

Niektoré aspekty merania a regulácie pH v bioreaktoroch

ANNA ZEMANOVIČOVÁ—MONIKA BAKOŠOVÁ—MÁRIA KARŠAIOVÁ—
—JAROSLAV ZEMANOVIČ

Súhrn. V príspevku sú uvedené možnosti regulácie pH v bioreaktore s pH-metrom a mikropočítačom v uzavretej slučke. Riadenia sa uskutočnili pomocou širkovomodulovaného riadiaceho signálu so solenoidovými ventilmi ako akčným členom, pričom sa ukázal ako vyhovujúci algoritmus PI v prípade, že sa za snímač zaradil hardverový filter.

V posledných rokoch sa značne rozvinul priemysel založený na biologických procesoch. Poznáme celý rad výrob, kde pomocou mikroorganizmov získavame rôzne produkty, ako sú organické kyseliny, enzýmy, aminokyseliny, hormóny, antibiotiká i potravinárske produkty.

Rýchly rozvoj biochémie, mikrobiológie a genetiky mikroorganizmov prináša celý rad technických problémov, ktoré sa musia riešiť spolu s konštruktérmi fermentačných zariadení, ako aj s odborníkmi z oblasti automatizácie a riadenia fermentačných procesov.

Pri riadení bioreaktora je veľmi dôležité presné a spoľahlivé meranie a regulácia pH.

Experimentálna časť

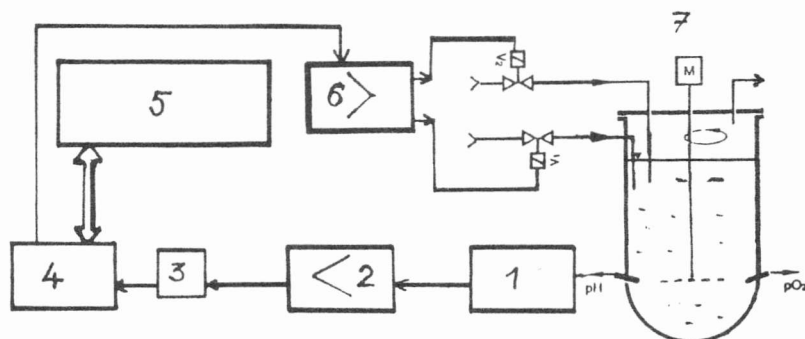
Na snímač a regulátor pH sa kladú čoraz väčšie požiadavky [1, 2]. Sú to: spoľahlivosť, presnosť, priaznivé dynamické vlastnosti, odolnosť proti rušivým vplyvom.

Pripojenie pH-metra na počítač umožňuje zlepšiť vlastnosti snímača pH napríklad číslicovou filtráciou meraného signálu, dovoľuje štatistické automa-

Ing. Anna Zemanovičová, CSc., Ing. Monika Bakošová, CSc., Ing. Mária Karšaiová, CSc., Katedra automatizácie, Ing. Jaroslav Zemanovič, CSc., Katedra mlieka, tukov a hygieny potravín, CHTF STU, Radlinského 9, 812 37 Bratislava

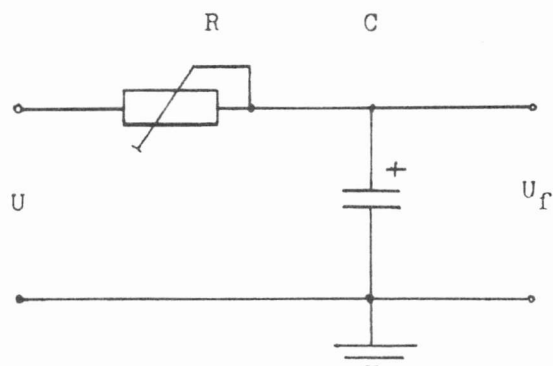
tické spracovanie meraného signálu — t.j. výpočet strednej hodnoty, disperzie, smerodajnej odchýlky, koeficienta asymetrie a excesu, vylúčenie hrubých chýb a výpočet autokorelačnej funkcie. Umožňuje ďalej využiť pri návrhu číslicového filtra aj Fourierovou transformáciou v prípade, že je veľký pomer šumu k meranému signálu.

Je možné tiež automaticky vyhodnotiť dynamiku sústavy, t.j. bioreaktora a snímača pH, ktorá je dôležitá pri návrhu algoritmu riadenia.



