

# Riadenie laboratórneho fermentora pomocou neurónového regulátora

Alojz Mészáros, Anton Andrášik, Viera Illeová, Lubomír Šperka

**Príspevok sa zaoberá počítačovým riadením laboratórneho procesu s využitím metódy umelých neurónových sietí (UNS). Výhody použitia stratégie UNS sú deklarované získanými výsledkami pri praktickej aplikácii neurónových sietí na riadenie koncentrácie rozpusteného kyslíka v biochemickom reaktore LF-3.**

## Úvod

V poslednom období sa fermentačné procesy využívajú v mnohých priemyselných odvetviach počínajúc výrobou liekov a končiac spracúvaním odpadových materiálov alebo čistením odpadových vôd. Preto rastie aj záujem o kvalitné riadiace algoritmy, ktoré zvládnu riadenie aj takých komplikovaných procesov, akými fermentačné procesy bezpochyby sú. Riadenie prevažnej väčšiny súčasných priemyselných bioprocsov spočíva vo vytvorení a udržiavaní adekvátnych podmienok. Uskutočňuje sa to jednak prostredníctvom živín dodávaných do kultivačného prostredia, jednak prostredníctvom nastavenia teploty, pH, tlaku, prietoku vzduchu, koncentrácie kyslíka a otáčok miešadla na hodnoty získané buď experimentálnou cestou, alebo dlhoročnými skúsenosťami. V súčasnosti využívané fermentačné procesy ponúkajú množstvo zaujímavých možností aplikácie moderných metód riadenia, ktoré by viedli k značným úsporám drahých surovín alebo k efektívnejšiemu využitiu nákladných technológií. Avšak aplikácia najnovších algoritmov riadenia v priemyselne využívaných bioprocsoch vzhľadom na celý rad problémov výrazne zaostáva v porovnaní s klasickými chemickými výrobami. Limitujúcim faktorom je najčastejšie obmedzená možnosť získania rýchlej a adekvátnej informácie o stave procesu, t. j. nedostatok on-line senzorov na snímanie najrelevantnejších stavových veličnín, ako je koncentrácia substrátu, biomasy atď., ktoré sú potrebné pre spätnoväzbové dynamické riadenie.

Terajšie obdobie v riadení bioprocsov sa preto dá charakterizovať ako prechod od jednoduchých foriem riadenia jednotlivých parametrov procesu k zložitým riadiacim a optimalizačným algoritmom. Spoločným menovateľom úspešnej aplikácie a overenia kvality týchto algoritmov však zostáva návrh efektívneho riadiaceho systému, schopného realizovať zložité, numericky náročné a komplikované riadiace programy.

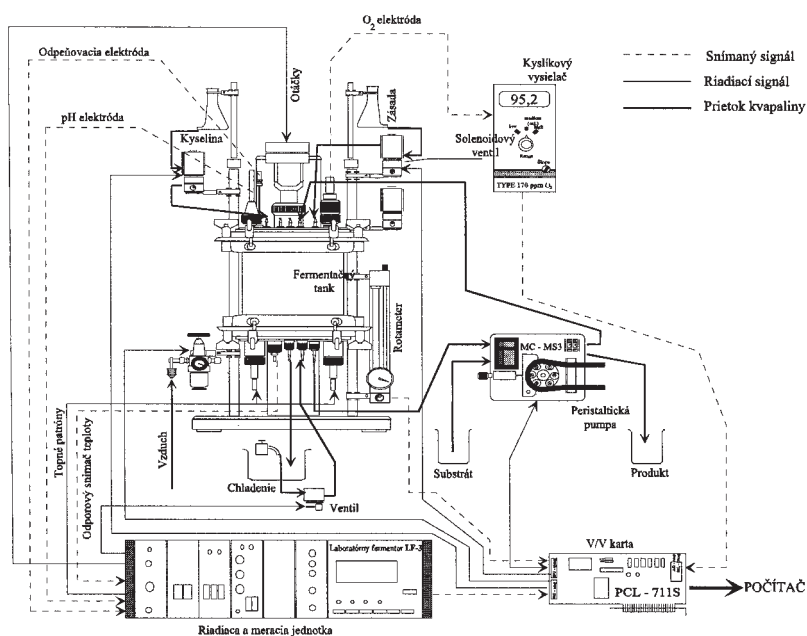
Neurónová sieť ako univerzálny aproximátor sa ukazuje ako efektívny nástroj na modelovanie a riadenie procesov, najmä pri výskyte zložitých nelineárnych a neurčitostí. V súčasnosti sa veľkej obľube teší predovšetkým vďaka schopnosti modelovať zložité nelineárne systémy za nízku cenu. Riadenie režimu bioprocusu ovládaním koncentrácie rozpusteného kyslíka (DO) je typickou úlohou, ktorú môžeme nájsť vo veľkom množstve biotechnologických výrob.

