

Zaprtozančno vodenje proizvodnega procesa polimerizacije

Dejan Gradišar, Sebastjan Zorzut, Vladimir Jovan
Institut "Jožef Stefan"
Jamova 39, Ljubljana
dejan.gradisar@ijs.si

Closed-loop control of polymerization production process

The efficiency of the production process can be observed by proper performance measurements (PM). Key Performance Indicators (KPIs) are one possible representation of PM and their main mission is to extract relevant information out of a huge amount of process data. In this article production process control using KPIs is presented. Two types of controllers were developed using "look-up table" and Model Predictive Control (MPC) and further implemented to control the modeled polymerization plant.

1 Uvod

Fleksibilnost in prilagodljivost podjetja na spremembe na trgu je že kar nekaj časa nuja za njegovo uspešno poslovanje. Načrtovanje in vodenje takega sistema je zahtevna naloga, potrebna so različna znanja, izkušnje in obvladovanje ogromne količine informacij. Pomembno pa je tudi, da uporabljen pristop upravljanja vsem vpletenim omogoča komuniciranje in delo na skupnem cilju ter tako omogoča celovito obvladovanje vseh bistvenih funkcij poslovanja proizvodnega podjetja [3].

V samem proizvodnem podjetju nastopa ogromno podatkov, iz katerih pa je nato potrebno izluščiti prave (koristne) informacije. To pa lahko predstavlja še ogromno dela in časa. Iz teh podatkov želimo ugotoviti stanje proizvodnega procesa in njegovo učinkovitost.

Problematika merjenja učinkovitosti (*Performance measurements – PM*) je razdelana na več nivojev [2]. Najprej je potrebno zbrati

predloge (*PM recommendations*), ki se nanašajo na izbor meritev, preko katerih bi lahko določili učinkovitost. Potem določimo okvir (*framework*), kako bodo omenjeni predlogi uporabljeni. Z okvirom sta določeni struktura in postopek merjenja. Načrtovanje sistema (*PM system*) tako zaobsega študijo vseh teh elementov, npr. [5].

Eden izmed možnih pristopov je uporaba ključnih kazalnikov učinkovitosti (KPI), preko katerih lahko opazujemo stanje in učinkovitost proizvodnega procesa na različnih nivojih vodenja proizvodnega podjetja [8]. Iz ogromne količine procesnih podatkov, ki se jih spremlja sprotno, se izlušči koristna informacija v obliki kazalnikov KPI.

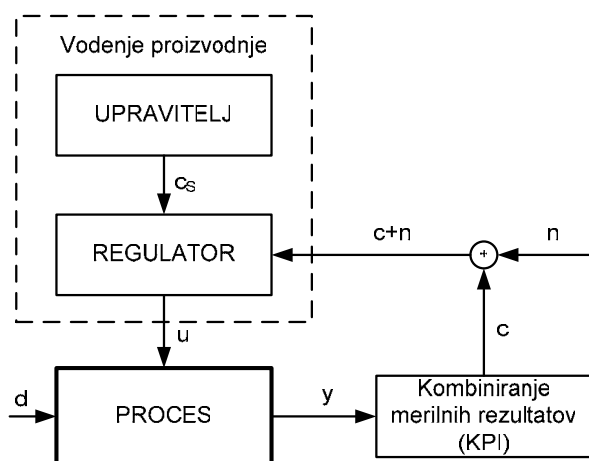
Kazalniki KPI omogočajo enostaven vpogled v učinkovitost proizvodnje. Glede na stanje kazalnikov se lahko določajo akcije za učinkovito delovanje proizvodnje. Poglavje 3 predstavlja okvir vodenja proizvodnega procesa. Določen je postopek merjenja učinkovitosti in predstavljena je struktura, po kateri se izvaja vodenje procesa. V nadaljevanju je predstavljen pristop, uporabljen na proizvodnem procesu polimerizacije. Kot pomoč pri vodenju procesa sta bila razvita dva regulatorja. Najprej je predstavljeno vodenje z regulatorjem, ki uporablja "look-up" tabele, v nadaljevanju pa je predstavljeno načrtovanje in uporaba prediktivnega regulatorja MPC ([7] in [9]). Na koncu sledijo rezultati in zaključki.

