

Adaptívne číslicové riadenie pH v laboratórnom fermentore LF-3

ANNA ZEMANOVIČOVÁ - MARIÁN MIKLA - MONIKA BAKOŠOVÁ - MÁRIA KARŠAIOVÁ

Súhrn. V príspevku je riešený problém číslicového riadenia pH v laboratórnom fermentore LF-3. Riadenie pH sa uskutočňovalo zmenou koncentrácie plynnej zmesi CO_2 + vzduch + NH_3 . Riadenie bolo adaptívne.

Laboratórny fermentor LF-3, vyrobený vo vývojových dielňach ČSAV Praha je prístroj určený predovšetkým na pestovanie rôznych druhov mikroorganizmov. Je možné ho však použiť aj na miešanie kvapalín vyžadujúcich sterilné prostredie s možnosťou temperovania, sterilného odberu vzoriek a udržiavania pH na žiadanej hodnote.

Regulácia pH vo fermentore LF-3 sa realizuje pomocou dávkovania kyseliny a zásady. Pri tomto spôsobe riadenia, hlavne v okolí neutrálneho bodu dochádzalo k preregulovaniu a regulačný proces trval dlho, čo nepriaznivo vplýva na fermentačný proces. Riadenie pH pomocou dávkovania plynov je šetrnejšie. Riadenie a reguláciu pH ovplyvňuje veľa vzájomne sa prelínajúcich činiteľov. Pri meraní pH ide o meranie veľmi malých napätí v kvapalinách v prostredí rušivých elektrických polí, zvodových prúdov, nesúmernosti elektrickej siete, v prostredí nehomogénnej teploty, prudkého pohybu kvapaliny, pri meniacich sa fyzikálnych vlastnostiach kvapaliny. Z uvedeného vyplýva, že na riadenie je výhodné použiť adaptívny algoritmus riadenia.

Ing. Anna Zemanovičová, CSc., Ing. Monika Bakošová, CSc., Ing. Mária Karšaiová, CSc., Katedra automatizácie, Chemickotechnologická fakulta STU, Radlinského 9, 812 37 Bratislava. Ing. Marián Mikla, Výskumný ústav potravinársky, Priemyselná 4, 820 06 Bratislava.

Riadená sústava

Laboratórny fermentor LF-3 je zariadenie, ktoré umožňuje uskutočňovať riadený proces rastu mikroorganizmov v sklenenom valci (tanku) o celkovom objeme 1,5 l v sterilných podmienkach, s nastaviteľnou teplotou, rýchlosťou otáčok a pH. Napájacie napätie fermentora je 220 V/50 Hz a jeho maximálny príkon je 125 VA.

Fermentor sa skladá z mechanickej a elektrickej časti, ktoré sú navzájom prepojené káblami. K mechanickej časti patrí fermentačný tank, zariadenie na odber vzorky, ohrev a chladenie tanku, vypúšťací otvor, odvetranie tanku, pH-sterilizovateľná elektróda, prepichovacia zátk a regulátor prietoku. Elektrická časť pozostáva z ovládacieho panelu, dosky usmerňovačov, stabilizátora napätia, regulátora pH, regulátora teploty, regulátora otáčok a regulátora odpeňovania.

Regulátor pH je samostatná vyberateľná jednotka, na ktorej sa nastaví prepínačom požadovaná úroveň pH a po zatlačení tlačítka prístroj sám udržiava úroveň zvoleného pH v rozsahu 0 - 10 pH s presnosťou $\pm 0,1$ pH. Dávkovanie látky je vizuálne indikované.

