

Razvoj teoretičnega in hibridnega mehkega modela šaržnega reaktorja

Simon Štampar¹, Saša Sokolič¹, Gorazd Karer², Alenka Žnidaršič¹, Igor Škrjanc²

¹ Metronik d.o.o., Stegne 9a, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: simon.stampar@metronik.si

Povzetek. Delo opisuje izdelavo teoretičnega in hibridnega mehkega modela šaržnega reaktorja. Reaktor se v farmacevtski industriji uporablja za izdelavo zdravil, kjer je potrebna hitra in natančna regulacija temperature vsebine reaktorja. Ker testiranje na realnem procesu pogosto ni mogoče, je izdelava teoretičnega modela šaržnega reaktorja potrebna za razvoj in testiranje prediktivnih regulacijskih algoritmov. V našem primeru se model uporablja za simulacijo temperature plašča in jedra reaktorja. Teoretični model opisuje vse nelinearnosti procesa segrevanja in ohlajanja vsebine šaržnega reaktorja. Glavni prispevek teoretičnega modela je v modeliranju toplotne prevodnosti med plaščem in jedrom reaktorja, ki je tudi glavna nelinearnost procesa. Zaradi kompleksnosti je v naslednjem koraku na podlagi teoretičnega modela izdelan hibridni mehki model, ki se bo uporabljal za razvoj in testiranje prediktivnih regulacijskih algoritmov.

Ključne besede: nelinearni sistem, teoretični model, toplotna prevodnost, hibridni mehki model

Theoretical and hybrid fuzzy model development of a batch reactor

Extended abstract. The paper deals with the development of a theoretical and hybrid fuzzy model of a batch reactor to be used in the pharmaceutical industry for drug production, for which a rapid and precise temperature control is required. It is important that such model includes all the main features thus enabling achievement of the several set objectives.

A scheme of the batch reactor is shown in Figure 1. Based on the first law of thermodynamics and energy balance, the theoretical model of the batch reactor is defined in Equations (1), (2) and (3). They describe the nonlinearities of the process of heating and cooling the content of the batch reactor. The main contribution of the developed theoretical model is in the modelling of its heat transfer between the reactor jacket and its core (Figure 3), mainly caused by the change in the overall heat transfer shown in Equation (4). In our case, the best way to cover the nonlinearities of the overall heat transfer is by using the correlation equation given by Petukhov (Equation (5)).

To validate the theoretical model, the simulation results are compared with those of measurements made on a real process. The input parameters for the theoretical model are listed in Table 3. Comparison between the simulated and measured results is shown in

Figures 4 and 5.

Due to considerable complexity of the theoretical model used in developing and testing predictive control algorithms, it is reasonable to build a locally affine hybrid fuzzy model on the basis of the theoretical model. The dynamics derived from the theoretical model is transformed into a discrete-time domain shown in Equations (8) and (9). The output of the hybrid fuzzy model in a compact form for the reactor jacket and the reactor core is given by the Equations (10) and (11). Normalized degrees of membership are divided according to the reactor jacket temperature T_j with simple triangular functions. To cover the whole operating range, we chose ten membership functions shown in Figure 6.

To validate the hybrid fuzzy model, the same input parameters are used as for the theoretical model. A comparison between the hybrid fuzzy model and the theoretical model responses shown in Figures 7 and 8 exhibit excellent fitting, thus proving that the hybrid fuzzy model can be used for control design purposes.

Keywords: nonlinear system, theoretical model, heat transfer, hybrid fuzzy model

1 Uvod

Članek opisuje razvoj teoretičnega modela za proces segrevanja in ohlajanja vsebine reaktorja. Ker se reaktor uporablja za pripravo topil, ki se dodajajo proizvodnji aktivnih farmacevtskih učinkovin, je potrebna natančna in hitra regulacija temperature vsebine reaktorja. Velike spremembe želene temperature, mešana zvezna in diskretna narava procesa in omejitve opreme zahtevajo skrbno načrtovanje regulacije. Zaradi naštetih lastnosti uspešna regulacija temperature s konvencionalnim PI-regulatorjem ni mogoča, vsaj v celotnem območju delovanja ne. Namen uporabe teoretičnega modela je izboljšava regulacije temperature z razvojem prediktivnih regulacijskih algoritmov. Regulacija je odvisna od izbire grelno-hladilnega medija in položaja zveznega ventila. Napredki in izzivi pri regulaciji temperature šaržnih reaktorjev so prikazani v [1].

