaktorjih izdelki stalno menjajo. Na sredini poskusa je referenca za kazalnik *Produktivnost* zelo visoka in znaša 1100 kg/h. Kljub temu da je *hitrost proizvodnje* skoraj celoten čas na maksimalni vrednosti, opazovani kazalnik *Produktivnost* ne uspe doseči predpisane referenčne vrednosti. Če se vrnemo nazaj in si natančneje pogledamo sliko 8-14, ki prikazuje tlorisni pogled na *Proizvodne stroške* v odvisnosti od *Produktivnosti* in *Kakovosti izdelkov*, opazimo, da je referenca za *Produktivnost* postavljena izven



Slika 9-7: Prvi diagram prikazuje razvrstitev šarž na reaktorjih R-A, R-B in R-C tekom eksperimenta za primer, ko se razvrstitev opravi med poskusom spremeni. Drugi diagram prikazuje potek manipulativnih spremenljivk, zadnji trije pa potek pPI-jev s pripadajočimi referenčnimi vrednostmi.

definiranega območja delovanja proizvodnje. Regulator MPC je uspel doseči referenčne točke za regulirane pPI-je v preostalem delu eksperimenta. Opisani eksperiment dokazuje, da je skonstruirani regulator MPC dovolj robusten za vodenje proizvodnje z različnimi tipi razvrstitve opravil.

9.3.1 Primer vodenja z uporabo kazalnikov s krajšim časovnim oknom

V predhodnem izvajanju smo predstavili zaprtozančno vodenje proizvodnje, ki je temeljilo na uporabi kazalnikov, ki so se izračunavali s časovnim oknom 100 ur. V tem primeru se je izkazalo, da imata kazalnika *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov* preveč zgodovinske informacije za potrebe vodenja z uporabo regulatorja MPC. Opisani problem smo rešili z modifikacijo kazalnikov, tako da smo poudarili vpliv zadnjih šarž pri izračunu kazalnikov.

Naslednji pristop pri reševanju opisane problematike je uporaba kazalnikov, ki se izračunavajo s krajšim časovnim oknom, v tem primeru 50 ur. Ponovili smo postopek identifikacije proizvodnega procesa z uporabo kazalnikov s časovnim oknom 50 ur in