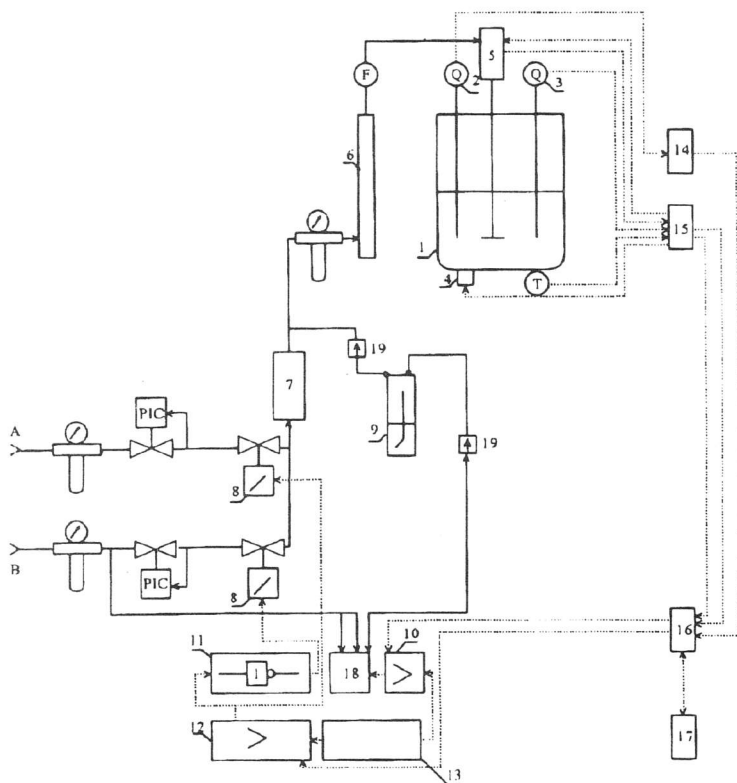
Teplota média v tanku sa meria plynule po zapnutí prístroja. Snímačom je platinový teplomer. Regulátor teploty je tiež samostatná jednotka s trojradovým otočným prepínačom, ktorým sa nastavuje regulačná úroveň teploty v tanku v rozmedzí 20 - 60°C. Správne meranie teploty vyžaduje miešanie média.

Regulátor otáčok je samostatná jednotka elektrickej časti fermentora, ktorá sa zapína tlačítkom a rýchlosť otáčok sa nastavuje dvojradovým otočným spínačom v rozsahu 30 - 650 ot/min po 10 otáčkach.

Regulátor odpeňovania slúži na odstránenie peny z fermentačného tanku. Pri dotyku peny s kovovou sondou sa preklopí hradlo.

Laboratórny fermentor LF-3 bol za účelom riadenia na Katedre automatizácie CHTF STU pripojený cez jednotku styku s prostredím SHS-A (RELA EF STU Bratislava) k osobnému mikropočítaču PP-06. Cieľom bolo realizovať riadenie pH plynmi dávkovanými do tanku fermentora pomocou solenoidových ventilov (obr.1). Takéto riadenie malo odstrániť nevýhody regulácie pomocou dávkovania kyseliny a zásady do tanku, ktoré spočívali v dlhej dobe regulácie a v preregulovaní, ku ktorému dochádzalo hlavne v okolí neutrálneho bodu.

Pre riadenie pH v kyslej oblasti bola ako akčná veličina použitá zmes CO_2 (vstup A obr.1) so vzduchom (vstup B obr.1). Namiesto vzduchu



Obr. 1. Zapojenie laboratórneho fermentora LF-3 pre číslicové riadenie s jednotkou styku s prostredím a mikropočítačom PP-06.

1 - laboratórny fermentor LF-3, 2 - kyslíková sonda SOSP SI (Chemoprojekt Sabatice), 3 - pH kombinovaná elektróda, 4 - ohrevné a chladiace teleso, 5 - miešadlo, 6 - rotameter, 7 - homogenizátor plynnej zmesi, 8 - solenoidové ventily ZPA - Prešov, typ 3VE2JA, 9 - premývací nádob s vodným roztokom NH_4OH , 10 - zesilňovač riadiaceho signálu od počítača, 11 - regulátor, 12 - zesilňovač riadiaceho signálu pre EP prevodník, 13 - zdroj jednosmerného napätia 0 - 20 V, 14 - pH-meter RADELKIS OP 208-1, 15 - elektrická ovládacia časť laboratórneho fermentora LF-3, 17 - osobný mikropočítač PP-06, 18 - diskretný EP prevodník systému Drelloba typ UP 13 2.0031/13:18.