Obstaja veliko knjig in člankov, ki se ukvarjajo s problematiko teoretičnega modeliranja. Osnovni teoretični modeli šaržnih reaktorjev so opisani v [2], [3] in [4], ki opisujejo teoretične modele različnih tipov šaržnih reaktorjev in osnovno toplotno prevodnost med plaščem reaktorja, jedrom reaktorja in njegovo okolico. Glavna nelinearnost teoretičnega modela je prav v prevajanju toplote med plaščem in jedrom reaktorja, kot je opisano v [5] in [6]. Ti dve deli opisujeta različne metode računanja skupne toplotne prevodnosti med jedrom in plaščem reaktorja. V našem primeru se je za najboljšo metodo, ki pokrije nelinearno naravo procesa, izkazala metoda s korelacijsko enačbo po Petkuhovu, kot je podana v [6].

Za razvoj in testiranje prediktivnih regulacijskih algoritmov za regulacijo temperature reaktorja smo zaradi kompleksnosti teoretičnega modela razvili še hibridni mehki model. Ta je zgrajen na podlagi teoretičnega modela. Hibridni mehki model poljubno natančno aproksimira nelinearni proces segrevanja in ohlajanja vsebine reaktorja, kot je to podano v [9] in [11]. Za zapis hibridnega mehkega modela za obravnavani primer uporabimo zapis v kompaktni obliki, kot je podano v [10].

Članek je organiziran takole: v drugem poglavju podamo lastnosti šaržnega reaktorja, v tretjem prikažemo razvoj in vrednotenje detajlnega teoretičnega modela, v četrtem poglavju podamo razvoj in vrednotenje hibridnega mehkega modela, v zadnjem poglavju pa so sklepne ugotovitve.

2 Lastnosti šaržnega reaktorja

Modelirani reaktor, ki je iz nerjavečega jekla, se uporablja za pripravo topil, ki so dodani proizvodnji aktivnih farmacevtskih učinkovin. Njegova kapaciteta je 630 litrov. Segrevanje in ohlajanje reaktorja poteka s pomočjo cevi, ki so v obliki tuljave ovite ob steno reaktorja, po katerih se pretaka medij (mešanica vode in glikola), ki je ogret-ohlajen na tri različne temperature:

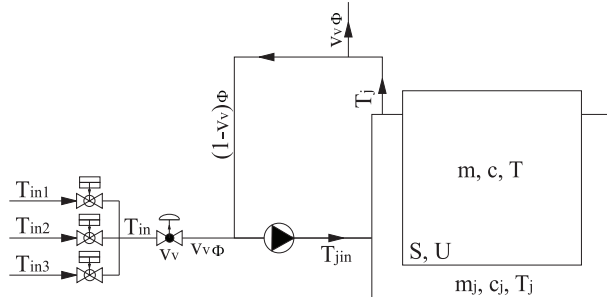
140 °C, 5 °C in -25 °C. Glede na to, na katero temperaturo želimo segreti-ohladiti reaktor, uporabimo eno od treh možnih izbir grelno-hladilnega medija. Izbiro določimo s položajem treh dvostopenjskih ventilov. Medij prek nastavljivega zveznega ventila s pomočjo črpalke teče v plašč reaktorja. Modeliranje reaktorjeve temperature je nelinearen proces, ki je odvisen od:

- izbire vhodnega grelno-hladilnega medija;
- odprtosti zveznega ventila;
- količine zmesi v reaktorju;
- specifične toplote zmesi;
- specifične toplote grelno-hladilnega medija;
- toplotne prevodnosti med plaščem in jedrom reaktorja;
- površine prevajanja toplote in
- temperature plašča reaktorja.

