

Řízení technologického procesu fermentace

Pavel Pokorný, Vladimír Vašek

Na našem pracovišti, Institutu informačních technologií FT UTB ve Zlíně, byla vyvinuta technologie pro zpracování kožedělných odpadů pomocí enzymatické hydrolyzy. Tento proces v sobě zahrnuje tři části: procesy fermentace, filtrace a sušení. Zabýváme se návrhem komplexního řídicího systému pro celou tuto technologii. V tomto příspěvku jsou publikovány nejnovější poznatky o řízení prvního procesu – fermentace. Zařízení pro fermentaci je sestaveno v laboratorních podmínkách. Uskutečňujeme na něm experimenty tak, aby bylo možné celý řídicí algoritmus později využít v průmyslovém prostředí. Řízení procesu fermentace v sobě zahrnuje měření a regulaci teploty a pH. Zatímco k řízení pH stačí prostý proporcionální regulátor, regulace teploty je poněkud složitější, neboť se fermentační procesy v literatuře uvádějí jako nelineární. Z tohoto důvodu jsme porovnávali různé řídicí algoritmy.

1. Úvod

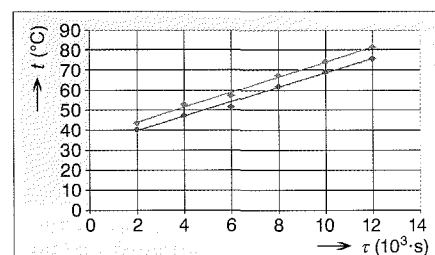
Technologický proces enzymatické hydrolyzy se skládá ze tří částí. První je chemická reakce v bioreaktoru (fermentoru) – její produkt se řízeným způsobem filtruje a hydrolyzát se suší v podtlakové odparce. K takto vzniklému bílkovinnému odpadu s vodou se přidává anorganická alkálie. Vytvořená směs

se za stálého míchání zahřívá na teplotu 60 až 80 °C po dobu jedné až šesti hodin. Potom se přidává enzym a směs se dále zahřívá po dobu jedné až čtyř hodin. Výsledná horká směs je filtrována a z filtrátu se odpařuje voda. Aby všechny technologické procesy běžely co nejrychleji (a tím i úsporně), je nutné zachovat vhodné provozní podmínky. Při procesu fermentace se udržuje vhodná teplota, pH a rychlost míchání. V druhé fázi, tj. ve fázi filtrace, se reguluje teplota, podtlak za filtračním papírem a výška hladiny a ve třetí fázi (odpařování) teplota, podtlak a výška hladiny filtrátu v odparce. Všechna potřebná zařízení jsou sestavena v laboratorních podmínkách na našem pracovišti [3].

Tento článek popisuje řízení procesu fermentace. Proces fermentace se řadí mezi kvasné biologické procesy. Jejich podstatou je biochemická přeměna roztoků, vyvolaná složitými organickými látkami – enzymy. Kvasné technologie dávají vzniknout lihu, pivu, vínu, pekařskému droždí nebo krmné biomase. Rychlost enzymatické reakce závisí na koncentraci reaktantů, na jejich povaze a stavu reakčního prostředí, tj. na teplotě, tlaku a na přítomnosti katalyzátorů. Při výrobě chromitých usní probíhá heterogenní reakce, katalyzovaná enzymem. Na optimum se reguluje teplota, která se u těchto enzymatických reakcí udržuje v rozsahu 60 až 80 °C, a pH, které je v rozmezí 8,5 až 9,5.

