

# Iterativno vodenje procesa brizganja

Dragan Kusić<sup>1</sup>, Aleš Hančič<sup>2</sup>, Rajko Svečko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CAP – Center za aplikativne polimere, Pot Draga Jakopiča 22, 1231 Ljubljana - Črnuče

<sup>2</sup>TECOS, Razvojni center orodjarstva Slovenije, Kidričeva 25, 3000 Celje

<sup>3</sup>Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Univerza v Mariboru, Smetanova 17, 2000 Maribor

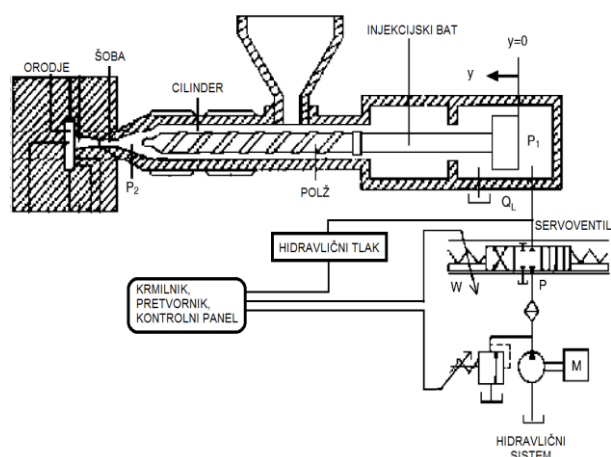
E-pošta: [info@polymer.si](mailto:info@polymer.si)

## Iterative control of injection molding process

*This paper presents the design of an iterative controller that is specifically suitable for injection molding process. The iterative control is based on direct cavity pressure measurement, which is directly related to the quality of injection molded products, as well as with the selected process parameters that also affect the course of the pressure curve. The experimental results confirmed that deviations, which are the result of process nonlinearities, can be significantly reduced by introducing this iterative learning approach.*

### 1 Uvod

V plastičarsko predelovalni industriji je brizganje raznovrstnih polimernih materialov še vedno eden glavnih postopkov za proizvodnjo različnih plastičnih izdelkov. Brizgalni stroji in orodja različnih velikosti so najbolj pogosto uporabljeni del opreme in nujen predpogoj, da lahko pričnemo predelovati polimerne materiale s tem postopkom. Sam proces brizganja je relativno preprost in sestavljen iz sledečih faz: vbrizgavanje, preklon na naknadni tlak, plastificiranje ter ohlajanje. Primer zgradbe tipičnega hidravličnega brizgalnega stroja prikazuje slika 1.



Slika 1. Primer poenostavljene zgradbe hidravličnega brizgalnega stroja

Proizvodni cikel se začne najprej z zapiranjem orodja, kjer zapiralna enota zapre najprej obe polovici orodja. Nato sledi faza brizganja, kjer je potrebno predhodno nasuti v lijak termoplastični material v obliki

granul, ki se v ogrevanem cilindru stopi, polž pa tako nastalo polimerno talino potiska naprej. Pri tem je pomembno da, ko se akumulira dovolj polimerne taline lahko polž z aksialnim pomikom naprej potisne to talino preko šobe v orodje tj. orodno votlino, ki ustreza geometrijski obliki izdelka. Nato, ko se polimerna talina v orodju ohladi na ustrezno temperaturo, moramo še pred tem vbrizgati dodatno količino polimerne taline z namenom kompenziranja krčenja polimerne taline pri strjevanju v želeno obliko. Tako vbrizgano polimerno talino pustimo v orodju, da se ohladi na temperaturo, ki je ustrezna za izmetavanje izdelka iz orodja. Proizvedeni plastični izdelek po koncu časa ohlajanja z odpiranjem orodja običajno izmečemo iz orodja.

Plastične ostanke od izdelka lahko običajno ponovno recikliramo in kasneje ponovno uporabimo. Sam proces brizganja ima poleg številnih prednosti, kot npr. velike serije proizvodnje, relativno majhen izmet, visoka stopnja avtomatizacije, doseganje visokih toleranc ipd., tudi nekaj slabosti, kot npr. visoki investicijski stroški v izdelavo ustreznega orodja ter visoki obratovalni stroški.