2 Vodenje proizvodnje na osnovi KPI-jev

Vodenje proizvodnega procesa predstavlja zahtevno in kompleksno opravilo. Za proizvodne procese velja, da imajo kompleksno strukturo. Med delovanjem je potrebno zadostiti

večim kriterijem, ki so si pogosto tudi v nasprotju. Pri tem je potrebno obvladovati ogromno količino podatkov.

Sprejemanje odločitev in njihova realizacija v realnih sistemih je pogosto izvedena glede na hierarhično strukturo, povzeto po [10] in je predstavljena na sliki 1. Upravitelj pri vodenju proizvodnega procesa upošteva tudi stanje oz. učinkovitost procesa. Učinkovitost proizvodnega procesa se ugotavlja preko velike količine meritev. Tako se pojavi potreba po učinkovitem pregledu nad trenutnim stanjem procesa. Metodologija s kazalniki KPI je eden izmed možnih pristopov. Na osnovi teh kazalnikov, proizvodnih planov in strategije poslovanja se določa akcije, s katerimi vodimo proizvodni proces. V pomoč pri vodenju proizvodnje lahko del upraviteljevih opravil avtomatiziramo in mu tako olajšamo delo.



Slika 1: Zasnova vodenja proizvodnega procesa

Sam proizvodni proces lahko opišemo kot dinamičen sistem. Vhodne spremenljivke (u) nam predstavljajo veličine, s katerimi vplivamo na potek proizvodnje (naloge, recepti, hitrost, kakovost surovin, ...), meritve učinkovitosti proizvodnje (KPI) pa predstavljajo izhodne spremenljivke ($y \rightarrow c$). Na sam sistem lahko vpliva tudi več motenj (d).

S pomočjo teorije vodenja lahko za tak sistem načrtamo povratnoznančno vodenje z regulatorjem, ki služi kot sistem za podporo odločanju (*Decision Support System – DSS*). Upravitelju se tako zmanjša obseg opravil. Njegova naloga je zdaj nastavljanje referenčnih

vrednosti regulatorja in nadziranje njegovega delovanja. Regulator tako prevzame določen obseg upraviteljevih opravil. V nadaljevanju bo predstavljen pristop s pomočjo kazalnikov KPI in uporabo povratnoznačnega vodenja za realen proces.

3 Vodenje proizvodnega procesa polimerizacije

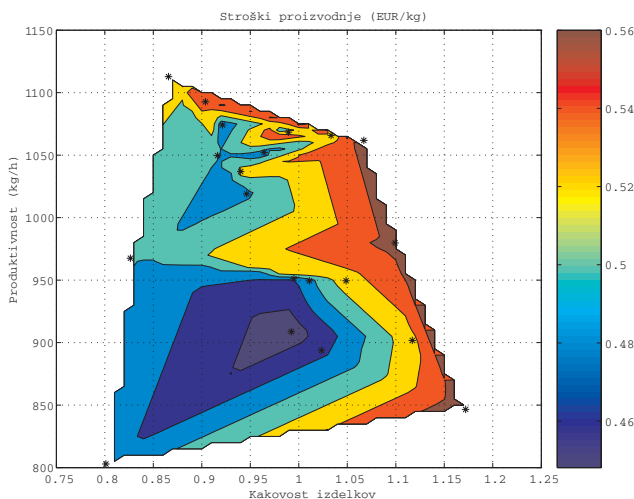
Proizvodni proces polimerizacije, ki ga bomo obravnavali v našem prispevku, zaobsega več reaktorjev, s katerimi se proizvaja različne emulzije. Tehnološki postopki so predpisani z recepti, ki določajo kako proizvesti posamezne končne izdelke. Za proizvodni proces polimerizacije je bil razvit model, ki opisuje glavne značilnosti procesa [4]. Pri tem je bilo uporabljeno simulacijsko okolje Matlab/Simulink/Stateflow.