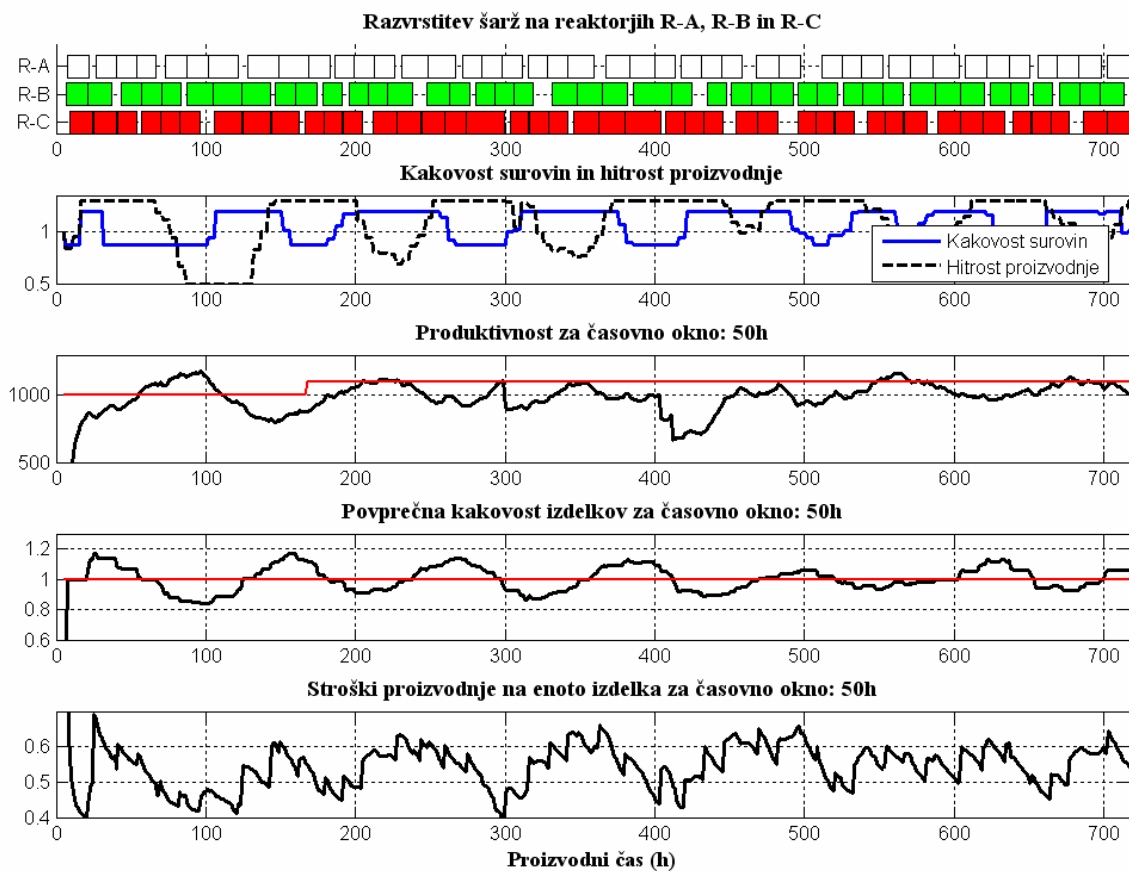
Tabela 9-2: Vrednosti spremenjenih parametrov MPC regulatorja pri vodenju z uporabo kazalnikov s časovnim oknom izračunavanja $T=50h$

Prameter	Opis	Vrednost
$H_{UTE\dot{Z}}$	Utež za vhod Hitrost proizvodnje	100
$KS_{UTE\dot{Z}}$	Utež za vhod Kakovost surovin	100
$P_{RATE}_{UTE\dot{Z}}$	Utež za hitrost spreminjanja vhoda Hitrost proizvodnje	20
$KS_{RATE}_{UTE\dot{Z}}$	Utež za hitrost spreminjanja vhoda Kakovost surovin	40

časom vzorčenja 5 ur in dobili prenosno funkcijo proizvodnega procesa G_I , ki jo podaja enačba (9.2).