Tekom faze brizganja tlak v notranjosti orodja sunkovito naraste dokler ni notranjost popolnoma volumsko zapolnjena. Posledično tlak naraste do nivoja naknadnega tlaka, kjer običajno držimo točno določen profil z namenom kompenziranja krčenja polimerne taline. Omenjeni profil tlaka v notranjosti orodne votline moramo med posameznimi proizvodnimi cikli držati in ponavljati saj je ključni faktor, ki vpliva na kakovost brizganega plastičnega izdelka.

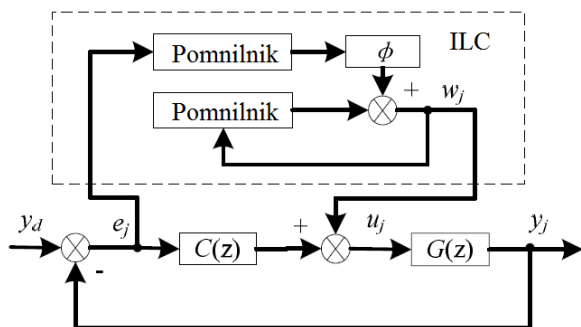
Optimalni profil tlaka vpliva na ustrezno zapolnitev končnega izdelka, kot tudi na prelitost (prezapolnjenost izdelka – odstopanje od nominalnih dimenzij) in nezapolnjenost samega izdelka (oboje je vrsta napake) v primeru, če je ta previsok oz. prenizek. Sama dinamika notranjega tlaka je običajno hitra, časovno spremenljiva in nelinearna. Iz tega razloga je dobro, da se pripravi ustrezna strategija vodenja notranjega tlaka v orodju s pomočjo procesnih parametrov in ustrezne tehnike vodenja glede na uporabljen krmilnik brizgalnega stroja ter vrsto komunikacije z njim. Na takšen način lahko približno ponovimo termodinamično zgodovino polimerne taline in posledično zagotovimo kakovostno zabrizgane plastične izdelke.

V preteklosti so bili predlagani številni algoritmi za vodenje notranjega tlaka v orodju. Mnogi avtorji [1-2] so prikazali študijo apliciranja PI in PID algoritmov v te namene, medtem ko so številni drugi avtorji uporabljali

adaptivne algoritme [3-6]. Iterativno učenje lahko kategoriziramo v področje inteligentne metodologije vodenja, ker ponazarja učni pristop za izboljšanje odziva nekega sistema, kateri deluje ponavljajoče v nekem danem časovnem okvirju. S pomočjo informacij iz prejšnjih iteracij lahko inteligentno izboljša oz. iterativno izboljšuje odziv nekega sistema [7-10]. Iterativno učenje je možno uporabiti za doseganje popolnega sledenja nekega sistema oz. objekta, kljub temu da je le-ta nelinearen, negotov ali pa neznan tako, da je to metodo smiselno vpeljati tudi v proces brizganja zaradi svoje izrazite ponavljajoče narave delovanja.

## 2 Izvedba vodenja

Blok diagram krmilnega sistema za izvedbo vodenja z iterativnim izboljševanjem trajektorije notranje tlaka v orodju je prikazan na sliki 2.



Slika 2. Blok diagram krmilnega sistema

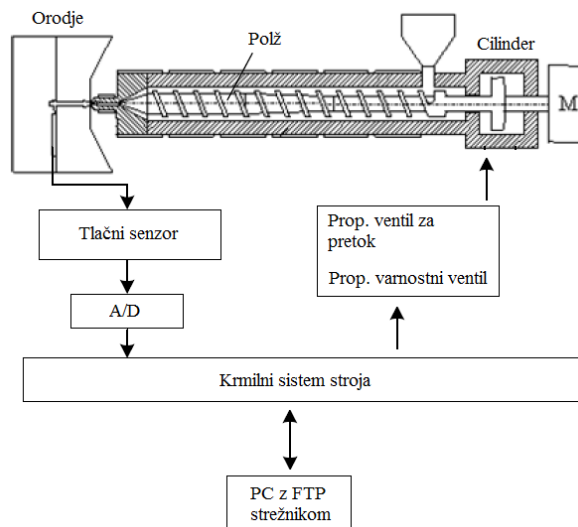
V blok diagramu predstavlja  $G(z)$  objekt vodenja na osnovi notranjega tlaka,  $y_d$  in  $y_j$  predstavljata pričakovano trajektorijo in izhod objekta (informacija o poteku notranjega tlaka),  $e_j$  predstavlja napako, del okvirja, ki je črtkan predstavlja zunanjo krmilno enoto za izvedbo predkrmiljenja (*feedforward controller*),  $w_j$  je njegov izhod,  $C(z)$  je krmilnik stroja, ki ima implementiran klasični PID regulator,  $\phi$  je učna konstanta učnega sistema,  $u_j$  je vsota vrednosti iz obeh krmilnikov, pomnilniška bloka predstavljata elementa, ki shranjujeta  $u_{j-1}$  in  $e_{j-1}$  iz prejšnjega cikla. Končno enačbo predkrmilnega dela lahko zapišemo kot