Fig. 1. The experimental set-up of the LF-3 laboratory fermentor controlled by a PP-06 personal computer.

1 - The LF-3 laboratory fermentor, 2 - Dissolved oxygen electrode SOSP SI (Chemoprojekt Sabatice), 3 - A combined pH electrode, 4 - Heating/cooling element, 5 - Stirrer, 6 - Rotameter, 7 - Mixing chamber, 8 - Solenoid valves ZPA - Prešov, type 3VE2JA, 9 - Vessel with solution of NH_4OH , 10 - Amplifier of the input control signal the EP converter, 13 - Unidirectional voltage supply 0 - 20 V, 14 - pH meter RADELKIS OP 208-1, 15 - Control unit of the LF-3 fermentor, 16 - Converter unit SHS-A, 17 - Personal computer PP-06, 18 - Discrete EP converter Drelloba system, type UP 13 2.0031/13:18.

môžeme použiť u anaerobných procesov N_2 . V okolí zásaditej a neutrálnej oblasti pH bola na reguláciu použitá zmes CO_2 , NH_3 a vzduch. Zariadenie na prípravu plynnej zmesi o určitej koncentrácii sa skladá z elektromagnetických solenoidových ventilov 8 (ZPA Prešov) a zo zmiešavacej komory 7. Zmiešavacia komora je úzka kapacita s dierovanými prepážkami, kde sa jednotlivé plyny miešajú. Ventily boli riadené od počítača šírkovomodulovaným signálom, ktorý bol generovaný integrovaným obvodom 8253, ktorý sa nachádza v jednotke styku s prostredím SHS-A 16. Tento signál bolo potrebné zosilniť pomocou výkonového zosilňovača 12 a negovať pomocou negátora 11. Takéto zapojenie umožnilo riadiť koncentráciu dvojzložkovej zmesi pomocou jedného šírkovomodulovaného riadiaceho signálu, pričom v každom okamihu je jeden ventil otvorený a druhý uzavretý.

Pre riadenie v okolí neutrálnej a zásaditej oblasti sa použil elektropneumatický prevodník 18 (EP) systému Dreloba (Reglerwerk Dresden). Riadenie EP zabezpečoval riadiaci signál zo vstupno-výstupného portu (IO 8255) jednotky styku s prostredím. Tento signál bol zosilnený vo výkonovom zosilňovači 10. Na dávkovanie amoniaku bola použitá premývacia nádoba 9 s roztokom NH_4OH . Dávkovanie vzduchu zabezpečoval EP, kde na generovanie riadiaceho signálu bol v programe využitý čas 0,6 s, v ktorom sa počas periódy vzorkovania (2 s) nevykonávali numerické a vstupnovýstupné operácie. Riadenie vstupu NH_3 zabezpečoval dvojpolohový regulátor, ktorý spúšťal jeho dávkovanie v prípade, že žiadaná hodnota w bola väčšia ako merané pH. Šírka impulzu (experimentálne nastavená na 0,05s) závisí od koncentrácie roztoku NH_4OH a od tlaku vzduchu na vstupe do EP.

Na meranie pH v laboratórnom fermentore LF-3 bola použitá kombinovaná elektróda. Merané napätie po zosilnení sa privádzalo na vstup analogovočíslícového prevodníka (AČ) jednotky SHS-A pomocou tieneneho kábla. Tento signál bol filtrovaný pred vstupom do AČ pomocou RC-člena. Aj na takto spracovaný signál bol namodulovaný vysokofrekvenčný šum neznámeho pôvodu. Na odstránenie tohto vplyvu bolo použité mnohonásobné načítavanie údajov s ich následným spriemerovaním. Okrem toho bola na filtrovanie meranej hodnoty pH úspešne overená metóda lineárnej aproximácie priebehu meraného pH [1].