S pomočjo tega modela lahko študiramo vodenje proizvodnega procesa. Za omenjen proces določimo, kakšen naj bo okvir merjenja učinkovitosti. Najprej predpišemo postopek merjenja. Izbrani so bili trije karakteristični KPI-ji, preko katerih lahko spremljamo učinkovitost proizvodnje: *Stroški proizvodnje*, *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov*. Kazalnike se vrednoti na določena časovna obdobja (T_S), njihove vrednosti pa se določi iz podatkov o stanju sistema v nekem časovnem oknu (T). Pri tem je potrebno upoštevati tudi šarže, ki so začele z izvajanjem že pred začetkom časovnega okna in pa tudi šarže, ki se v omenjenem časovnem oknu še niso končale. V našem primeru uporabimo časovno okno 100h.

Proizvodni postopek vodimo na osnovi kazalnikov KPI ter proizvodnih planov. Na izvajanje procesa lahko vplivamo s predpisovanjem *Hitrosti proizvodnje*, *Kakovosti surovin* in *Razvrstitvijo šarž*, ki predstavljajo vhod v proizvodni proces. Na sam proces pa vpliva še več zunanjih dejavnikov, kot so na primer spremembe v kakovosti surovin, pomanjkanje materialov, nova naročila, ipd.

Predpostavimo, da se vhodna razvrstitev šarž ne spreminja. Slika 2 prikazuje kako so *Stroški*

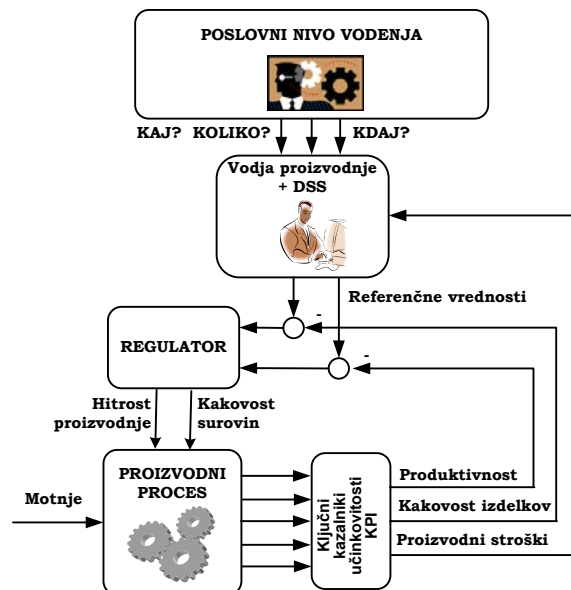
produkcije odvisni od *Produktivnosti* in *Kakovosti izdelkov* za neko specifično razvrstitev šarž. To povezavo lahko izkoristimo za poenostavitev zaprtozančne sheme s slike 1.



Slika 2: Povezava *Proizvodnih stroškov* glede na *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov*

Optimalno vodenje se lahko nanaša na različne kriterije vrednotenja učinkovitosti. V našem primeru predpostavljamo, da so prioritetnega pomena nizki proizvodni stroški. Glede na želeno vrednost kazalnika *Stroški proizvodnje*, lahko iz grafa na sliki 2 ocenimo tudi želeni vrednosti za ostala dva kazalnika. Ti dve vrednosti nam predstavljata referenčni vrednosti za notranjo zanko zaprtozančnega vodenja procesa (Slika 3). S pomočjo zaprte zanke zagotavljamo želeno stanje kazalnikov *Produktivnost* in *Kakovost izdelkov*. Da je vodenje enostavnejše, lahko notranjo zanko avtomatiziramo. Kot rečeno, lahko proizvodni proces predstavimo kot dinamičen sistem in za tak sistem je torej potrebno načrtati ustrezen regulator.

Shema na sliki 3 nam predstavlja strukturo po kateri izvajamo merjenje učinkovitosti procesa in uporabo te informacije za vodenje procesa. Upravitelju so pri odločanju v pomoč kazalniki KPI in regulator, ki del upraviteljevih nalog prek notranje zanke opravlja avtomatsko.