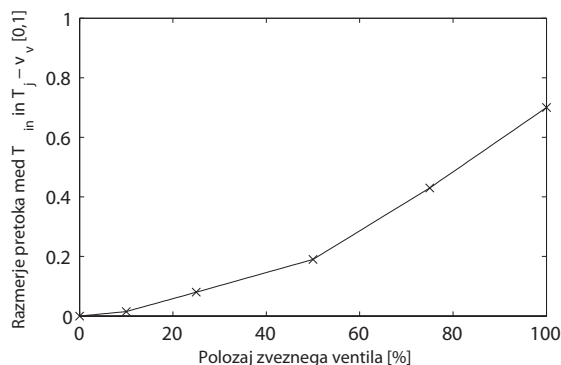
Omeniti moramo tudi parameter, ki opisuje hitrost mešala reaktorja. Hitrost minimalno vpliva na spremembo temperature jedra reaktorja in mora biti taka, da je temperatura vsebine po celem reaktorju čim bolj konstantna. Zaradi nizkih vrednosti viskoznosti topil, ki jih pripravljajo v reaktorju, lahko pri regulaciji temperature uporabljamo konstantno hitrost mešala. Stopenjska črpalka, ki poganja grelno-hladilni medij po plašču reaktorja, je vedno vklopljena in deluje s konstantno močjo.

Slika 1 prikazuje shemo regulacije temperature šaržnega reaktorja. Temperaturo reaktorja T reguliramo s pomočjo temperature vhoda v plašč T_{in} in temperaturo v plašču reaktorja T_j . Pri gradnji modela reaktorja njegov plašč poenostavljeno predstavimo kot ravno ploščo, stikajočo se z jedrom reaktorja S , ki je prav tako predstavljeno z ravno ploščo površine S . Prehajanje toplote med plaščem in jedrom reaktorja opisuje skupna toplotna prevodnost U . Za gradnjo modela smo predvideli, da imamo v reaktorju vodo z maso m in specifično toploto c . Masa vode v reaktorju m se lahko spreminja. Ker je plašč reaktorja izoliran z 8 cm debelo plastjo steklene volne, lahko toploto, ki prehaja prek izolacije v okolico, zanemarimo. Medij, ki se pretaka po plašču, je mešanica glikola in vode 50 % - 50 % (m_j , c_j). S konstantnim pretokom Φ jo črpalka potiska v plašč reaktorja. Za segrevanje oziroma ohlajanje vsebine reaktorja imamo na voljo tri diskretne vhode grelno-hladilnega medija, ki jih med seboj ni mogoče mešati. Izbiro medija določimo tako, da odpremo dvostopenjski ventil za izbrani medij, ki je na temperaturi T_{in} : $T_{in1} = -25^\circ\text{C}$, $T_{in2} = 5^\circ\text{C}$, $T_{in3} = 140^\circ\text{C}$. Položaj zveznega ventila v_v podaja razmerje med pritokom vhodnega grelno-hladilnega medija T_{in} v plašč reaktorja in pretokom grelno-hladilnega medija iz njegovega obtoka. Pritok grelno-hladilnega medija v plašč reaktorja določa njegovo temperaturo, ki pa posledično segreva-hladi vsebino reaktorja. Ker se bo razviti model uporabljal za regulacijo temperature

vsebine reaktorja T , bomo z regulacijo določali izbiro grelno-hladilnega medija T_{in} in položaj zveznega ventila v_v . Karakteristike zveznega ventila v_v ne poznamo. Pridobili smo jo s pomočjo primerjave rezultatov simulacije teoretičnega modela in meritev, opravljenih na reaktorju (slika 2).



Slika 1: Shema šaržnega reaktorja
Figure 1. Scheme of the batch reactor



Slika 2: Karakteristika zveznega ventila
Figure 2. Characteristics of the continuous valve