2. Popis fermentačního zařízení

Schéma laboratorní měřicí a regulační aparatury je na obr. 1. Chemická reakce probíhá v reaktoru (maximální objem 12 l). V něm jsou umístěny snímače teploty (Pt100) a pH (snímač s argentchloridovou elektrodou). Oba snímače jsou propojeny s převodníkovou skříní, kde se signály linearizují a unifikují na hodnotu 0 až 10 V. Ty se dále



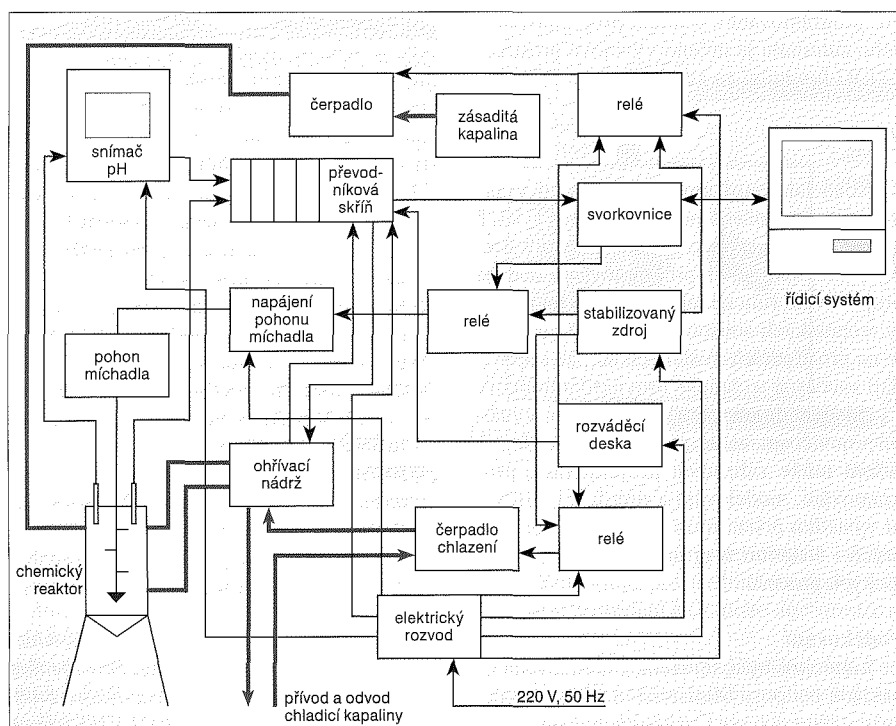
Obr. 2. Statické charakteristiky nádrže (červená barva) a reaktoru (modrá barva)

přivádějí do řídicího počítače, který generuje akční zásahy.

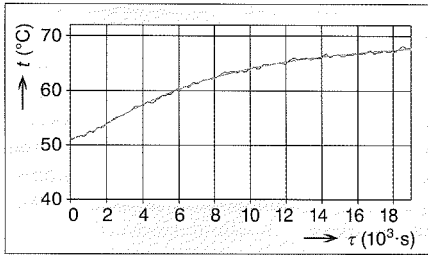
Teplota se reguluje impulsním regulátorem. Jde o regulátor s externím impulsováním s periodou vzorkování pět sekund. Jeho výstupem je širkově modulovaný dvouhodnotový signál (topí – netopí). Vypočítaná hodnota výstupu se na impuls akčního zásahu přepočítá tak, že v dané periodě je topení po určitou dobu zapnuto, po zbytek doby vypnuto (např. při výstupu 50 % se 2,5 s topí a 2,5 s netopí). Topná tělesa, která jsou umístěna v pomocné nádrži, kde se vyhřívá médium (olej), jsou spínána v převodníkové skříní. Cirkulaci média zajišťuje čerpadlo mezi touto nádrží a dvojitým pláštěm fermentačního reaktoru. S ohledem na možnost urychlení náběhu teploty na žádanou hodnotu je pomocná nádrž vybavena i chladicím zařízením. Chladicím médiem je voda odebíraná z vodovodu. Její přítok ovládá ventil řízený binární hodnotou z počítače.