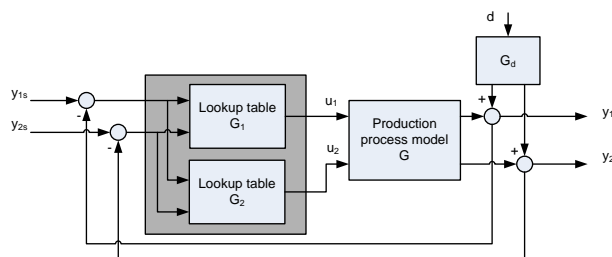


Slika 3: Poenostavljena zaprtozančna shema vodenja procesa polimerizacije

Primer, ki ga obravnavamo v notranji zanki, je multivariabilni sistem z dvema vhodoma in dvema izhodoma. Pri tem smo se lotili načrtovanja multivariabilnega regulatorja na dva načina, t.j., regulatorja osnovanega na "look-up" tabelah in multivariabilnega prediktivnega regulatorja (*MPC*).

3.1 Regulator z "look-up" tabelo

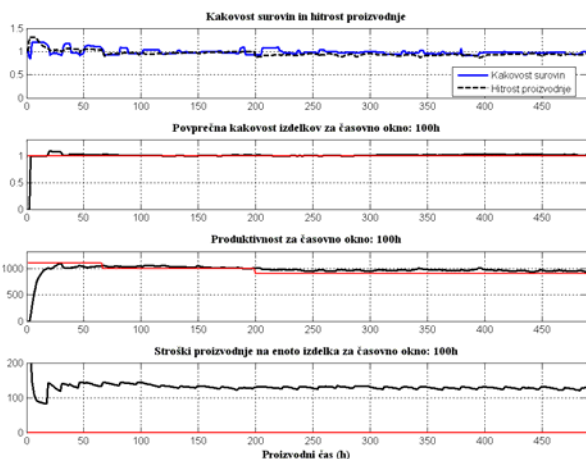
Regulator, ki je osnovan na "look-up" tabelah, uporablja za vsako regulirno veličino (*Hitrost proizvodnje* in *Kakovost surovin*) svojo tabelo (Slika 4). Tabeli sta bili določeni na osnovi analize občutljivosti proizvodnega procesa v posamezni delovni točki in na osnovi ekspertnega znanja.



Slika 4: Uporaba regulatorja osnovanega na "look-up" tabelah

Slika 5 prikazuje regulirane veličine (y_1 in $y_2 \rightarrow$ KPI-ji) in regulirna signala (u_1 in $u_2 \rightarrow$ *Hitrost proizvodnje* in *Kakovost surovin*), ki jih

tak regulator določa. Tekom eksperimenta se spremeni referenčna veličina za *Produktivnost*. Opazimo, da regulator zunaj delovne točke (1000kg/h) deluje s pogreškom v ustaljenem stanju. Za boljše delovanje bi potrebovali več takih regulatorjev, za vsako izbrano delovno točko. Regulatorje bi nato spojili, npr. s pomočjo mehke logike.

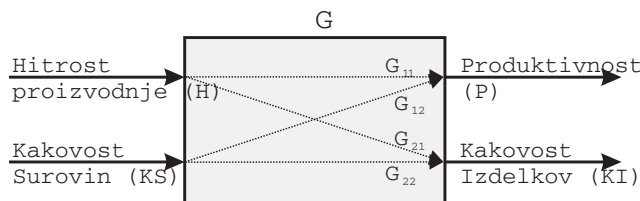


Slika 5: Potek kazalnikov pri vodenju z regulatorjem z "look-up" tabelo.