Vzorky sa snímajú v pravidelných intervaloch Δt .

$$t_i - t_{i-1} = \Delta t \quad (1)$$

Časový okamih v ktorom sa požaduje odhad výstupu je zhodný s okamihom poslednej vzorky. Spojitý čas sa môže merať od ľubovoľného pevného bodu v ľubovoľných jednotkách. Preto sa výhodne volí.

$$t_i = i \text{ pre } i = 1, 2, 3, \dots, \lambda \quad (2)$$

Výsledný vzťah pre realizáciu filtra je

$$y_i = f_1 \sum_{i=1}^{\lambda} iz(i) + f_2 \sum_{i=1}^{\lambda} z(i) \quad (3)$$

kde $f_1 = \frac{6}{\lambda(\lambda + 1)}$

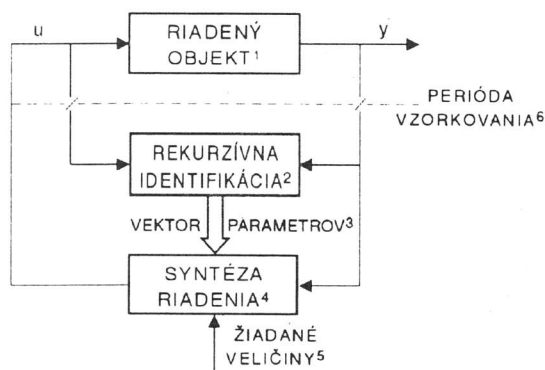
$$f_2 = -\frac{2}{\lambda}$$

$z(i)$ - jednotlivé merania

Aj pri tejto metóde na dosiahnutie kvality výstupných údajov bolo potrebné použiť veľký počet snímaných hodnôt. Ako vyhovujúce sa ukázalo 100-násobné vzorkovanie.

Adaptívne riadenie

Najrozšírenejšou triedou metód v adaptívnych systémoch riadenia sú samonastavujúce sa systémy riadenia. Jedná sa o spätnoväzbové riadenie s priebežnou identifikačnou metódou a nejakou syntézou riadenia [3]. Schematicky je takéto riadenie zobrazené na obr.2. Pritom syntéza riadenia akceptuje bodové odhady identifikovaných parametrov. Takýto obvod slúži



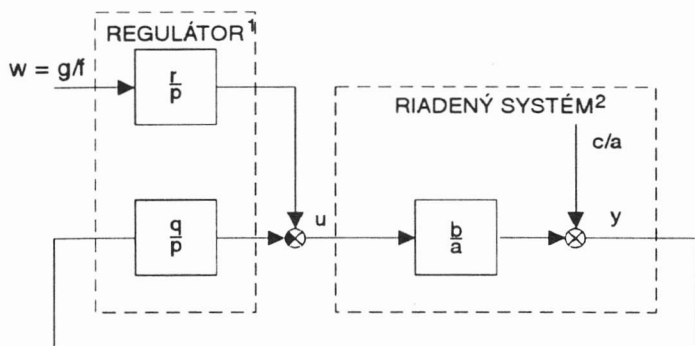
Obr.2. Bloková schéma adaptívneho riadenia.

Fig.2. The adaptive control scheme.

1 - Controlled object, 2 - Recursive identification, 3 - Parametre vector, 4 - Control synthesis, 5 - Requested quantities, 6 - Sampling period.

na riadenie vopred neznámych prípadne časovo premenných sústav, na ktoré môžu pôsobiť aj poruchy.

Základnú štruktúru tvorí regulačný obvod, ktorý sa skladá z dvoch častí - priamoväzbovej a spätnoväzbovej (znázornená na obr.3), kde $w = g/f$ je žiadaná veličina, r/p je prenos priamoväzbovej časti regulátora, q/p je prenos spätnoväzbovej časti regulátora.



Obr.3. Bloková schéma riadenia s priamou a spätnou väzbou.

Fig. 3. The control structure with a feedforward and a feed back part.

1 - Regulator, 2 - Controlled system

Riadený systém je opísaný diferenčnou rovnicou

$$ay = bu + cw \quad (4)$$

Pre syntézu treba predpokladať $a(0) \neq 0$, $b(0) = 0$, $f(0) \neq 0$. Potom zákon riadenia je daný diferenčnou rovnicou

$$pu = rw - qy \quad (5)$$

Návrh regulátora spočíva v riešení polynomických diofantických rovníc. Pri diskretnom riadení možno rozlíšiť tri typy kritérií optimálneho riadenia.