Také pH se reguluje impulsním regulátorem. Spínání dávkovacího čerpadla, které soustavou hadiček dávkuje zásaditou látku ze zásobní nádrže do reaktoru, zajišťuje pomocné relé. V původní verzi byl okruh doplněn i dávkováním kyselá látku (zvýšení pH), ale zkušenosti vedly ke zjištění, že během reakce se pH stále snižuje, a tak se toto řešení ukázalo jako zbytečné.

Pro dokonalý průběh reakce je celé zařízení vybaveno míchadlem, která se zapíná z počítače prostřednictvím relé. S využitím počítače lze unifikovaným analogovým signálem 0 až 10 V ovládat i otáčky v rozme-



Obr. 1. Blokové schéma subsystému řízení bioreaktoru



Obr. 3. Naměřená (modrá barva) a vypočítaná (fialová barva) přechodová charakteristika ohřevu fermentačního reaktoru

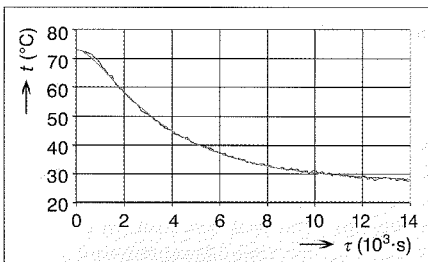
zí 0 až 60 min⁻¹. Tuto funkci zajišťuje měnič frekvence.

3. Řízení fermentace

3.1 Regulace teploty

3.1.1 Identifikace

Pro posouzení linearity jsme nejprve měřili statickou charakteristiku. Reakční směs o celkovém objemu 7 l v reaktoru jsme postupně zahřívali při konstantním akčním zásahu (příkonu topení). Pro tento účel jsme sestavili program v jazyce C s použitím knihovny reálného času RTMON. Namě-



Obr. 4. Naměřená (modrá barva) a vypočítaná (fialová barva) přechodová charakteristika chlazení fermentačního reaktoru

řené hodnoty ustálené teploty v nádrži a ve fermentoru byly ukládány do externího souboru. Získali jsme grafickou závislost, jež je uvedena na obr. 2.

Přechodovou charakteristiku ohřevu jsme měřili tak, že jsme soustavu ohřívali při 6% akčního zásahu a po ustálení teploty jsme akční veličinu skokově změnili na 10%. Ze závislosti naměřených hodnot na čase vyplynulo, že jde o soustavu druhého řádu. Aproximací metodou nejmenších čtverců [2] jsme získali soustavu, jejíž přenos je

$$G_{s1}(s) = \frac{4,4}{(7201,7s+1)(736,7s+1)}$$

Porovnání naměřené a aproximované přechodové charakteristiky ohřevu je na obr. 3.

Identifikaci chlazení jsme prováděli při průtoku chladicí vody 0,15 l/s (maximální průtok je 0,17 l/s). Reaktor byl vyhřátý na 12% akčního zásahu a po ustálení teploty jsme ohřev vypnuli a současně pustili přívod vody. Z grafické závislosti naměřené teploty na čase opět vyplynulo, že jde o soustavu

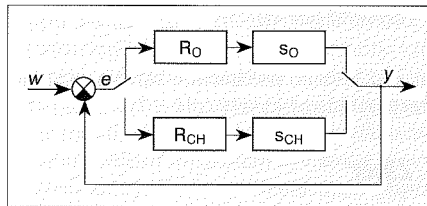
druhého řádu. Aproximací jsme získali hledané parametry soustavy chlazení

$$G_{s2}(s) = \frac{-0,46}{(3462,64s+1)(582,60s+1)}$$

Porovnání naměřené a aproximované přechodové charakteristiky ohřevu je ukázáno na obr. 4. Je však nutné podotknout, že parametry této soustavy nemusí odpovídat skutečnosti, protože vodu získáváme z vodovodní sítě, přičemž se může mírně měnit její teplota (při měření byla 9 °C) a tlak, což nelze nijak ovlivnit.