3.2 Prediktivni regulator MPC

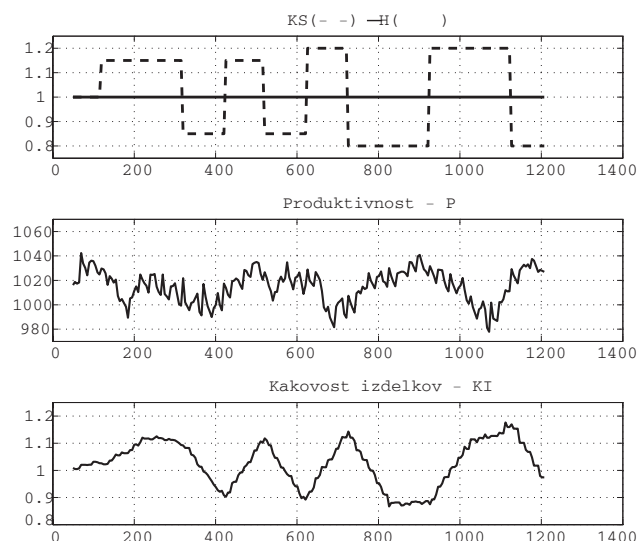
Preizkušeno pa je bilo tudi vodenje, ki temelji na uporabi modela sistema, t.j. prediktivno vodenje (*Model based predictive control – MPC*), [7] oz. [9]. Model se uporablja za napovedovanje (predikcije) bodoče dinamike izhodov sistema za več korakov vnaprej. V vsakem (časovnem) koraku s pomočjo optimizacijskega algoritma poiščemo sekvenco bodočih vhodov v proces, ki minimizirajo določeno kriterijsko funkcijo. Le prvi element se nato uporabi kot vhod v proces. Dobra lastnost omenjenega pristopa pa je tudi v tem, da omogoča upoštevanje fizikalnih omejitev in je uporaben tudi za reševanje multivariabilnih problemov [11], [6].

Za načrtovanje prediktivnega regulatorja je potrebno najprej določiti dinamični model proizvodnje. Kot rečeno, imamo opravka z multivariabilnim sistemom, kjer posamezni vhodi preko križnih povezav vplivajo na izhodne veličine (glej sliko 6).



Slika 6: Multivariabilni model

Model je bil določen z identifikacijo na osnovi vhodno-izhodnih podatkov. Te podatke smo pridobili s simulacijo proizvodnega procesa, ko testiramo vpliv prvega (drugega) vhodnega signala na izhodne veličine, medtem ko je drug (prvi) vhod fiksiran. Tak pristop je možen, ko obravnavamo linearno območje. Privzamemo, da je področje, v katerem bo deloval naš regulator, linearno. Podatki, ki smo jih pridobili s simulacijo modela proizvodnega procesa, so predstavljeni na sliki 7 in sliki 8.

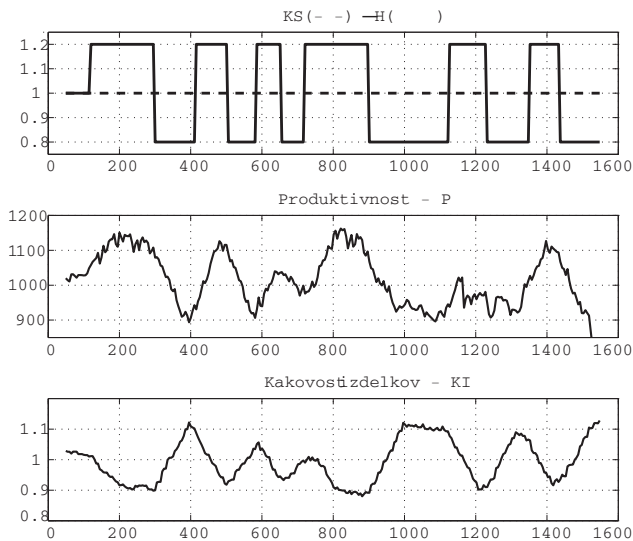


Slika 7: Vhodni in izhodni podatki za identifikacijo modelov G_{12} in G_{22}

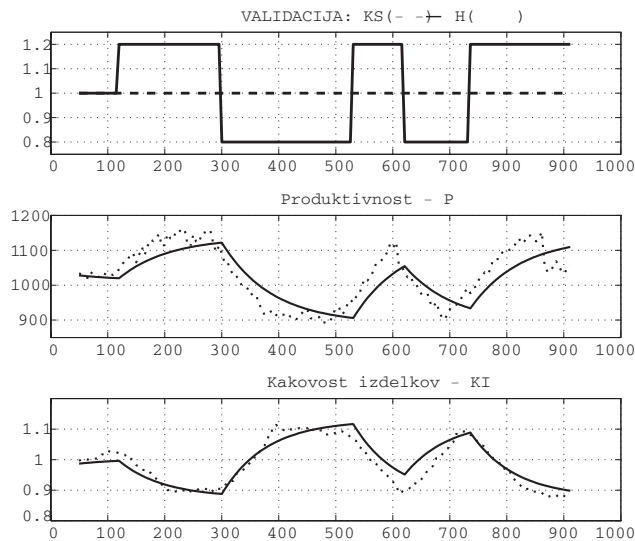
Te signale uporabimo za identifikacijo. Uporabimo metodo najmanjših kvadratov in dobimo štiri diskretne modele prvega reda, ki določajo poenostavljen model proizvodnje:

$$G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{31.84}{z-0.938} & \frac{-4.43}{z-0.834} \\ \frac{-0.04}{z-0.932} & \frac{0.052}{z-0.94} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