$$u_{j+1} = w_{j+1}(k) + C(z)e_{j+1}(k), \quad (1)$$

pri čemer je

$$w_{j+1}(k) = w_j(k) + \phi e_j(k+1). \quad (2)$$

Praktična izvedba vodenja procesa brizganja je prikazana na sliki 3. Uporabljen je bil kvarčni tlačni senzor Kistler tip 6153C (prikazan na sliki 4), ki je nameščen v notranjosti orodja za brizganje testnih ploščic dimenzij 60x60mm in lahko meri notranje tlake do velikosti 2000 bar. Slednje se uporabljajo za namen testiranja skrčkov različnih termoplastičnih materialov.



Slika 3. Praktična izvedba vodenja procesa brizganja



Slika 4. Kistlerjev tlačni senzor tip 6153C

Temperaturo orodja smo merili na njegovi zunanji površini s klasičnim J-tipom termočlena (klasa 1). Vsi testi so bili izvedeni na 80-tonskem hidravličnem brizgalnem stroju KraussMaffei KM80SP380CX (slika 5) z uporabo PP materiala ISOFIL H40 C2 F NAT za brizganje testnih ploščic.



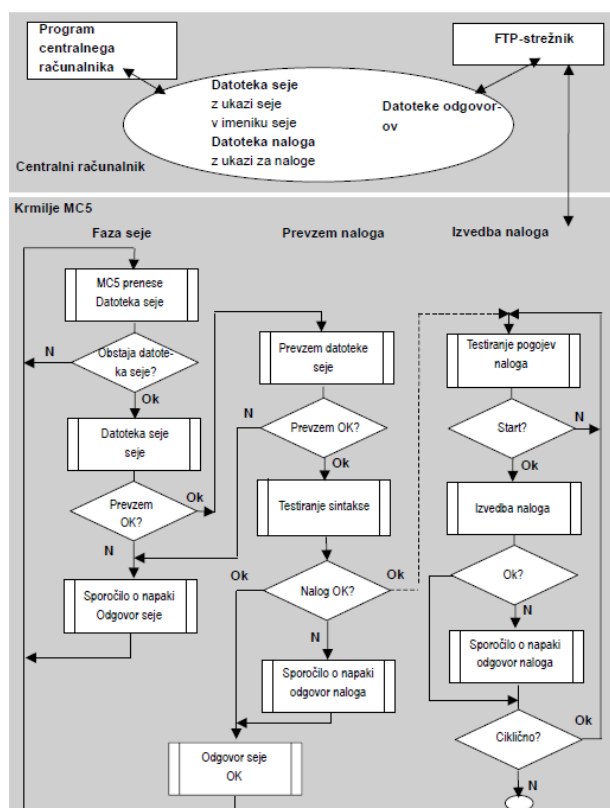
Slika 5. KraussMaffei KM80SP380CX brizgalni stroj

Za komunikacijo med krmilnikom stroja in centralnim računalnikom z vzpostavljenim FTP strežnikom smo uporabili ethernet vmesnik z Euromap 63 standardom, ki določa prenos podatkov iz stroja in v stroj s pomočjo tekstovnih datotek v kateri so posamezni ukazi, poročila in procesni parametri. Euromap 63 standard predpisuje točno določene sintakse za dostop (branje/pisanje) do vseh ključnih procesnih parametrov, ki vplivajo na potek notranjega tlaka v proizvodni fazi.

Natančen potek izmenjave datotek in načina preverjanja pravilnosti komunikacije je prikazan na sliki 6. Po Euromap 63 standardu smo izdelali lasten program v centralnem računalniku v VisualBasic-u, ki zbira ukaze v datoteko (npr. potrebne temperature, hitrost brizganja, velikost in trajanje naknadnega tlaka po stopnjah) in jih odloži na določeno mesto (mapa seje v centralnem računalniku).