Ide o nasledovné kritéria:

a) Časovo optimálne kritérium DBP (dead-beat problem) - pri tomto kritériu sa vyžaduje, aby regulačný obvod bol stabilný a regulačná odchýlka bola nulová za najmenší počet krokov. Pre regulátor na obr.3 sa neznáme polynómy p , q , r získajú riešením polynomických diofantických rovníc

$$ap + bq = 1 \quad (6)$$

$$fs + br = 1 \quad (7)$$

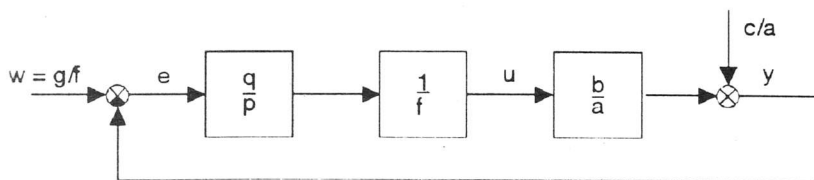
pri súčasnom splnení podmienok, že a , b sú nesúdeliteľné polynómy a polynóm f delí polynóm a . Splnenie tejto podmienky možno zabezpečiť

doplnením obvodu o tretí kompenzačný člen s prenosom $1/f$ (obr.4). Potom namiesto (6) sa rieši rovnica

$$ap + bq = 1 \quad (8)$$

a zákon riadenia je daný vzťahom

$$pfu = rw - qy \quad (9)$$



Obr.4. Bloková schéma adaptívneho riadenia s predkompenzáciou.

Fig.4. The adaptive control system supported by a precompensator.

b) *Kvadratické riadenie LQP (linear quadratic problem)* - pri tomto riadení sa navrhuje regulátor tak, aby sa minimalizovalo kritérium

$$J = \sum_{K=0}^{\infty} \{ \Phi[u(K)]^2 + \Psi[w(K)]^2 \} \quad (10)$$

kde $\Phi \geq 0$; $\Psi > 0$ sú nezáporné váhové konštanty, K označuje hodnoty príslušných veličín v periódach vzorkovania.

Pre jednorozmerný prípad je

$$a^* \Phi^a + b^* \Psi^b = e^* e \quad (11)$$

kde a, b sú polynómy prenosu riadeného objektu v nesúdeliteľnom tvare (a^* je definovaný rovnicou $a^*(d) = a(d^{-1})$), e je stabilný polynóm.

Syntéza regulátora je potom daná riešením dvojice polynomických diofantických rovníc

$$ap + bq = e \quad (12)$$

$$fs + br = e \quad (13)$$

Hlavnou výhodou kvadratického kritéria oproti riadeniu za najmenší počet krokov je možnosť penalizácie akčných zásahov, ktorá sa určuje kladnou hodnotou parametra Φ .

Parametre Φ a Ψ sa určujú experimentálne.

c) *Stochastické riadenie (STP)* minimalizuje kritérium

$$J = \sigma^2 u + \sigma(u - y)^2 \quad (14)$$

kde σ^2 je operátor ustáleného rozptylu.

Pri aplikácii na fermentore LF-3 nebol tento typ riadenia skúmaný.

Z praktického hľadiska je zaujímavá syntéza adaptívneho regulátora bez priebežnej identifikácie. Návrh algoritmu vychádza z kritéria miery kmitavosti regulačnej odchylky [4]. Miera kmitavosti je definovaná ako pomer frekvencií prechodu nulou regulačnej odchýlky a jej prvej diferenciencie.

$$X = f_0/f_v \quad (15)$$

kde f_0 - frekvencia prechodov regulačnej odchýlky nulou,

f_v - frekvencia prechodu nulou jej prvej diferenciencie.

Optimálna hodnota X je 0,5.