Cieľom tohto článku je prezentovať výsledky priameho počítačového riadenia laboratórneho fermentora, implementáciou spätnoväzbového neurónového regulátora. Použité umelé neurónové siete sú tréňované off-line, pomocou dát získaných z experimentov. Riadiaci algoritmus je aplikovaný na riadenie DO v laboratórnom fermentore LF-3. Získané výsledky potvrdzujú vhodnosť implementácie UNS pri reálnych procesoch s výskytom nelinearit a porúch, ktoré by spôsobovali problémy pri riadení klasickými metódami.

## Laboratórny fermentor LF-3

Laboratórny fermentor LF-3 je prístroj, určený na pestovanie rôznych druhov mikroorganizmov za sterilných podmienok, nastaviteľnej teploty, veľkosti otáčok miešadla a pH. Ďalšou z možností je napr. jeho použitie pri miešaní kvapalín, vyžadujúcich sterilné prostredie s možnosťou udržiavania stanoveného pH, veľkosti otáčok miešadla, nastaviteľnej teploty a sterilného odberu vzoriek. Do tanku je možné kontinuálne privádzať a v kvapaline rozpúšťať ľubovoľný nevýbušný plyn.

Celkové prepojenie fermentora LF-3 s počítačom je na obr. 1. Základom je sklenený valec v celkovom objeme 1,5 litra, ktorý je uzavretý z dvoch strán pomocou nerezového dna a veka. Veko aj dno sú k valcu pripevnené pomocou úchytných skrutiek. Nepriepustnosť spojenia je zabezpečená gumenými tesneniami. Elektromotor s možnosťou zmeny otáčok (v rozsahu 30 – 400 po 10 ot./min.) poháňa cez prevod ozubeným remeňom os miešadla. Vyhrievacia patróna spolu s platínoým senzorom a chladiacou slučkou slúži na udržiavanie teploty. Plyn do fermentora vstupuje cez výmenný filter, redukčný ventil tlaku a regulátor prietoku množstva. Z fermentora plyn odchádza cez zariadenie nazývané



Obr.1 Prepojenie fermentora LF-3 s počítačom

„odvetranie tanku“. Očkovanie tanku sa realizuje pomocou prepichovacej zátky. Odber vzoriek z tanku je ručný. Veko ďalej obsahuje dva vstupné porty pre vstup kyseliny a zásady pri regulácii pH, vstupný port pre senzor merajúci výšku peny, ako aj vstupné porty pre pH senzor a kyslíkovú elektródu. Dno obsahuje ešte jeden tubus pre rezervnú vyhrievaciu patrónu, odtokový a vypúšťací otvor.

K laboratórnemu fermentoru LF-3 je dodávaná aj elektronická regulačná a meracia časť. Ide o kompaktnú stavebnicovú skrinku, ktorá obsahuje obvody na meranie a reguláciu teploty, pH, otáčok a odpeňovania. Väčšinou ide o jednoduché dvojpohové regulátory s ručným nastavením žiadanej hodnoty a veličín charakterizujúcich základné vlastnosti regulačného procesu.