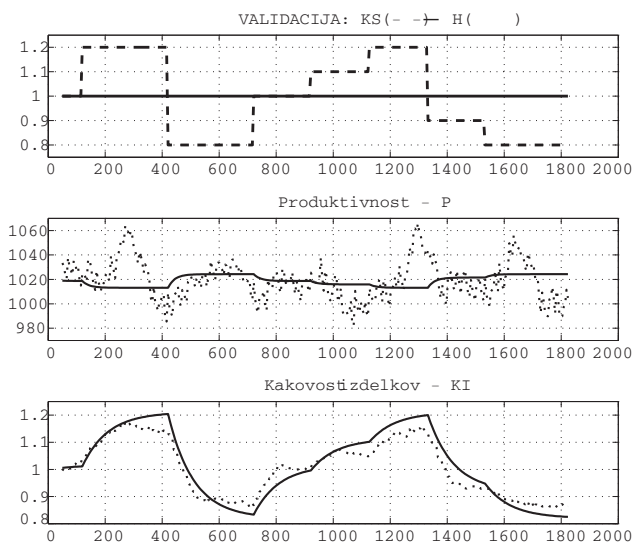
$$T_s = 5h.$$



Slika 8: Vhodni in izhodni podatki za identifikacijo modelov G_{11} in G_{21}



Slika 10: Validacija modelov G_{11} in G_{21}



Slika 9: Validacija modelov G_{12} in G_{22}

Veljavnost modelov preverimo s podatki, ki so predstavljeni na sliki 9 in sliki 10. Odzivi modelov so predstavljeni s polno črto in lahko opazimo zadovoljivo ujemanje z izmerjenimi podatki. Slabše ujemanje opazimo v primeru G_{12} . Opazimo tudi, da je koleracija med signaloma, ki določata to prenosno funkcijo, zanemarljiva, tako to povezavo v nadaljevanju zanemarimo.

Ta poenostavljen model uporabimo za načrtovanje našega prediktivnega regulatorja. Načrtovanja smo se lotili z Matlabovim orodjem *MPC toolbox* [1]. Pri tem kot glavni problem nastopa problem uglaševanja regulatorja, tako da zadostimo večim različnim kriterijem. Z omenjenim orodjem lahko posamezne izhode prioritiziramo, kar omogoča pomembnim izhodom natančno sledenje referenčni vrednosti na račun ostalih, manj pomembnih izhodov. Poleg tega mora naš regulator upoštevati vhodne in izhodne omejitve, ki so:

$$\begin{aligned} 0.5 &\leq \text{Hitrost proizvodnje} \leq 1.3 \\ 0.85 &\leq \text{Kakovost surovin} \leq 1.2 \end{aligned} \quad (2)$$

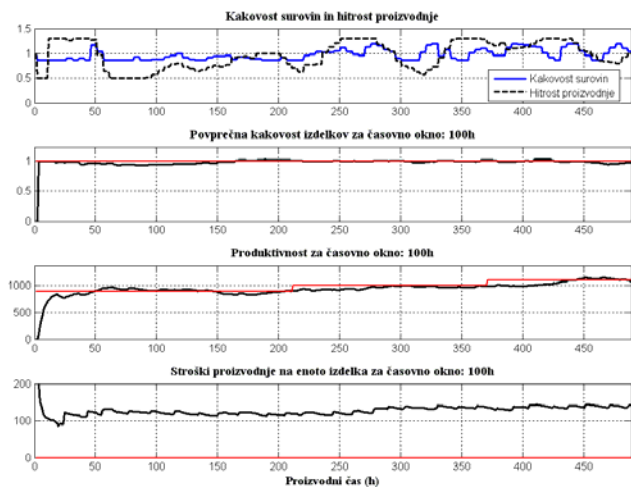
oz.