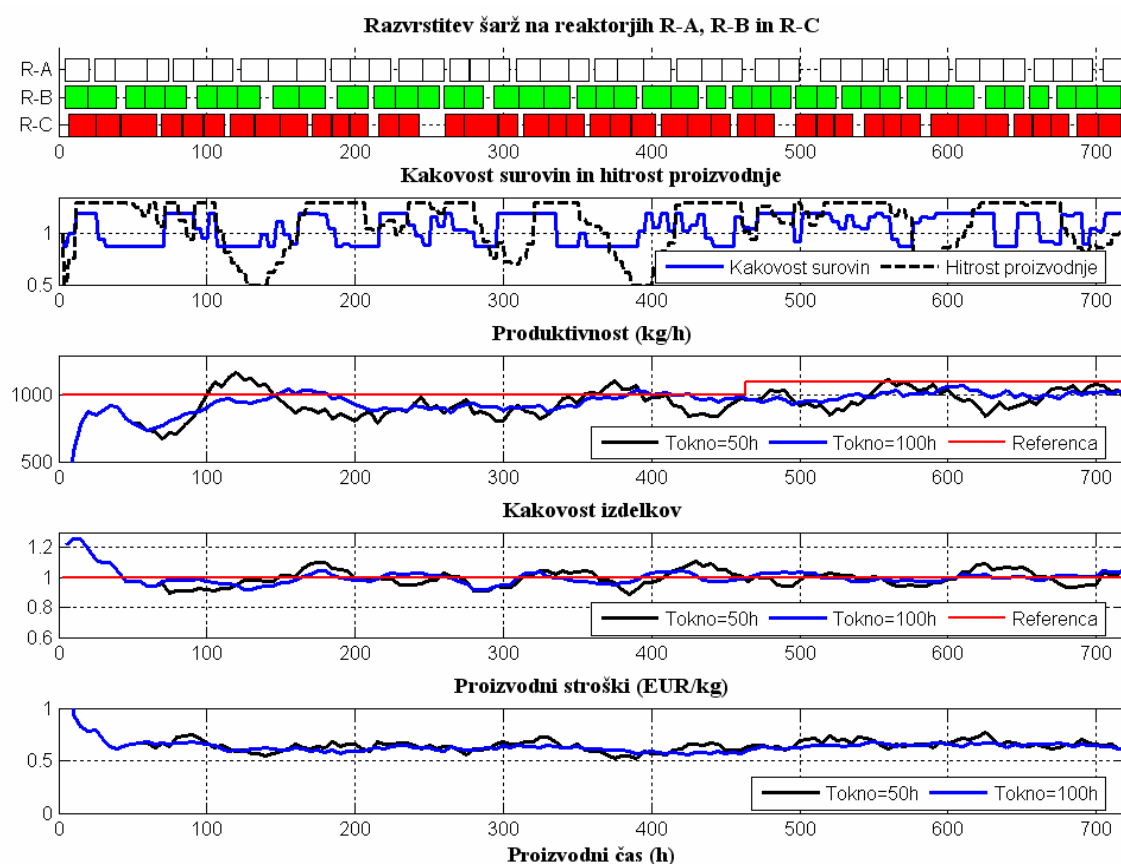
$$\begin{bmatrix} P \\ KI \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H \\ KS \end{bmatrix}, \quad G_I = \begin{bmatrix} \frac{92.17}{z-0.7499} & \frac{6.796}{z-0.4658} \\ -0.1287 & 0.1137 \\ z-0.7823 & z-0.8486 \end{bmatrix}, \quad T_s=5h \quad (9.2)$$

Opisani poenostavljen model proizvodnje smo nadalje uporabili pri načrtovanju regulatorja MPC, pri tem pa smo spremenili nekatere nastavitve parametrov, kot jih podaja tabela 9-2.