Krmilje stroja si prenese te datoteke s pomočjo komunikacije s FTP-strežnikom (postopek *Polling*) in šele nato procesira. Krmilnik stroja prenaša datoteke z začasnim imenom in jih preimenuje šele takrat, ko je vsebina do konca zapisana.

Pri neustrezni prekinitvi komunikacije sečasne datoteke nahajajo v ciljnih mapah. Te datoteke je treba iz varnostnih razlogov izbrisati. Vse datoteke sej in odgovorov se brišejo po preverjanju.

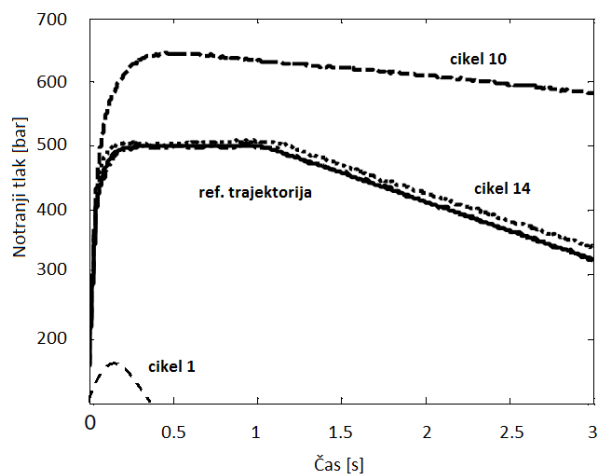


Slika 6. Diagram poteka komunikacije s strojem

### 3 Rezultati testiranj

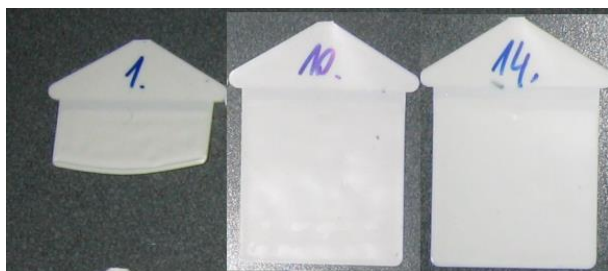
Za izvedbo testiranj je bila dokončna izbrana vrednost učne konstante 0,37, ki se je izkazala tekom testiranj sledenja referenčni tlačni trajektoriji za najbolj optimalno. Celoten čas cikla po koncu testiranj je bil cca. 20 sekund, začetna hitrost brizganja 50 mm/s, začetni naknadni tlak velikosti 100 bar v trajanju 0,25 sekunde. Predhodno omenjene tri parametre, ki vplivajo na sami potek in obliko trajektorije tlačne krivulje, smo iterativno spreminjali v posameznih ciklih glede na izmerjeni potek notranjega tlaka v fazi brizganja skladno z Euromap 63 standardom. Končni potek trajektorije notranjega tlaka med posameznimi cikli je prikazan na sliki 7. Kot je vidno smo v 1. ciklu tipali notranji tlak, ki je bil precej nizek cca. 131 bar.

V naknadnih ciklih smo potem iterativno spreminjali brizgalno hitrost ter velikost in čas trajanja naknadnega tlaka. V 10. ciklu smo uporabili preveliko velikost in čas naknadnega tlaka (604 bar in 6,53 s) pri 70 mm/s ter dobili preveliko odstopanje od definirane referenčne trajektorije poteka notranjega tlaka v orodju. Iz tega razloga je bilo potrebno v nadaljnjih ciklih ta dva parametra dodatno spremeniti zaradi preprečitve stroje loma oz. poškodbe orodja in poiskati pravo kombinacijo omenjenih procesnih parametrov, kjer bo pogrešek med referenčnim in izmerjenim potekom notranjega tlaka čim manjši. Dobro ujemanje z referenčno trajektorijo notranjega tlaka smo dobili šele v 14. ciklu, kjer je znašala velikost naknadnega tlaka v dveh stopnjah 516/505 bar in skupni čas trajanja 4,4 sekunde.