### Opis riadiaceho systému

Vzhľadom na filozofiu riadenia, numerickú náročnosť, ako aj vedeckovýskumné a pedagogické ciele, je potrebné, aby riadiaci systém spĺňal nasledovné požiadavky:

- **Flexibilita a otvorenosť** – je dôležité, aby bolo možné systém priebežne rozširovať, t. j. pripájať ďalšie hardvérové a softvérové prostriedky pre inteligentné monitorovanie a riadenie procesu. Implementácia nových rutín riadenia, naprogramovaných v známych programovacích jazykoch by mala byť čo najjednoduchšia.
- **Hierarchickosť** – viacvrstvová štruktúra je výhodná nielen vzhľadom na typ predpokladaného druhu riadiaceho algoritmu, ale tiež pre jej kompatibilitu s priemyselne distribuovanými riadiacimi systémami. Cieľ riadenia je pritom definovaný tvarom účelovej funkcie, kde na dosiahnutie optimálneho priebehu fermentačného procesu je potrebné riadiť viacero veličín naraz.
- **Jednoduchosť** – manipulácia zmeny štruktúry a techniky riadenia, čítanie požadovaných údajov a zber dát musia byť čo najjednoduchšie. Formát údajov musí byť prístupný možnosti neskoršieho spracovania pomocou bežne dostupného komerčného softvéru.
- **Spolahlivosť, presnosť a sterilita** – vzhľadom na časovú náročnosť fermentačných procesov je nevyhnutné, aby jednotlivé časti riadiaceho a meracieho systému pracovali spoľahlivo. Presnosť meracích a regulačných členov musí byť dostatočná na to, aby sa zabezpečila reprodukovateľnosť riadiacich a optimalizačných experimentov. Fermentačné procesy prebiehajú za prísne sterilných podmienok, preto aj všetky meracie členy in-situ musia byť sterilizovateľné.

Uvažovaný riadiaci systém je schopný regulovať pH, prietok substrátu a prietok vzduchu. Snímanými veličinami sú teplota, koncentrácia rozpusteného kyslíka, pH, aktuálne otáčky peristaltického čerpadla a manuálne nastavené otáčky čerpadla. Stručný popis regulovania a snímání jednotlivých veličín riadiacim systémom je uvedený v nasledujúcom odstavci.

- **Regulácia teploty** – teplota je snímaná odporovým teplôtym snímačom Pt 100. Dvojpohový regulátor elektronickej jednotky spĺňa na základe porovnania so žiadanou teplotou (zadávanou ručne), ohrevnú patrónu alebo ventil prítoku chladiacej kvapaliny.
- **Regulácia otáčok** – otáčky sú regulované priamo regulátorom elektronickej jednotky na princípe porovnávania žiadanej kmitočtu, ktorý zodpovedá ručne zadanej hodnote, s kmitočtom prichádzajúcim z motora.
- **Regulácia pH** – pH je merané sterilizovateľnou kombinovanou gélovou elektródou 405-DPAS-SC-K8S/120 (fy Metler-Toledo). Hodnota pH môže byť na základe porovnania so žiadanou hodnotou regulovaná dvojpohovým regulátorom elektronickej jednotky, ktorý otvára ventil prívodu kyseliny alebo zásady, resp. počítačom.
- **Regulácia výšky peny** – pri dotyku peny s kovovou sondou v tanku sa po určitom časovom oneskorení, ktoré je možné na-

staví ručne, zopne solenoidový ventil prívodu odpeňovacieho činidla.

- **Regulácia koncentrácie rozpusteného kyslíka** – koncentrácia kyslíka je snímaná sterilizovateľnou polarografickou elektródou (fy Ingold), ktorej signál je zosilnený vysielateľom (INGOLD O2 170). Vysielateľ potom poskytuje štandardný signál 4...20 mA, ktorý sa podľa potreby môže ďalej spracovávať počítačom.