3 Teoretični model

Teoretični model regulacije temperature šaržnega reaktorja, ki ga izpeljemo iz termodinamičnega zakona o ohranitvi energije, opišemo z enačbami:

$$T_{jin} = v_v T_{in} + (1 - v_v) T_j \quad (1)$$

$$m_j c_j \frac{dT_j}{dt} = \Phi c_j T_{jin} - \Phi c_j T_j - US(T_j - T) \quad (2)$$

$$mc \frac{dT}{dt} = US(T_j - T) \quad (3)$$

S študijem procesa segrevanja in ohlajanja vsebine reaktorja ugotovimo, da je ta nelinearen v parametrih. Skupna toplotna prevodnost med plaščem in jedrom reaktorja se spreminja glede na spremembo temperature grelno-hladilnega medija. Na spremembo toplotne prevodnosti najbolj vpliva viskoznost (μ - tabela 1) grelno-hladilnega medija, podana v [7]. Višja viskoznost pomeni, da se ob stenah cevi, ki sestavljajo plašč reaktorja, ustvari tanka plast grelno-hladilnega medija (film), ki zmanjša toplotno prevodnost medija. Grelno-hladilni medij je pod tlakom (4 bar), kar omogoča višje vrelišče mešanice vode in glikola, ki bi

sicer zavrela pri 140 °C. Upoštevati pa je treba tudi spremembo toplotne prevodnosti nerjavečega jekla glede na debelino stene med plaščem in jedrom reaktorja (λ - tabela 2), kot je opisano v [8]. Prav tako upoštevamo še specifično toploto in toplotno prevodnost grelno-hladilnega medija (c_j in λ_{medij} - tabela 1), kot je podano v [7]. Sprememba viskoznosti grelno-hladilnega medija prav tako vpliva na pretok grelno-hladilnega medija (Φ - tabela 1).

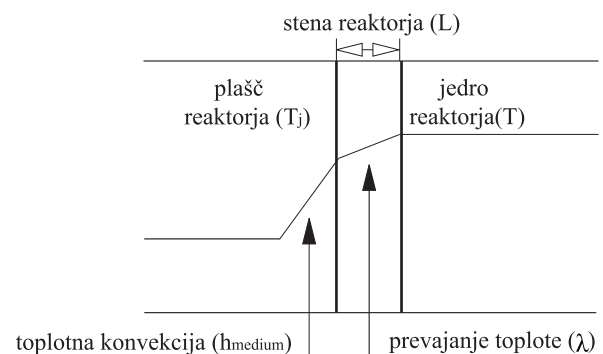
Tabela 1: Lastnosti mešanice vode in glikola (50 % -50 %) mixture
Table 1. Water and glycol characteristics (50 % -50 %) mixture

Temperatura (°K)	248	255	277	300	322	344	366	411
Viskoznost (kg/ms) · 10 ⁻³	45	22	6.5	2.8	1.5	0.9	0.7	0.6
Specifična toplota (J/kgK)	3250	3265	3327	3411	3482	3558	3621	3762
Pretok (m ³ /s) · 10 ⁻³	3.7	/	3.87	4.06	/	4.1	/	4.14
Toplotna prevodnost (W/mK) · 10 ⁻³	415	414	409	404	398	385	371	355

Tabela 2: Toplotna prevodnost nerjavečega jekla
Table 2. Stainless-steel thermal conductivity

Temperatura (°K)	200	300	400	500
Toplotna prevodnost (W/mK)	11.2	13.2	15.2	16.75

Skupno toplotno prevodnost med plaščem in jedrom reaktorja glede na površino stene med plaščem in jedrom reaktorja lahko predstavimo kot prisilno toplotno konvekcijo in prevajanje toplote prek ravne plošče (slika 3), kot je predlagano v [6]. Podaja jo enačba (4).



Slika 3: Toplotna prevodnost skozi ravno ploščo
Figure 3. Thermal conductivity through a flat plate

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{medij}} + \frac{L}{\lambda} \quad (4)$$

Pri tem L pomeni debelino stene reaktorja, λ je koeficient prenosa toplote nerjavečega jekla s konvekcijo in h_{medij} prisilna toplotna konvekcija prek ravne plošče, ki jo opisuje korelacijska enačba (5) po Petukhovu, kot je to opisano v [6]:

$$h_{medij} = \frac{\lambda_{medij}}{L_{prev}} \frac{0.037 Re^{0.8} Pr}{(1 + 2.443 Re^{-0.1} (Pr^{0.67} - 1))}, \quad (5)$$