Obr. 1. Bloková schéma regulácie v bioreaktore. 1 — snímač a prevodník pH, 2 — jednosmerný zosilňovač, 3 — hardverový filter — RC člen, 4 — jednotka styku s prostredím SHS-A, 5 — osobný mikropočítač PC-AT, 6 — výkonový zosilňovač 0—24 V, laboratórny fermentor LF-3.

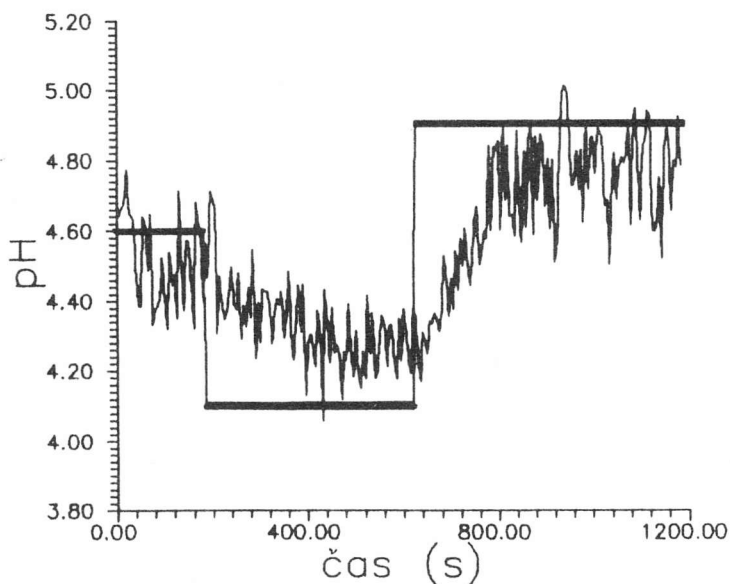
Fig. 1. Block diagram of control in bioreactor. 1 — pH sensing unit and pH converter, 2 — one-way amplifier, 3 — hardware filter — RC element, 4 — unit ensuring contact with surrounding medium SHS-A, 5 — personal microcomputer PC-AT, 6 — power amplifier 0—24 V, 7 — laboratory fermentor LF-3.



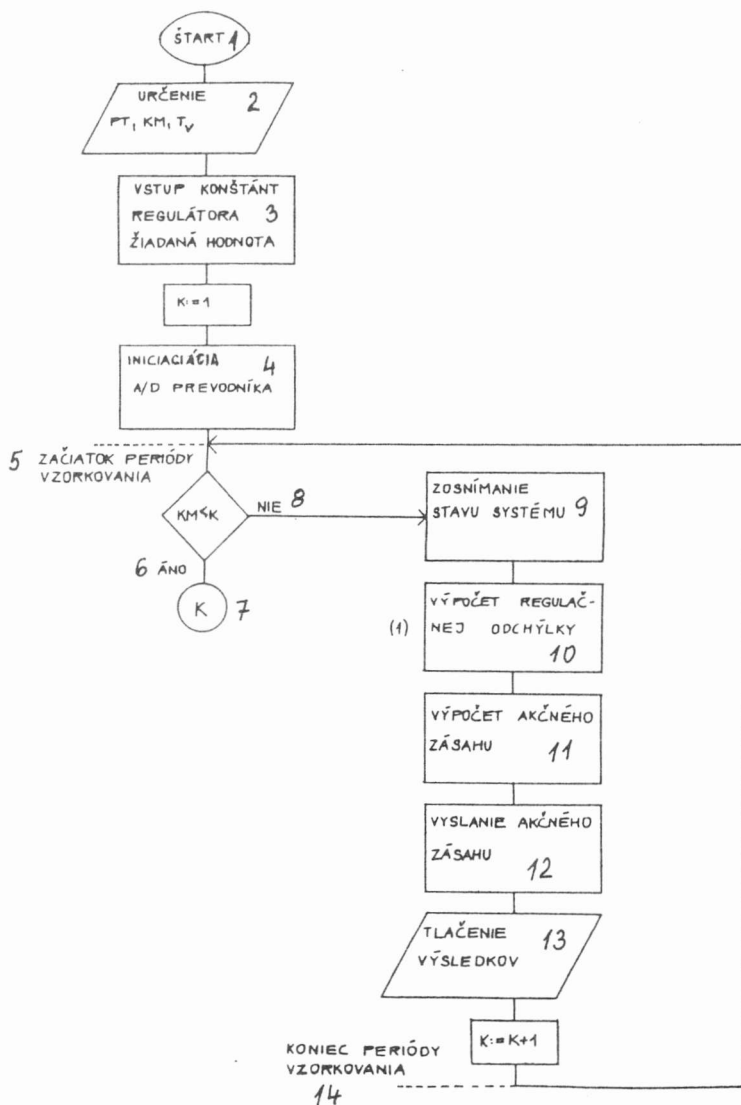
Obr. 2. Schéma zapojenia hardverového filtra — RC člena. $R = 1\text{K}\Omega$, $C = 2\text{MF}$.