Výsledky a diskusia

Pri riadení laboratórneho fermentora LF 3 pomocou adaptívneho regulátora bez priebežnej identifikácie bola akčná veličina v n -tom kroku $u(i)$ v tvare

$$u(i) = \sum_{i=1}^n \alpha(n)[e(i) + \beta(i)\Delta e(i) + \gamma(i)\Delta^2 e(i)] \quad (16)$$

$u(i)$ - akčná veličina v i -tom kroku

$e(i)$ - regulačná odchýlka v i -tom kroku

$\Delta e(i), \Delta^2 e(i)$ - prvá a druhá diferenciencia reg.odchýlky v i -tom kroku

α - celkové zosilnenie

v diskrétnom vyjadrení

$$u(n) = u(n-1) + \alpha[e(n) + 2\tau_v\Delta e(n) + 2\tau_v^2\Delta^2 e(n)] \quad (17)$$

kde použité adaptačné rovnice pre τ_v a spoločné zosilnenie majú tvar

$$\tau_v = \tau_v + \lambda(\text{sgn}|\Delta e| - \text{sgn}|\Delta^2 e|) \quad (18)$$

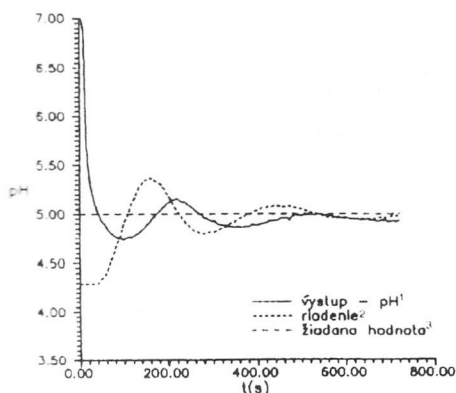
$$\alpha = \alpha + c\alpha/\tau_v \quad (19)$$

Ak regulačná odchýlka mení znamienko, adaptačný vzťah pre výpočet α má tvar $\alpha = 0,75\alpha$. Počiatočné hodnoty α , τ_v a konštanty c , λ boli pre laboratórny fermentor LF-3 zvolené nasledovne:

$$\tau_v = 0,5; \alpha = 0,2; c = 0,045; \lambda = 0,06.$$

Priebeh regulačného pochodu pri riadení pomocou adaptívneho regulátora v laboratornom fermentore LF-3 (podľa rovnice 17) je na obr.5.

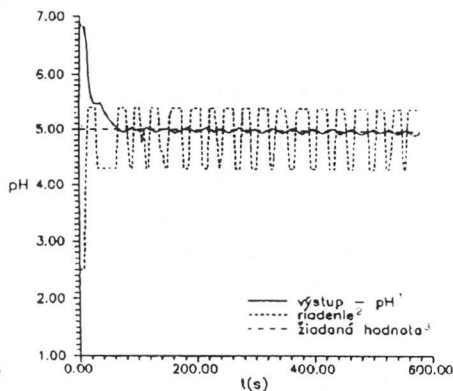
Časovo optimálne riadenie pH DBP je na obr.6 a kvadratické riadenie LQP je na obr.7.



Obr. 5. Riadenie pH v laboratórnom fermentore LF-3 pomocou zmesi CO_2 + vzduch s adaptívnym nastavením PSD regulátora.

Fig. 5. Controlled pH course as results of adaptive PID control using the manipulating variable " CO_2 -air".

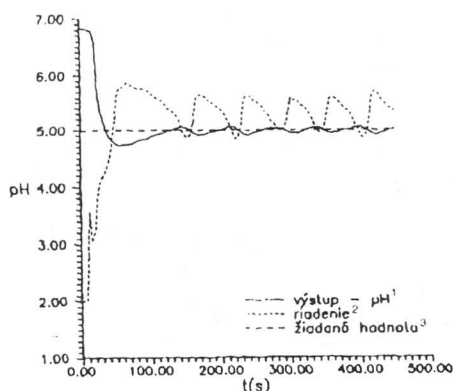
1 - Output-pH, 2 - Control, 3 - Desired value.



Obr. 6. Riadenie pH v LF-3 pomocou zmesi CO_2 + vzduch s adaptívnym spätnoväzbovým regulátorom za konečný počet krokov DBP.

Fig. 6. Controlled pH courses as results of adaptive dead-beat control using the manipulating variable " CO_2 -air".

1 - Output-pH, 2 - Control, 3 - Desired value.