$$\begin{aligned} 700 &\leq \text{Produktivnost} \leq 1300 \\ 0.87 &\leq \text{Kakovost izdelkov} \leq 1.3 \end{aligned} \quad (3)$$

Prediktivni interval smo postavili na 100h in interval vpliva na 40h. Kadar imamo opravka z optimizacijskim problemom s končnimi omejitvami, MPC toolbox uporablja metodo QP (*Quadratic Programming*) [1].

Zaprtozančno vodenje je bilo preizkušeno v več simulacijskih tekih. Slika 11 prikazuje eksperiment, ko se referenca za kazalnik *Produktivnost* dvakrat spremeni, medtem ko referenca za *Kakovost izdelkov* ostaja nespremenjena. S slike lahko opazimo, da

regulator MPC uspe zagotoviti uspešno sledenje referenčnim vrednostim.



Slika 11: Potek kazalnikov pri uporabi regulatorja MPC

4 Zaključek

Z učinkovitim upravljanjem proizvodnje zagotavljamo njeno stabilno delovanje na vseh nivojih vodenja. V prispevku uporabimo uveljavljen pristop merjenja in prikazovanja učinkovitosti proizvodnje v obliki kazalnikov KPI ter predlagamo njihovo uporabo za poenostavitev vodenja proizvodnega sistema.

Metoda je bila predstavljena in uporabljena na modelu proizvodnega procesa polimerizacije. V ta namen je bilo potrebno izbrati primerne kazalnike in določiti primeren okvir njihove uporabe. Predlagano je bilo kaskadno zaprtozančno vodenje, pri čemer je v notranji zanki implementiran regulator. Uporabljena sta bila dva regulacijska pristopa, t.j., regulator na osnovi "look-up" tabele in regulator MPC. Slednji nam na modelnem proizvodnem procesu zagotavlja uporabnejše rezultate. Tako bi bilo v

nadaljevanju smiselno preučiti uporabo tega pristopa v realnem industrijskem okolju.

5 Literatura

- [1] A. Bemporad, M. Morari in L. Ricker, *Model Predictive Control Toolbox for Use with MATLAB*, The Mathworks, Natwick, 2006.
- [2] P. Folan, in J. Brown, A review of performance measurement: Towards performance management. *Computers in Industry*, 56, 663–680, 2005.
- [3] D. Gradišar. *Računalniško podprta gradnja modelov za potrebe razvrščanja proizvodnih opravil*, doktorska disertacija. Ljubljana, 2006.
- [4] V. Jovan, S. Zorzut in A. Žnidaršič. Utilization of key performance indicators in production control, *1st IFAC Workshop on Applications of Large Scale Industrial Systems*, Finland, 2006.
- [5] R. Kaplan in D. Norton, The balanced scorecard – measures that drive performance, *Harvard Business Review*, 70(1), 71–79, 1992.
- [6] J.M. Maciejowski, *Multivariable Feedback Design*. Addison-Wesley Publishing Company, Wokingham, 1989.
- [7] M. Morari in J.H. Lee, Model predictive control: Past, present and future. *Computers of Chemical Engineering*, 23(4–5), 667–682, 1999.
- [8] A. Neely, M. Gregory in K. Platts, Performance measurement system design: A literature review and research agenda. *International Journal of Operations & Production Management*, 15(4), 80–116, 1995.
- [9] S.J. Qin, T.A. Badgwell, A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7), 733–764, 2003.
- [10] S. Skogestad, Near-optimal operation by self-optimizing control: from process control to marathon running and business systems. *Computers and Chemical Engineering*, 29, 127–137, 2004.
- [11] I. Škrjanc, S. Blažič, S. Oblak in J. Richalet, An approach to predictive control of multivariable time-delayed plant: stability and design issues. *ISA Transactions*, 43, 585–595, 2004.
- [12] S. Zorzut, *Zasnova sistema uravnoveženih kazalnikov za podporo vodenju proizvodnje*, magistrsko delo, Ljubljana, 2004.