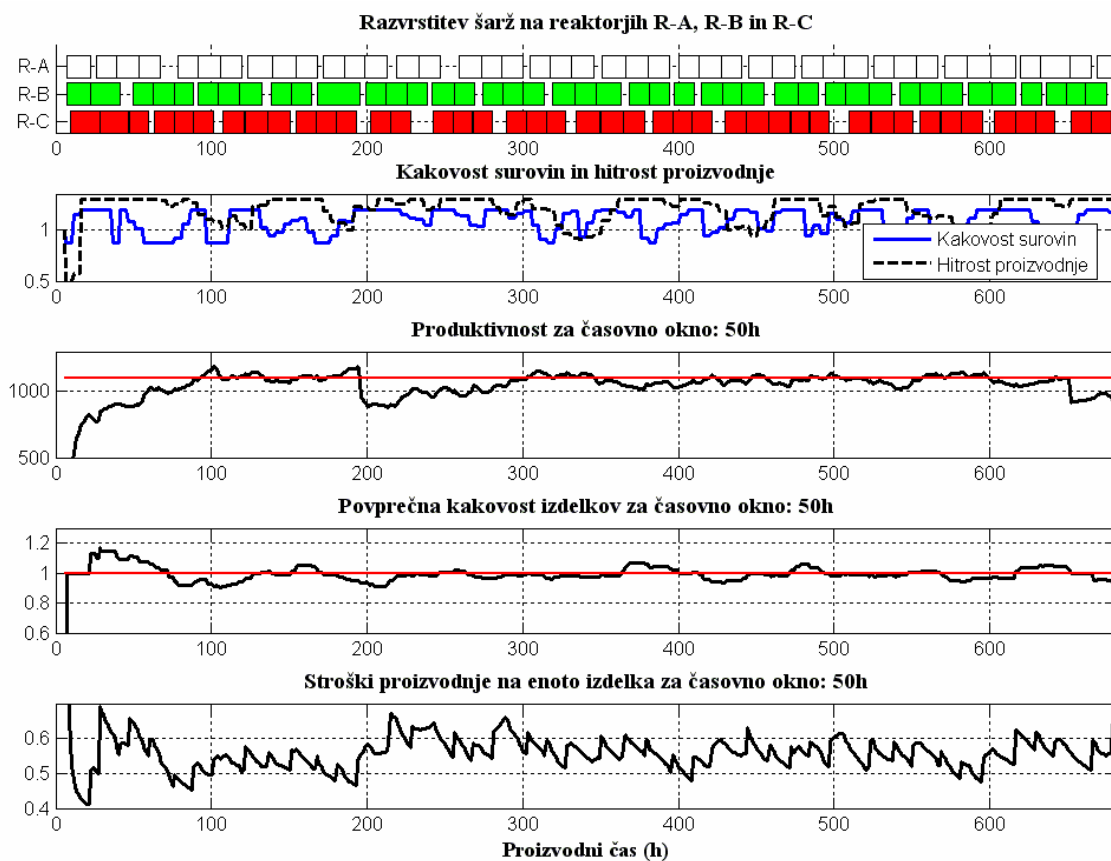
**Slika 9-8: Rezultati vodenja proizvodnje pri uporabi nemodificiranih pPI-jev s 50 urno časovno konstanto izračunavanja**

pPI-ji s 50-urnim časovnim oknom imajo večjo dinamiko kot kazalniki s 100-urnim časovnim oknom, saj se hitreje odzivajo na spremembe v proizvodnem procesu. Regulacija proizvodnje z uporabo kazalnikov s tako kratkim časovnim oknom je zato težja. Že zagotovitev razporeda opravil, ki bi bil dovolj homogen, da bi se kazalniki dovolj monotono spreminjali, predstavlja dokajšen problem. Poleg tega imajo na kazalnike zelo velik vpliv izredni dogodki, kot je slaba šarža, kar je lepo vidno na sliki 9-10 pri proizvodnem času 200 ur. Na splošno je bilo vodenje proizvodnje s kazalniki s krajšim časovnim oknom težavnejše v primerjavi z vodenjem z uporabo kazalnikov z daljšim časovnim oknom. Slika 9-8 prikazuje primer odziva regulatorja, ki je uporabljal še nemodificirane kazalnike s časovnim oknom 50 ur in še ni bil ustrezno uglašen. Na poteku manipulativnih spremenljivk in proizvodnih PI-jih so vidne močne oscilacije. To je pomenilo, da bo za uspešno regulacijo tudi v tem primeru potrebno uporabiti modificirane kazalnike.

Direktna primerjava odzivov, ki jih dobimo pri vodenju s pPI-ji z različnim časovnim oknom, ni relevantna, saj se vrednosti kazalnikov pri enakih proizvodnih podatkih med seboj razlikujejo. V ta namen smo na sliki 9-9 odzivom proizvodnih kazalnikov, izračunanim s časovnim oknom 50 ur, dodali še kazalnike, ki so se izračunavali s časovnim oknom 100 ur. Na sliki 9-9 je razvidno, da imajo kazalniki z večjim časovnim



Slika 9-9: Primerjava med kazalniki, ki so bili izračunani za časovno okno 50 in 100 ur



Slika 9-10: Rezultati vodenja pri uporabi modificiranih kazalnikov za časovno okno 50 ur

oknom manjša nihanja. Iz poteka kazalnikov je razvidno, da je regulacija z uporabo kazalnikov z manjšim časovnim oknom slabša, saj regulator ne uspe izregulirati kazalnike na zelene referenčne vrednosti v enaki meri, kot je to lahko zagotovil regulator MPC pri kazalnikih s časovnim oknom 100 ur. Iz opisane primerjave je razvidno, da je vodenje proizvodnje s kazalniki s krajšim časovnim oknom slabše.