Obr. 7. Riadenie pH v LF-3 pomocou zmesi CO_2 + vzduch s adaptívnym spätnoväzbovým regulátorom s kvadratickým kritériom LQP.

Fig. 7. Adaptive control of pH via feedback regulator based on the LQP criterion using the manipulating variable " CO_2 -air".

1 - Output-pH, 2 - Control, 3 - Desired value.

Pri adaptívnom riadení DBP zákon riadenia mal tvar

$$u(n) = u(n-1) + q_0 e(i) + q_1 e(i-1) \quad (20)$$

$$\text{kde } q_0 = p_0(1-a_1) \quad (21)$$

$$p_0 = 1$$

$$q_1 = \frac{a_1}{b_1} \quad (22)$$

Koeficienty diskrétného prenosu a_1 , b_1 sa počítali v každej perióde vzorkovania priebežnou identifikačnou metódou LDFIL.

Pre adaptívne riadenie LQP bolo:

$$\Phi(1 + a_1^2) + b_1^2 = e_0^2 + e_1^2 = m_0 \quad (23)$$

$$a_1 = e_1 e_0 = m_1 \quad (24)$$

$$\text{kde } e_0 = \sqrt{\sigma}$$

$$e_1 = \frac{m_1}{\sigma}$$

$$\text{kde } \sigma = \frac{m_0}{2} + \sqrt{m_0^2(4 - m_1)^2} \quad (25)$$

$$q_0 = \frac{(e_1 + p_0 - a_1 p_0)}{b_1} \quad (26)$$

$$q_1 = \frac{a_1 p_0}{b_1} \quad (27)$$

Hodnota Φ bola zvolená podľa dynamických vlastností laboratórneho fermentora LF-3 a jej hodnota v prípade, že žiadaná hodnota pH bola väčšia ako namerané pH bola $\Phi = 0,01$. V prípade, že žiadaná hodnota pH bola menšia ako nameraná hodnota pH bolo $\Phi = 10$.

Ako vidieť z obrázkov 5, 6, 7 vplyv jednotlivých algoritmov na kvalitu regulačného pochodu je dosť výrazný. Vplyv jednotlivých algoritmov riadenia (adaptívny PSD regulátor, DBP, LQP) na ukazovatele kvality regulačného pochodu a to dobu regulácie T_{reg} , maximálneho preregulovania σ a pomerného koeficientu tlmenia ξ sú v tabuľke 1.

Z uvedeného vyplýva, že najrýchlejší je algoritmus DBP. Ako vidieť z obr.6 riadenie bolo skoro dvojpolohové. Lepší priebeh riadenia bol pri algoritme LQP, kedy síce doba regulácie bola väčšia, ale maximálne preregulovanie bolo menšie. Uvedené výsledky sú pre reguláciu v kyslej oblasti. Pre reguláciu v zásaditej a neutrálnej oblasti sa regulácia vykonávala pomocou dávkovania zmesi CO_2 + vzduch + NH_3 resp. CO_2 + N_2 + NH_3 . Priebeh

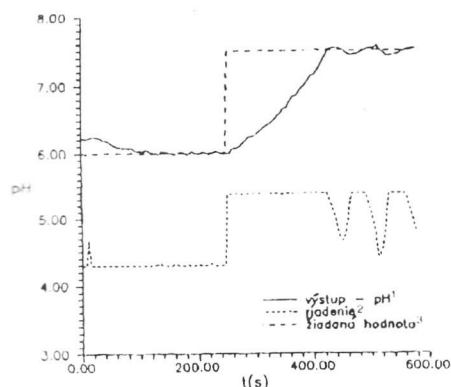
Tabuľka 1. Vplyv jednotlivých algoritmov riadenia na ukazovatele kvality regulačného pochodu.
Table 1. Effect of individual control algorithms on quality digit of regulating process.