kjer je λ_{medij} toplotna prevodnost grelno–hladilnega medija, L_{prev} je karakteristična dolžina prevajanja toplote, Pr je Prandtlovo število in Re je Reynoldsovo število. Pri tem sta:

$$Pr = \frac{\mu c_j}{\lambda_{medij}} \quad \text{in} \quad Re = \frac{L_{prev} V \rho}{\mu}, \quad (6)$$

$$\text{kjer je } \rho = \frac{\rho_{voda}}{2} + \frac{\rho_{glikol}}{2} \quad \text{in} \quad V = \frac{\Phi}{S_{cev}} = \frac{\Phi}{\pi r_{cev}^2} \quad (7)$$

in pomenijo:

- $r_{cev} = 0.03$ m polmer cevi, ki sestavlja plašč reaktorja;
- $L_{prev} = 11.37$ m dolžino cevi ovite okoli reaktorja;
- $\rho_{voda} = 1000$ kg/m³ specifično težo vode;
- $\rho_{glikol} = 1096$ kg/m³ specifično težo glikola;
- $\rho = 1048$ kg/m³ specifično težo mešanice vode in glikola;
- $S = 3$ m² površino, kjer poteka toplotna izmenjava med plaščem in jedrom reaktorja
- $c = 4186$ J/kgK specifično toploto vode v reaktorju;
- $m_j = 120$ kg maso grelno–hladilnega medija v plašču in obtoku;
- $L = 0.017$ m debelino stene med jedrom in plaščem reaktorja.

Z uporabo zgornjih enačb in podatkov, ki so nam na voljo, lahko izračunamo skupno toplotno prevodnost glede na površino med plaščem in jedrom reaktorja pri različnih temperaturah grelno–hladilnega medija in temperature kovine med plaščem in jedrom reaktorja.

3.1 Vrednotenje teoretičnega modela

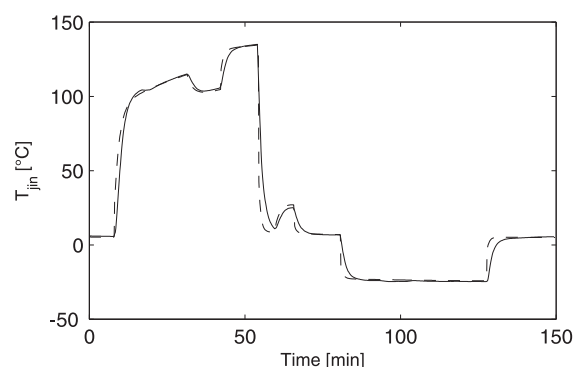
V tem poglavju bomo primerjali rezultate simulacije teoretičnega modela in meritev, opravljenih na realnem procesu segrevanja in ohlajanja vsebine reaktorja. Vhodni parametri za vrednotenje teoretičnega modela so enaki kot pri izvedbi meritev na reaktorju in so v tabeli 3.

- Izbira grelno–hladilnega medija, ki jo določimo z izmeničnim odpiranjem dvostopenjskih ventilov, ki imajo dve stanji: popolnoma odprt in popolnoma zaprt. Mešanje grelno–hladilnega medija na vходу ni mogoče, zato je hkrati odprt samo en ventil.
- Odprtost zveznega ventila, na območju med 0 % in 100 %, določa pretok izbranega grelno–hladilnega medija.
- Ker se reaktor uporablja za pripravo topil, ki imajo nizke viskoznosti, lahko za poizkus vsebino reaktorja napolnimo z vodo.

Tabela 3: Vhodni parametri meritev na reaktorju
Table 3. Input parameters for the measurements made on the reactor

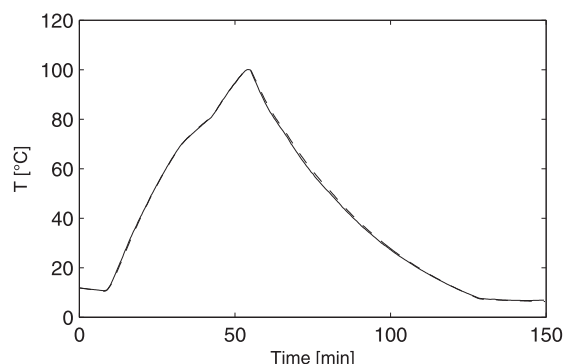
Čas(min)	00:00	07:50	31:15	42:00	54:10	59:30	65:40	80:30	127:30
Masa vode(l)	630	630	630	630	615	615	615	615	615
Medij (°C)	5	140	140	140	5	5	5	-25	5
Položaj zv. ventila (%)	100	50	25	75	100	50	100	100	100