10. Zaključek

V doktorski disertaciji obravnavamo problematiko vodenja in optimizacije proizvodnih procesov. Sistematičen pristop k tej problematiki obsega definicijo ciljev vodenja, izbiro in implementacijo ustreznih meril, ki opišejo stopnjo doseganja zastavljenih ciljev in uporabo teh meril v procesih vodenja. Na poslovnem nivoju vodenja so bili v zadnjih dveh desetletjih razviti številni sistemi, imenovani sistemi za merjenje učinkovitosti, ki na sistematičen način pristopajo k opisani problematiki. Cilje poslovanja opisujejo s pomočjo ključnih kazalnikov učinkovitosti KPI. V literaturi zasledimo pojav kazalnikov tudi na procesnem in proizvodnem nivoju vodenja, le da so na teh nivojih manj standardizirani in uveljavljeni.

Stroškovna optimizacija proizvodnih procesov temelji na minimizaciji proizvodnih stroškov, katere opišemo z ustrežno kriterijsko funkcijo. Algoritmi za optimizacijo takšnih procesov temeljijo na kompleksnih matematičnih modelih procesov in za svoje izračunavanje potrebujejo veliko računsko moč. Alternativni pristop k optimizaciji sistemov zasledimo v samooptimizirajočem vodenju, ki temelji na izbiri posebnih reguliranih spremenljivk, tako da z regulacijo le-teh na predpisano referenčno vrednost zagotovimo obratovanje sistema v optimalnem področju delovanja ali v njegovi bližnji okolici. Poleg tega z ustrežno hierarhijo regulacijskih nivojev, ki delujejo z različnimi časovnimi konstantami, dosežemo boljše transparentnost sistema in redukcijo kompleksnosti regulacijskega problema.

V doktorski disertaciji predstavljamo izgradnjo in validacijo proceduralnega modela realnega tehnološkega procesa polimerizacije, v okviru katerega smo nadalje zgradili sistem za izračunavanje in predstavitev kazalnikov pPI. Te kazalnike smo po principu samooptimizirajočega vodenja vključili v zaprtostančno regulacijsko shemo tehnološkega procesa polimerizacije. Na višjem nivoju vodenja vodja proizvodnje spremlja zahteve iz poslovnega nivoja vodenja, trenutne razmere v proizvodnem procesu in glede na želene stroške proizvodnje določa referenčni vrednosti za nižjenivojska kazalnika *Produktivnost* in *Kakovost surovin*. Nižjenivojska regulacijska zanka na osnovi regulatorja regulira izbrana kazalnika na predpisani referenčni vrednosti. Preizkusili smo regulator na osnovi vpoglednih tabel in prediktivni regulator na osnovi modela procesa MPC. Uporaba regulatorja MPC je dala boljše rezultate.

V doktorski disertaciji primerjamo kazalnike, ki za svoje izračunavanje uporabljajo različne časovne parametre. Izkazalo se je, da je za potrebe vodenja potrebno uporabiti modificirane kazalnike, v katerih so podatki iz bližnje preteklosti bolj poudarjeni od podatkov iz daljne preteklosti. Pri zaprtozančnem vodenju proizvodnje smo naredili primerjavo učinkovitosti vodenja pri uporabi kazalnikov z različnimi časovnimi parametri. Izkazalo se je, da je za potrebe vodenja bolje uporabiti kazalnike z dovolj velikim časovnim oknom, saj le tako kazalniki vsebujejo dovolj zgodovinske informacije, da prikazujejo le trende v proizvodnji in ne posamezne dogodke.