Fig. 2. Circuit diagram of hardware filter — RC element. $R = 1\text{K}\Omega$, $C = 2\text{MF}$.

Na obr. 1 je bloková schéma zapojenia pH-metra na osobný mikropočítač PC-AT. Signál pH z prevodníka 1 po zosilnení v zosilňovači 2 prechádza cez hardverový filter 3, ktorého schéma je na obr. 2. Filter sa skladá z RC člena, ktorý bol navrhnutý na základe analýzy zašumeného signálu. Jeho priebeh je vidieť na obr. 3. Hodnota odporu R a kapacity je $1\,500\,\Omega$ a $2\,\text{MF}$. Zosilňovač 2 sme navrhli tak, aby jeho výstupný signál bol v rozsahu $0\text{--}2\,\text{V}$. Tento rozsah je potrebný pre správnu činnosť A/Č prevodníka. A/Č prevodník bol umiestnený v jednotke styku s prostredím 4 typ SHS-A, ktorý vyrába Rela EF STU Bratislava. Táto jednotka styku s prostredím obsahuje 12-bitový analógovo-číslicový prevodník A/Č a integrovaný obvod IO 8253 — programovateľný časovač. Z tohto obvodu sme odoberali výstupný signál, ktorý po zosilnení ovládal solenoidové ventily. Solenoidové ventily vysielali s určitou frekvenciou PT šírkovomodulovaný riadiaci signál na solenoidové ventily, ovládajúce prívod kyseliny alebo zásady. Výstup z jednotky styku s prostredím sa zosilnil pomocou zosilňovača 6, pretože ventily sú ovládané napätím $24\,\text{V}$. Fermentor 7, v ktorom sa riadilo pH je laboratórny fermentor LF-3. Vývojový diagram programu na riadenie pH je na obr. 4.



Obr. 3. Časový priebeh nefiltrovaného meraného signálu pH.
Fig. 3. Time dependence for unfiltered measured pH signal x-axis — time.



Obr. 4. Vývojový diagram programu na riadenie pH. PT — základná frekvencia šírkovomodu-
lovaného signálu, KM — počet krokov riadenia, T_v — perióda vzorkovania.

Fig. 4. Flow diagram of the operating sequence for pH control. ¹Start, ²Determination of PT , KM , T_v ; PT = base frequency of pulse-width modulated signal, KM = number of control steps, T_v — sampling period; ³Input of controller constants, required value; ⁴Initiation of A-D converter; ⁵Start of the sampling period; ⁶Yes; ⁷End; ⁸No; ⁹Sensing of the conditions in the system; ¹⁰Computation of control deviation; ¹¹Computation of action intervention; ¹²Transmission of action intervention; ¹³Printing of results; ¹⁴End of the sampling period.

Dynamika bioreaktora sa zisťovala identifikáciou z prechodovej charakteristiky.

Prenos sústavy je

$$F(p) = \frac{e^{-T_d p}}{(T_p + 1)^n}, \quad (1)$$

kde $T_d = 22$ s je dopravné oneskorenie, $T = 154$ s je časová konštanta, $n = 2$ je rád sústavy, p je Laplaceov operátor.

Na riadenie sme použili číslicový PI regulátor, pre ktorý platí diferenčná rovnica (2), kde riadiaci signál u v k -tom kroku je:

$$u(k) = r_o(e(k) + \frac{T_v}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i)), \quad (2)$$

kde e je regulačná odchýlka, T_v — perióda vzorkovania, r_o — proporcionálna konštanta, T_i — integračná konštanta.