Primerjavo rezultatov simulacije detajlnega teoretičnega modela in meritev, opravljenih na realnem procesu, prikazujeta sliki 4 in 5. Medtem ko slika 4 prikazuje primerjavo simulacije in meritev temperature plašča reaktorja, slika 5 prikazuje primerjavo simulacije in meritev temperature jedra reaktorja.



Slika 4: Temperatura plašča reaktorja: izmerjena (polna črta) in simulirana (prekinjena črta)

Figure 4. Reactor jacket temperature: measured (solid line) and simulated (dashed line)



Slika 5: Temperatura jedra reaktorja: izmerjena (polna črta) in simulirana (prekinjena črta)

Figure 5. Reactor core temperature: measured (solid line) and simulated (dashed line)

4 Hibridni mehki model

Teoretični model procesa segrevanja in ohlajanja vsebine reaktorja je nelinearne narave. Za upoštevanje zvezne in diskretne narave procesa ter aproksimacijo nelinearnosti uporabimo zapis z mehkim modelom. Mehke modele lahko predstavimo kot univerzalne

aproksimatorje, s pomočjo katerih lahko nelinearen proces predstavimo poljubno natančno [9].

Hibridni mehki model je niz lokalnih linearnih modelov, ki se razlikujejo v parametrih in so odvisni od delovne točke. V našem primeru uporabimo model Takagi-Sugeno [12], ki ga posplošimo na nelinearne hibridne sisteme z vključitvijo diskretnih stanj sistema, kot je opisano v [10].

Dinamika procesa segrevanja in ohlajanja jedra in plašča reaktorja je natančno opisana s teoretičnim modelom. Pri gradnji hibridnega mehkega modela moramo upoštevati vse njegove nelinearnosti. To storimo tako, da enačbe (1), (2) in (3) iz zveznega časovnega prostora pretvorimo v diskretni časovni prostor s časom vzorčenja $\tau = 10$ s, kot kažeta enačbi (8) in (9).

$$T_j(k+1) = \left(v_v \frac{10\Phi}{m_j} \right) T_{in}(k) + \left(1 - v_v \frac{10\Phi}{m_j} - \frac{10US}{m_j c_j} \right) T_j(k) + \left(\frac{10US}{m_j c_j} \right) T(k) \quad (8)$$

$$T(k+1) = \left(1 - \frac{10US}{mc} \right) T(k) + \left(\frac{10US}{mc} \right) T_j(k) \quad (9)$$

Izhod hibridnega mehkega modela procesa segrevanja in ohlajanja vsebine reaktorja v kompaktni obliki je podan z enačbama (10) in (11), kot je predlagano v [10].

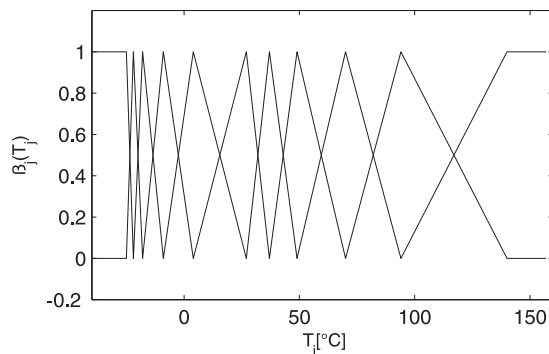
$$T_j(k+1) = \beta(k) \Theta_{jd}^T(k) \psi_j(k) \quad (10)$$

$$T(k+1) = \beta(k) \Theta^T(k) \psi(k) \quad (11)$$

V enačbah (10) in (11) $\beta(k)$ predstavlja matriko normiranih stopenj pripadnosti. Mehčanje je izvedeno glede na temperaturo plašča reaktorja T_j . Da pokrijemo celotno območje delovanja, izberemo 10 trikotnih pripadnostnih funkcij z maksimumi pri -25°C , -21°C , -18°C , -9°C , 4°C , 27°C , 37°C , 49°C , 70°C , 94°C in 140°C , kot prikazuje slika 6.