Samostojne in izvirne prispevke doktorske disertacije lahko povzamemo v naslednjih točkah:

- zasnova, validacija in izvedba modela tehnološkega procesa za proizvodnjo polimernih emulzij kot testne platforme za preizkušanje novih pristopov k vodenju proizvodnje, ki temelji na realnem šaržnem proizvodnem procesu,
- zasnova koncepta zaprtozančnega vodenja proizvodnje na temelju samooptimizirajočega vodenja, kjer nastopajo v vlogi reguliranih spremenljivk izbrani proizvodni kazalniki učinkovitosti pPI, vodja proizvodnje pa nastavlja primerne referenčne vrednosti na podlagi zahtev poslovnega nivoja in ob pomoči sistema za podporo odločanju,
- izvedba zaprtozančnega vodenja proizvodnje na modelu tehnološkega procesa za proizvodnjo polimernih emulzij ob uporabi dveh vrst regulatorjev: regulatorja na osnovi vpoglednih tabel in prediktivnega regulatorja na osnovi matematičnega modela procesa.

11. Reference

- Ahmad, M.M. in N. Dhafr (2002), Establishing and improving manufacturing performance measures, *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 18, str. 171–176.
- ARIS (2009), Spletni naslov: <http://pera.net/Methodologies/ARIS/ARIS.html>.
- Bernus, P. (1999), *GERAM: Generalised Enterprise Reference Architecture and Methodology*, Version 1.6.3, IFIP–IFAC Task Force on Architectures for Enterprise Integration.
- Berrah, L., G. Mauris, A. Haurat in L. Foulloy (2000), Global vision and performance indicators for an industrial improvement approach, *Computers in industry*, Vol. 43, str. 211-225.
- Brown, M. (2006), *Collaborative production management: a stepwise approach from key performance indicators to workflow processes*, *Hydrocarbon Processing*, str. 53-55.
- Cecelja, F. (2002), *Manufacturing Information & Data Systems*, Penton Press, London.
- Chen, D., B. Vallespir in G. Doumeingts (1997), GRAI integrated methodology and its mapping onto generic enterprise reference architecture and methodology, *Computers in Industry*, Vol. 33, N. 2-3, str. 387 – 394.
- DeBusk, G.K., R.M. Brown in L.N. Killough (2003), Components and relative weights in utilization of dashboard measurement systems like the Balanced Scorecard, *The British Accounting Review*, Vol. 35, N. 3, str. 215–231.
- Edgar, T.F. (2004), Control and operations: When does controllability equal profitability?. *Computers in Chemical Engineering*, Vol. 29, str. 41–49.
- Folan, P. in J. Browne (2005), A review of performance measurement: Towards performance management, *Computers in Industry*, Vol. 56, str. 663-680.
- Forza, C. in F. Salvador (2001), Information flow for high-performance manufacturing, *International Journal of Production Economics*, Vol. 70, str. 21–36.