### Robustný neuronový regulátor

Jednou z efektívnych, pritom však jednoduchých možností návrhu spätnoväzbového regulátora na báze umelých neuronových sietí je skonštruovať inverzný neuronový model procesu. Takýto model v úlohe spätnoväzbového regulátora sa najčastejšie správa ako PD regulátor a uspokojivo zreguluje iba nominálny systém. V perturbovaných prípadoch reaguje neadekvátne a prinajmenšom vedie k značnej trvalej regulačnej odchýlke.

Pri tréningu neuronového regulátora ako inverzného modelu procesu môže pri regulácii nastať problém, ak sa zmenia reakčné podmienky či už vplyvom vonkajšieho prostredia alebo vplyvom poruchovej veličiny. Regulátor navrhuje akčný zásah tak, akoby k tejto zmene nedošlo, čo v konečnom dôsledku môže viesť k výskytu trvalej regulačnej odchýlky. Preto, okrem jednoduchého inverzného regulátora, natrénovaného v režime off-line, bol navrhnutý a aj prakticky otestovaný prístup, ktorý sa zakladá na adaptívnom nastavení prahového koeficienta (biasu) výstupného neurónu ANN regulátora [2]. Adaptácia prahového neurónu sa uskutoční podľa pravidla:

$$B = B_0 + \beta \sum [DO_{ziasad}(t) - DO(t)] \quad (1)$$

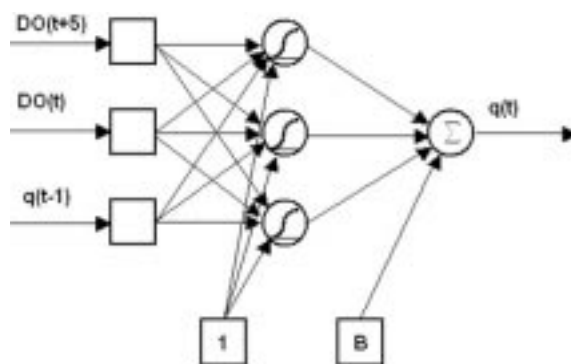
kde  $B_0$  je počiatočné nastavenie prahového neurónu,  $w(t)$  je žiadaná hodnota a  $\beta$  je adaptačný koeficient, ktorý je počas adaptácie konštantný a väčšinou sa nastavuje na malé reálne číslo z intervalu (0; 0,1) podľa charakteru procesu.

Štruktúra neuronového regulátora pri tréningu je zobrazená na obr. 2.

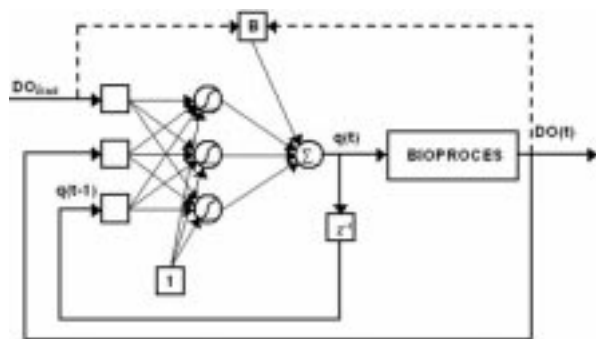
Výsledná štruktúra použitého modelu UNS, ktorá je výsledkom simulačnej analýzy procesu, pozostáva z 3 neurónov na vstupnej vrstve, 3 v skrytej vrstve a 1 neurónu na výstupe (obr. 2). Tréningovú množinu dát tvoria údaje nazbierané počas experimentu, pričom vstupy do UNS pozostávajú z hodnôt DO a hodnôt prietoku vzduchu, získaných v perióde  $(t + 5)$  a predchádzajúcej perióde vzorkovania. Výstupom zo siete je prietok vzduchu, ktorý je v tréningovej fáze porovnávaný s hodnotou získanou z experimentu. Vzhľadom na toto obmedzenie a charakter procesu, musel byť neuronový model tréningovaný off-line. Ako tréningový algoritmus bola použitá metóda konjugovaných gradientov v kombinácii s tzv. back-propagation pre nájdenie gradientu chybovej funkcie v tvare:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \sum_N (q - q(t))^2 \quad (2)$$

kde  $q$  predstavuje hodnotu prietoku, generovanú modelom UNS a  $q$  je hodnota prietoku, získaná z experimentu pri celkovom počte  $N$  nasnímaných dvojíc hodnôt  $q, DO$ .