Matrika $\Theta(k)$ vsebuje posledične parametre modela. Ker imamo v našem primeru tri diskretna stanja, ki ustrezajo trem različnim temperaturam vhodnega grelno-hladilnega medija T_{in} , določimo tri matrike posledičnih parametrov modela $\Theta_{jd}(k)$ za plašč reaktorja in eno matriko posledičnih parametrov modela $\Theta(k)$ za jedro reaktorja.

Treba je omeniti še regresorje $\psi(k)$, ki vsebujejo vhode in izhod obravnavanega sistema. Vhodi in izhod v trenutnem časovnem intervalu k za določitev izhoda v naslednjem časovnem intervalu $k+1$ za proces segrevanja in ohlajanja plašča in jedra reaktorja so podani v enačbah (12) in (13).



Slika 6: Pripadnostne funkcije
Figure 6. Membership functions

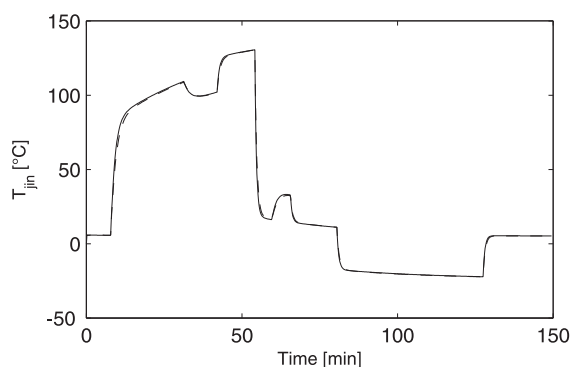
$$\psi_j^T(k) = [T_j(k) \quad T(k) \quad v_v] \quad (12)$$

$$\psi^T(k) = [T(k) \quad T_j(k)] \quad (13)$$

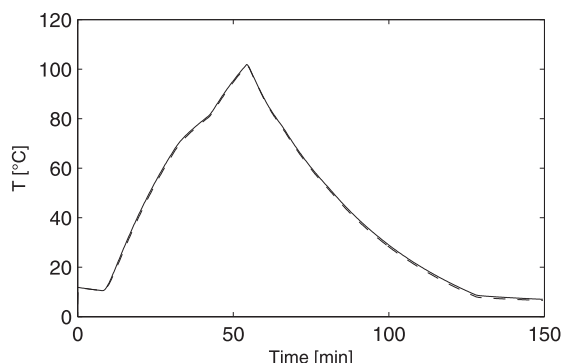
Na podlagi teoretičnega modela, prevedenega v diskretni časovni prostor, izračunamo matrike posledičnih parametrov $\Theta(k)$ z upoštevanjem diskretnih stanj sistema.

4.1 Vrednotenje hibridnega mehkega modela

Vrednotenje hibridnega mehkega modela izvedemo na podlagi teoretičnega modela šaržnega reaktorja z identičnimi vhodnimi parametri, kot je prikazano v tabeli 3. Medtem ko slika 7 prikazuje primerjavo simulacije temperature plašča reaktorja teoretičnega in hibridnega mehkega modela, slika 8 prikazuje primerjavo simulacije temperature jedra reaktorja teoretičnega in mehkega modela. Iz slik lahko povzamemo, da so razlike med matematičnim in mehkim modelom minimalne.



Slika 7: Simulirana temperatura plašča reaktorja: hibridni mehki model (polna črta) in teoretični model (prekinjena črta)
Figure 7. Simulated reactor jacket temperature: hybrid fuzzy model (solid line) and theoretical model (dashed line)



Slika 8: Simulirana temperatura jedra reaktorja: hibridni mehki model (polna črta) in teoretični model (prekinjena črta)
Figure 8. Simulated reactor core temperature: hybrid fuzzy model (solid line) and theoretical model (dashed line)

5 Sklep

Na podlagi fizičnih lastnosti šaržnega reaktorja in opravljenih meritev za proces segrevanja in ohlajanja vsebine reaktorja smo razvili detajlni teoretični model. Največja težava nelinearnosti skupne toplotne prevodnosti je bila uspešno rešena z uporabo korelacijske enačbe za prevodnost po Petkuhovu. Na podlagi rezultatov vrednotenja teoretičnega modela lahko sklepamo, da je bila njegova gradnja uspešno izvedena.