- Frontini, G. in S. Kennedy (2003), *Manufacturing in Real-Time: A guide for Management and Engineers in an Age of Smart Machines*, Elsevier Science (USA).
- Fortuin, L. (1998), Performance indicators – Why, where and how, *European Journal of Operational Research*, Vol. 34, str. 1-9.
- Gerry, J. in G. Buckbee (2005), *The Link Between Automation KPIs and Enterprise KPIs*, ExpertTune, Plant Performance Supervision & PID Tuning Software, white paper.
- Gerry, J. in G. Buckbee (2006), The Link Between Automation and Enterprise KPIs: from chemicals and paper to petroleum, fast results generate big cost savings, *Control Engineering*, Vol. 53, N. 7, str. 9-12.
- Gordon, L. (2006), Proving Control System Performance: Identifying methods of measuring system performance against project goals can be as important as identifying the goals themselves, *Control Engineering*, Vol. 53, N. 7, str. 1-7.
- Gradišar, D. in G. Mušič (2006), *Standardi za informacijsko podporo vodenja proizvodnje*, delovno poročilo IJS-DP-9417, Institut Jožef Stefan, Ljubljana.
- Haji-Valizadeth, A. (2005), *Using Key Process Indicators in Prioritizing Control Loop Maintenance Activities*, Technology Development Manager ControlSoft Inc., Cleveland, OH 44143.
- Hales, H.L. (1989), *CIMPLAN - The systematic approach to factory automation*, Cutter Information Corp., Arlington, VA.
- Harel, D. in M. Politti (1998), *Modeling Reactive Systems with Statecharts: The STATEMATE Approach*, McGraw-Hill.
- Hammer, M. in J. Champy (1995), *Preurejanje podjetja – manifest revolucije v poslovanju*, Gospodarski vestnik, Ljubljana.
- Hauptman, B. (2004), *Razporejanje proizvodnje v procesni industriji*, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.
- Holt, K. (1999), Management and organization through 100 years, *Technovation*, Vol. 19, str. 135–140.
- Hvala, N., S. Strmčnik, D. Šel, S. Milanič in B. Banko (2005), Influence of model validation on proper selection of process models – an industrial case study. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 29, str. 1507-1522.
- ISA (2000), *ANSI/ISA-95.00.01-2000*, Enterprise - Control System Integration, Part 1: Models and Terminology, USA.
- Jovan, V. (1999), The Relationship between planning and production activities in process industries, *Proceedings of the 7th Mediterranean Conference on Control and Automation*, June 28–30, 1999, Haifa, Israel, str. 1982–1989.

- Jovan, V., J. Černetič in G. Dolanc (1998), Integration of business and production levels in process Industries. *INCOM'98 - Advances in industrial engineering: preprints of the 9th IFAC Symposium on Information Control in Manufacturing*, Nancy and Metz, France, June 24–26, 1998, vol. 3, str. 275–280.
- Jovan, V., (2001), The integration of management levels in process industries, *Proceedings of the Fifth Italian Conference on Chemical and Process Engineering*, ICheaP-5, Florence, Italy, May 20-23, 2001, vol. 1, str. 453-458
- Jovan, V., (2002), The specifics of Production Scheduling in process manufacturing, V: *IEEE ICIT'02 : 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology "Productivity reincarnation through robotics & automation"*: 11-14 December 2002, Shangri-La Hotel, Bangkok, Thailand. Piscataway: IEEE, 2002, zv. 2, str. 1049-1054.
- Jovan, V. in S. Zorzut (2006), Use of key performance indicators in production management, v: *2nd IEEE International Conference on Cybernetics & Intelligent Systems*, June 7-9, 2006, Bangkok, Thailand, str. 198-203.
- Jovan, V., S. Zorzut in A. Žnidaršič (2006), Utilization of key performance indicators in production control, v zborniku: *LEIVISKÄ, Kauko (ur.). ALSIS '06, 1st IFAC Workshop on Applications of Large Scale Industrial Systems*, August 30-31, 2006, Finland.
- Kaplan, R.S. in D.P. Norton (1992), The balanced scorecard – Measures that drive performance, *Harvard Business Review*, January–February, str. 71–79.
- Kaplan, R.S. in D.P. Norton (2000), *Uravnoteženi sistem kazalnikov: preoblikovanje strategije v dejanja*, Gospodarski vestnik, Ljubljana.
- Kinney, T. (2004), *Choosing performance assessments*, The Instrumentation, Systems and Automation Society, ISA (Jus).
- Lohman, C., L. Fortuin in M. Wouters (2004), Designing a performance measurement system: A case study, *European Journal of Operational Research*, Vol. 156, str. 267–286.
- Matko, D (1992), *Identifikacije*, 1. izd., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana.
- McClellan, M. (1997), *Applying Manufacturing Execution Systems*, CRC Press LLC.
- Mihelčič, M. (2000), *Poslovne funkcije*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko, Ljubljana.
- Mohorič, T. (1999), O podatku in informaciji, *Organizacija*, št. 8-9.
- Morari, M. in J.H. Lee (1999), Model predictive control: past, present and future, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 23, str. 667-682.