Algoritmus riadenia ¹	T_{reg} (s)	σ (%)	ξ
adaptívny PSD ²	470	12,5	0,52
DBP ³	100	10	0,12
LQP ⁴	190	2,7	0,67

T_{reg} - doba regulácie; regulating time, σ - maximálne preregulovanie; maximum overshoot, ξ - pomerný koeficient tlmenia; proportion dumping coefficient, 1 - Control algorithmus, 2 - Adaptive PSD, 3 - DBP, 4 - LQP.

regulačného pochodu je na obr.8 pre algoritmus DBP a na obr.9 pre algoritmus LQP. Ako vidieť z obrázkov, časovooptimálny adaptívny algoritmus DBP je vyhovujúci pre riadenie pH v neutrálnej a zásaditej oblasti.

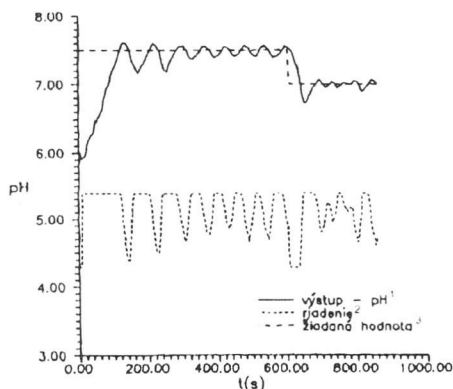
Riadenie pH vo fermentore bolo skúmané len vo vodnom roztoku bez prítomnosti mikroorganizmov produkujúcich CO_2 . Takéto riadenie je však použiteľné aj vo fyziologických podmienkach, pretože použité algoritmy riadenia sú adaptívne. Parametre prenosu riadenej sústavy sa opätovne identifikujú v každej perióde vzorkovania. Vzhľadom na to, že dopravné oneskorenie pH sondy je vo fermentačných procesoch zvyčajne menšie ako



Obr.8. Riadenie pH v LF-3 pomocou zmesi CO_2 + vzduch + NH_3 s adaptívnym spätnoväzbovým regulátorom za konečný počet krokov DBP.

Fig.8. Adaptive feedback control of pH based on the DBP strategy using the manipulating variable " CO_2 - air - NH_3 ".

1 - Output-pH, 2 - Control, 3 - Desired value.



Obr.9. Riadenie pH v LF-3 pomocou zmesi CO_2 + vzduch + NH_3 s adaptívnym spätnoväzbovým regulátorom s kvadratickým kritériom LQP.

Fig.9. Adaptive control of pH via feedback regulator governed by the LQP strategy using the manipulating variable " CO_2 - air - NH_3 ".

1 - Output-pH, 2 - Control, 3 - Desired value.

časová konštanta riadenej sústavy, sú opísané adaptívne algoritmy riadenia schopné zohľadniť i nepresnosť merania pH spôsobenú dopravným oneskorením sondy. V prípade veľkého dopravného oneskorenia je možné uspokojivé výsledky dosiahnuť pripojením tzv. Smithovho prediktora k regulátoru sústavy [5].

Literatúra

1. HEBKÝ, Z., Vícenásobné vzorkování při číslicovém řízení. Automatizace, 27, 1984, č.6.
2. BASTIN, G. - DOCHAIN, D., On-line estimation and adaptive control of bioreactors. Amsterdam - Oxford - New York - Tokio, 1990.
3. PROKOP, R., Adaptívne číslicové riadenie založené na polynomiálnom prístupe. Automatizace, 29, 1986, č.1, s.3-7.
4. MARŠÍK, J., A new conception of digital adaptive PID-controller with stepwise parameter optimization. Preprints congress IFAC, Budapest, 1984, s.284-289.
5. BAKOŠOVÁ, M. - ZEMANOVIČOVÁ, A. - KARŠAIOVÁ, M., Realizácia číslicového riadenia koncentrácie plynnej zmesi. Automatizace (v tlači).

Do redakcie došlo 7.1.1993.

Discrete-time adaptive control of laboratory fermenter LF-3

Summary

In the paper, the problem of discrete-time pH control in the laboratory fermenter LF-3 is described. The controlled variable pH has been driven from one steady state to another by changing the composition of the inlet gas-mixture, which was composed of CO_2 , NH_3 and air. For pH control a self-tuning regulator based on a combination of a discrete linear algorithm and recursive least squares identification method has been implemented.