Slika 7. Rezultat iterativnih potekov tlačnih krivulj v posameznih ciklih

Na sliki 8, ki prikazuje nabrizgane testne ploščice v posameznih ciklih, je razvidno da je bil 1. cikel precej slab, kjer testna ploščica ni bila niti 50% volumsko zapolnjena in smo s težavo izmerili notranji tlak na začetku testne ploščice. V 10. ciklu je bila ploščica že volumsko zapolnjena, vendar pogrešek prevelik, medtem ko je bil minimalen v 14. ciklu z ustrežno nastavljenostjo (v dveh stopnjah) in časom trajanja naknadnega tlaka.



Slika 8. Primer nabrizganih testnih ploščic v 1., 10. in 14. proizvodnem ciklu

#### 4 Zaključek

Kvaliteta brizganega plastičnega izdelka je direktno povezana s tlakom in temperaturo v kalupni votlini orodja. Zaradi tega je smiselno orodje opremiti z ustreznimi senzorji, kar je že postala obvezna praksa predvsem v avtomobilski industriji, kjer se poleg sledljivosti zahteva tudi sprotno spremljanje in protokoliranje vseh ključnih proizvodnih parametrov. Omenjeni senzorji so trenutno že na visokem tehnološkem nivoju razvitosti, zato se trenutno precej vloga v razvoj namenskih programskih rešitev, ki so sposobne interpretirati ključne informacije o kakovosti brizganih izdelkov in učinkovitostjo proizvodnje iz množice proizvodnih podatkov. Slednje dobimo v vsakem novem ciklu, ki je lahko dolg nekaj sekund do par minut odvisno od velikosti in geometrije izdelka ter števila orodnih gnezd.

S pomočjo iterativnega vodenja procesa brizganja na osnovi meritev notranjega tlaka je možno spremljati kakovost brizganih izdelkov in po potrebi na osnovi znanja iz prejšnjih ciklov spremeniti ključne procesne parametre in zmanjšati odstopanje glede na določeno referenčno trajektorijo. Ker so proizvodni cikli lahko pri zahtevnejših izdelkih precej dolgi (običajno znatno več kot 30 sekund) je vsekakor smiselno vpeljati princip iterativnega vodenja v proces brizganja in na tak način priti hitreje do manjšega izmeta v proizvodnji in bistveno kakovostnejših brizganih izdelkov ter obenem v določeni meri razbremeniti proizvodne delavce.

#### Literatura

- [1] M. R. Kamal, W. I. Patterson, N. Conley, D. Abu Fara, G. Lohfink, Dynamic and control of pressure in the injection molding of thermoplastics, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 27, 1403-1410, 1987.
- [2] K.K. Tan and J. C. Tang, Learning enhanced PI control of ram velocity in injection molding machines, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 15, vol. 1, 65-72, 2002.
- [3] C. P. Chiu, J. W. Wei, and M. C. Shih, Adaptive model following control of the mold-filling process in an injection molding machine, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 36, 1123-1129, 1991.
- [4] S. M. Smud, D. O. Harper, P. B. Deshpande, Advanced process control for injection molding, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 31, 1081-1085, 1991.
- [5] K. K. Tan, S. N. Huang and X. Jiang, Adaptive control of ram velocity for the injection molding machine, *IEEE Trans. Control System Technology*. Vol. 9, no. 4, 2001.
- [6] J. H. Yang, Nonlinear adaptive control for injection molding machines, *Proc. IECON'02, IEEE, 28th Annual Conf. of Industrial Electronics Society*, vol. 2, pp.1663-1668, Seville, Spain, 2002.
- [7] K. K. Tan, J. C. Tang, Nonlinear Control of an Electrohydraulic Injection Molding Machine via Iterative Adaptive Learning, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 4, No. 3, 65-72, 1999.
- [8] A. R. Agrawal, I.O. Pandelidis and M. Pecht, Injection-molding process control-A review, *Polymer Eng. Sci.*, vol. 27, no. 1, pp.1345-1357, 1987.
- [9] I. O. Pandelidis and A. R. Agrawal, Optimal anticipatory control of ram velocity in injection molding, *Polymer Eng. Sci.*, vol. 28, no. 3, pp.147-156, 1988.
- [10] C. P. Chiu, M. C. Shih, and J. H. Wei, Dynamic modeling of the mold filling process in an injection molding machine, *Polymer Eng. Sci.*, vol. 31, no. 19, pp. 1417-1425, 1991.