- Mušič, G. (1998), *Računalniško podprto načrtovanje nadzornih sistemov avtomatskega vodenja*, doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.
- Neely, A., M. Gregory in K. Platts (1995), Performance measurement system design: A literature review and research agenda, *International Journal of Operations & Production Management*, Vol. 15, N. 4, str. 80-116.
- Qin, S.J. in T.A. Badgwell (2003), A survey of industrial model predictive control technology, *Control Engineering Practice*, Vol. 11, str. 733-764.
- Rakar, A., S. Zorzut in V. Jovan (2004), Assessment of production performance by means of KPI, *Proceedings of the Control 2004*, 6–9 September, University of Bath, UK.
- Rizzoli, A.E. (2006), A Collection of Modelling and Simulation Resources on the Internet, Spletni naslov: <http://www.idsia.ch/~andrea/simtools.html>.
- Ruel, M. (2004), Identifying poor performers while the process is running, *ISA EXPO 2004*, Houston.
- Skinner, W. (1969), Manufacturing – missing link in corporate strategy, *Harvard Business Review*, May-June 1969.
- Skogestad, S. (2000), Self-optimizing control: The missing link between steady-state optimization and control, *Computers in Chemical Engineering*, Vol. 24, str. 569–575.
- Skogestad, S. (2004), Near-optimal operation by self-optimizing control: from process control to marathon running and business systems, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 29, str. 127-137.
- Stemberger, M. (2004), *Preobrazba podjetja: organizacijski, procesni in informacijski vidik*, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za Računalništvo in Informatiko, Ljubljana.
- Stephanopoulos, G. in C. Ng (2000), Perspectives on the synthesis of plant-wide control structures, *Journal of Process Control*, Vol. 10, str. 97–111.
- Strmčnik, S. (urednik) (1998), *Celostni pristop k računalniškemu vodenju procesov*, 1. izd., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana.
- Škrjanc, I., S. Blažič, S. Oblak in J. Richalet (2004), An approach to predictive control of multivariable time-delayed plant: stability and design issues. *ISA Transactions*, Vol. 43, str. 585-595.
- Taylor, S.G., S.M. Seward in S.F. Bolander (1981), Why the process industries are different, *Production and Inventory Management Journal*, Vol. 22, N. 4, str. 9-24.
- Veleva, V. in M. Ellenbecker (2001), Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*, vol. 9, str. 519–549.

- Zorzut, S., V. Jovan in A. Žnidaršič (2006), Key performance indicators in plant-wide control, *Proceedings of the third international conference on informatics in control, automation and robotics, Intelligent control systems and optimization*, Setúbal, Portugal, August 1-5, 2006. ICINCO, str. 179-182.
- Zorzut, S., D. Gradišar, V. Jovan in G. Mušič (2009), *Closed-loop control of a polymerization plant using production Performance Indicators (PIs)*, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, sprejet članek, čaka na objavo.
- Zorzut, S., D. Gradišar, V. Jovan in G. Mušič (2009), Use of procedural model in the design of production control for a polymerization plant, *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies*, objavljeno na internetu 17. februar 2009.
- Zorzut, S. (2004), *Zasnova sistema uravnoveženih kazalnikov za podporo vodenju proizvodnje*, magistrska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko.

Izjava

Izjavljam, da sem doktorsko disertacijo izdelal samostojno pod vodstvom mentorjev dr. Vladimirja Jovana in izred. prof. dr. Gašperja Mušiča, dipl. inž. el.