Obr.2 Štruktúra neuronového regulátora

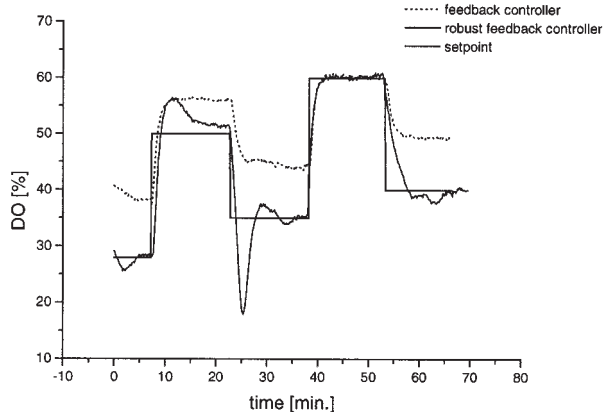


Obr.3 Schéma spätnoväzbového riadenia s robustným neurónovým regulátorom

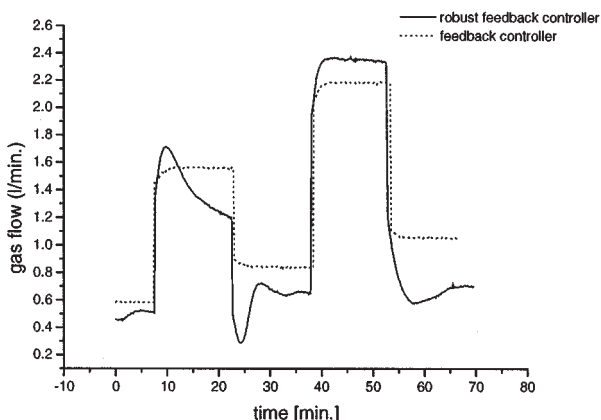
### Riadenie bioprocessu

Uvažujme laboratórny fermentor, v ktorom sa kultivuje biomasa na báze pekárenských kvasníc *Saccharomyces cerevisiae*. Jednou z dôležitých stavových veličín aeróbných fermentačných procesov (prebiehajúcich v prítomnosti kyslíka) je koncentrácia rozpustného kyslíka (DO), ktorá má zásadný vplyv na celkový priebeh a kvalitu fermentácie (t. j. na rast biomasy, inhibíciu substrátom, kontamináciu atď.). Práve preto je udržanie jej optimálneho profilu jedným z dôležitých cieľov riadenia procesu. Toto môže byť dosiahnuté manipulovaním prietoku procesného vzduchu ako akčnej veličiny.

Boli vykonané dva fermentačné experimenty pri 30 °C, pH = 4,5 a otáčkach miešadla 500 ot./min. Žiadaná hodnota pH sa udržiavala prídávaním zásady (10 % roztok NaOH) do kultivačného prostredia. Napájacie médium (substrát) obsahovalo tieto komponenty živín: glukóza (10 g); kvasnicový extrakt (3 g);  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (3,9 g);  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (1,9 g);  $\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$  (1,6 g);  $\text{CaCl}_2$  (0,6 g). Kontinuálny prietok substrátu do fermentora bol zabezpečený pomocou peristaltického čerpadla. Stratégia riadenia DO bola založená na ovládaní procesu zmenou prietoku procesného vzduchu



Obr.4 Riadenie fermentora neurónovým regulátorom – priebehy riadenej veličiny



Obr.5 Riadenie fermentora neurónovým regulátorom – priebehy akčnej veličiny

ako výstupu spätnoväzbového neurónového regulátora. Schéma tohoto spätnoväzbového riadenia využitím regulátora podľa obr. 2 je uvedená na obr. 3.