Zaradi kompleksnosti teoretičnega modela za potrebe razvoja in testiranja prediktivnih regulacijskih algoritmov smo razvili še hibridni mehki model. Mehčanje nelinearnega procesa segrevanja in ohlajanja vsebine reaktorja smo izvedli z uporabo mehkega modela tipa Takagi-Sugeno, ki smo ga posplošili za nelinearne hibridne sisteme z vključitvijo diskretnih stanj sistema. Iz rezultatov vrednotenja hibridnega mehkega modela je razvidno, da je njegov odziv tako rekoč enak kot odziv teoretičnega modela. Tako lahko hibridni mehki model uporabljamo za razvoj prediktivnih regulacijskih algoritmov.

Literatura

- [1] Juba M.R. and Hamer J.W., "Progress and challenges in batch process control", *Chem. Process Control, CPC II*, 1986, pp. 139–183.
- [2] Fowler A.C., "Mathematical models in the applied sciences", Cambridge university press, 1997, pp. 1–118.
- [3] Škrjanc I., "Self-adaptive supervisory predictive functional control of a hybrid semi-batch reactor with constraints", *Chemical Engineering Journal*, March 2008, pp. 312–317.
- [4] Ingham J., Dunn I.J., Heinze E. and Prenosil J.E., "Chemical Engineering Dynamics: Modelling with PC Simulations", VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1994.

- [5] Perry R.H. and Green D.W., "Perry's Chemical Engineers Handbook", Seventh Edition, International Editions, Sydney, 1998.
- [6] Stephan K. and Baehr H.D., "Heat and Mass Transfer", Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, pp. 312–330.
- [7] Parsons R., "Fundamentals: 2001 Ashrae Handbook", American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2001, Chap. 21.
- [8] Karditsas P.J. and Baptiste M.J., "Thermal and Structural Properties of Fusion related Materials – Stainless steel (316)", ARIES Properties Archive, 1995.
- [9] Castro J., "Fuzzy logic controllers are universal approximators", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, pp. 629–635.
- [10] Karer G., Mušič G., Škrjanc I. and Zupančič B., "Hybrid fuzzy model-based predictive control of temperature in a batch reactor", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 31, pp. 1552–1564, 2007.
- [11] Babuška R., "Fuzzy modeling for control", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [12] Takagi T. and Sugeno M., "Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 15, 1985, pp. 116–132.

Simon Štampar je diplomiral leta 2008 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Trenutno je zaposlen v podjetju Metronik kot mladi raziskovalec v gospodarstvu. Ukvarja se z modeliranjem in vodenjem sistemov.

Saša Sokolič je diplomiral leta 1989 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, leta 1996 pa na isti fakulteti tudi doktoriral. Zaposlen je v podjetju Metronik, kjer je vodja raziskovalne skupine in direktor marketinga in prodaje.

Gorazd Karer je diplomiral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, leta 2009 pa na isti fakulteti tudi doktoriral. Zaposlen je na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in se ukvarja z hibridnimi nelinearnimi sistemi in prediktivnimi regulacijskimi algoritmi.

Alenka Žnidaršič je diplomirala leta 1991 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, leta 1997 pa na isti fakulteti tudi doktorirala. Zaposlena je v podjetju Metronik, kjer je vodja marketinga in razvoja.

Igor Škrjanc je diplomiral leta 1988 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, leta 1996 pa na isti fakulteti tudi doktoriral. Leta 2008 je postal redni profesor. Ukvarja se z adaptivnimi, mehkiimi, prediktivnimi in mehkoadaptivnimi regulacijskimi sistemi.

Zahvala

Operacijo delno financira Evropska unija, in sicer iz Evropskega socialnega sklada.