Ak označíme

$$P = r_o, \quad (3)$$

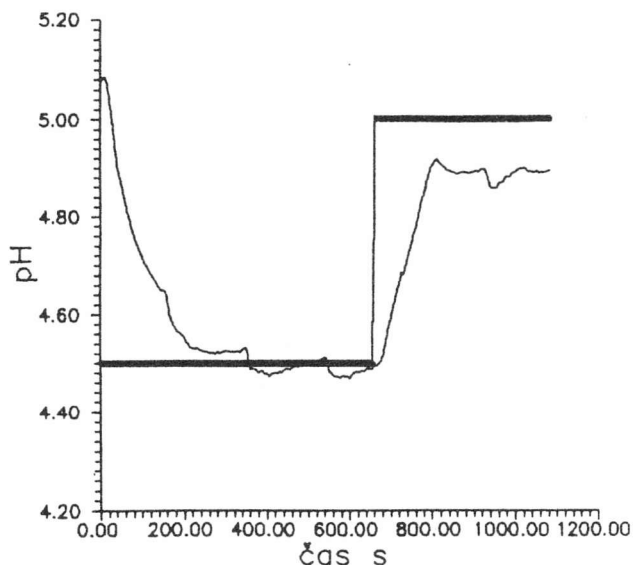
$$S = r_o \frac{T_v}{T_i} \quad (4)$$

môžeme pre sústavu s prenosom (1) vypočítať pomocou kritéria optimálneho modulu alebo Reinischovej metódy [4] optimálne konštanty regulátora P a S . Pre danú sústavu s periódou vzorkovania $R_v = 5$ s, sme zistili, že $P = 80$ a $S = 0,025$.

Priebeh riadenia, keď za snímač pH zaradíme hardverový filter je na obr. 5. Ako vidieť z obrázku, merané pH čiastočne kmitá okolo žiadanej hodnoty a pri žiadanej hodnote pH 5 ostala trvalá regulačná odchýlka. Táto skutočnosť svedčí o nelinearite sústavy. Určité problémy pri riadení spôsobuje aj dopravné oneskorenie, takže zlepšenie regulačného pochodu možno dosiahnuť uplatnením iného algoritmu riadenia, ktoré je uvedené napr. v [3, 5].

Záver

Výsledky riadenia pH v biorektore s mikropočítačom v uzavretej slučke ukázali, že na riadenie sústavy s dopravným oneskorením možno použiť aj číslicový PI-regulátor, ak sú dovolené maximálne odchýlky pH od žiadanej hodnoty v ustálenom stave pod pH 0,12. Perióda vzorkovania T_v musí byť vhodne zvolená.



Obr. 5. Priebeh regulovaného signálu pH v bioreaktore v závislosti od času pri zmene žiadanej hodnoty (výstupný signál pH prechádzal cez filter 3).

Fig. 5. Dependence of pH control signal in bioreactor on time at the alteration of required value (pH output signal passed through filter 3).

Literatúra

1. Kol., Sensor Lines. Sonderausgabe zurACHEMA. Steinbad, Ingold Messtechnik.
2. LUTMANN, R.—BELLGARDT, K. H.—PIEHL, G. W., Bioengineering, 1987, č. 4, s. 30.
3. MALEK-ZAVAREI, M.—JAMSHIDI, M., Time-delay Systems. Amsterdam, 1987.
4. ŠVEC, J. a kol.: Teorie automatického řízení. Praha, SNTL 1969.
5. IKRÉNYI, P., In: Zborník VI. konf. ASRCHPV, Vysoké Tatry 1986.

Do redakcie došlo 27. 11. 1991

Some aspects of pH-value measuring and control in bioreactors

Summary

The paper gives the options for pH-value control in bioreactor by means of pH-meter and computer in closed loop. Control has been carried out by pulse-width modulated control signal with solenoid valves as final control element, and in case of introducing hardware filter after sensing unit, PI algorithm has proved to be satisfactory.

Некоторые аспекты измерения и регуляции рН в биореакторах

В статье приведены возможности регуляции рН в биореакторе с помощью рН-метра и микрокомпьютера в замкнутом округе. Управление осуществлялось с помощью ширококомодульного управляющего сигнала с соленоидными клапанами как действующим элементом, при этом подходящим показался алгоритм PI в случае если после датчика был включен хартверовый фильтр.