Pri tréningu siete na vstup sa privádzali aktuálne a budúce hodnoty (z kroku  $(t+5)$ ) regulovanej veličiny DO a minulé hodnoty akčnej veličiny  $q$ , ktorej aktuálne hodnoty boli odhadované na výstupe siete. Neurónový regulátor bol tréningovaný off-line s použitím metód konjugovaných gradientov a back-propagation. Aplikovali sme dve rozdielne stratégie riadenia pre dve individuálne kultivačné vsádzky. Prvý spôsob využíva jednoduchý, priamy inverzný neurónový regulátor bez úpravy. Druhý spôsob vylepšuje kvalitu riadenia zavedením adaptívneho prvku do nastavenia prahového koeficientu výstupného neurónu, ako je to popísané v rovnici (1).

Porovnanie experimentálnych výsledkov pre spomínané dva prípady nájdeme na obr. 4, resp. obr. 5, kde sú porovnané priebehy regulovanej veličiny DO, resp. akčnej veličiny  $q$ . Ako je z obrázkov zrejme, „čistý“ inverzný regulátor si nedokáže poradiť s nelineárnym procesom a trvalá regulačná odchýlka bola odstránená iba po uplatnení robustnej zložky.

### Záver

Získané výsledky poukazujú na dobrú schopnosť modelu UNS identifikovať nelineárne procesy v reálnych aplikáciách. Navrhované neurónové regulátory založené na inverznom modelovaní procesu a rozšírené o adaptívne prvky vykazujú dobré regulačné a sledovacie schopnosti. Implementácia neurónového regulátora pri vopred naprogramovaných knižniciach obsahujúcich matematický aparát UNS je veľmi jednoduchá a rýchla, pričom celý riadiaci systém je spoľahlivý a ľahko ovládateľný.

### Literatúra

- [1] MÉSZÁROS, A., ANDRÁŠIK, A., SZANYIOVÁ, A. (2000): Počítačové riadenie laboratórneho fermentora. Proceedings of the 27th International Conference SSCHE, Tatranské Matliare, May 22 – 26. 2000.
- [2] MÉSZÁROS, A. AND ANDRÁŠIK, A.: Robust and adaptive control in terms of neural networks. In Preprints of 13th Conference Process Control' 01. Štrbské Pleso, Slovakia, June 11 – 14. 2001.
- [3] HUNT, K. J. et al. (1992): Neural networks for control systems – A survey. Automatica, 28, pp. 1083 – 1112.
- [4] MÉSZÁROS, A., ANDRÁŠIK, A., RUSNÁK, A. (2000): Application of artificial neural network strategies in process control. Advances in Soft Computing. Proceedings of the European Symposium on Computational Intelligence. Košice, Slovakia 2000.
- [5] BAILEY, J. E. and OLLIS, D. F. (1986): Biochemical engineering fundamentals. McGraw-Hill, Singapore.
- [6] MÉSZÁROS, A., ANDRÁŠIK, A. AND ŠPERKA, L. (2002): Identification and computer control of a fermentor using neural networks. In Proc. 4th Asian Control Conference, Singapore.

*Tento príspevok vznikol s grantovou podporou VEGA MŠ SR a SAV pre projekt č. 1/8108/01 a 1/7337/20.*

**doc. Ing. Alojz Mészáros, CSc.**  
**Ing. Anton Andrášik**  
**Ing. Ľubomír Šperka**

**Katedra informatizácie a riadenia procesov**  
**FCHPT STU, Radlinského 9, 812 37 Bratislava**

**Ing. Viera Illeová**

**Katedra chemického a biochemického inžinierstva**  
**FCHPT STU, Radlinského 9, 812 37 Bratislava**