3.1.2 Regulace

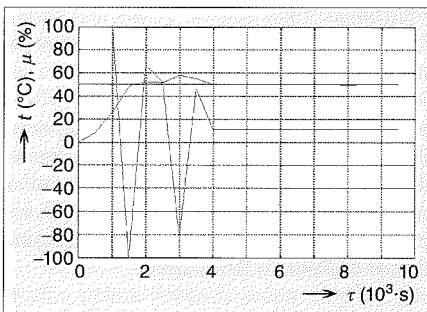
Při návrhu regulátoru pro řízení reaktoru jsme vycházeli z kritéria dosažení požadova-



Obr. 5. Regulační obvod s možností záporného akčního zásahu

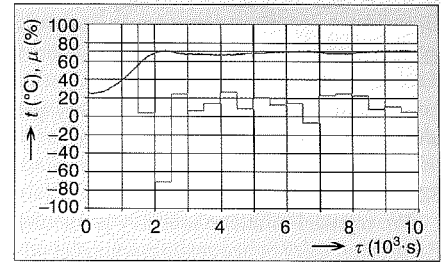
né teploty reaktoru (60 až 80 °C) za co nejkratší dobu při minimálním překmitu. Uvažovali jsme skok řídicí veličiny z 0 na 50% (žádaná teplota je 70 °C a počáteční teplota reaktoru je přibližně 20 °C). K simulaci průběhu regulačního pochodu jsme použili programové prostředí Matlab.

Pro urychlení náběhu regulované veličiny na žádanou hodnotu jsme při regulaci využili záporný akční zásah. Zpočátku se generoval plný akční zásah (dvupolohová regulace) a v určitém okamžiku došlo k přepnutí na některý z navržených regulátorů. Pro návrh regulátoru jsme použili následující postupy: dvupolohová (třípolohová) regulace s penalizací, metoda inverze dynamiky a algebraické metody návrhu regulátorů (konečný počet kroků, přiřazení pólů, robustní regulátory). Principiální schéma činnosti regulace se záporným akčním zásahem je na obr. 5. V činnosti je vždy jedna část obvodu – topný nebo chladicí okruh. Na začátku je zapojen topný okruh. Vypočítá-li regulátor RO záporný ak-

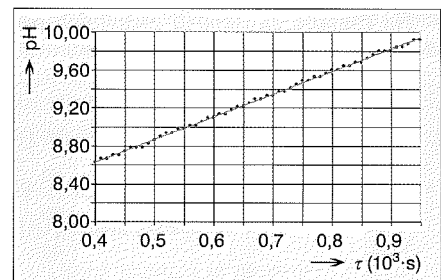


Obr. 6. Simulace řízení teploty fermentoru regulátory navrženými metodou přiřazení pólů $T = 500$ s (y – zelená barva, w – modrá barva, u – červená barva)

ní zásah, dojde k přepnutí na chladicí okruh, kam se zároveň předají předchozí parametry. Vypočítá-li regulátor RCH kladný akční zásah, dochází ke zpětnému přepnutí a předání parametrů topnému okruhu.



Obr. 7. Reálné řízení teploty fermentoru regulátory navrženými metodou přiřazení pólů $T = 500$ s (y – zelená barva, w – modrá barva, u – červená barva)



Obr. 8. Naměřená a aproximovaná přechodová charakteristika pH

Nejlepší výsledky simulace vykázalo použití regulátorů navržených metodou přiřazení pólů. Pro periodu vzorkování $T_v = 500$ s jsme zvolili algoritmus PID-A2 [2] a nastavili jsme oba póly soustavy $\alpha = 0,35$ a tlumení $\omega = 0$, pro chlazení oba póly $\alpha = 0,75$ a tlumení $\omega = 0$. Regulátor pro ohřev má potom parametry

$$G_{R1}(z^{-1}) = \frac{14,4523 - 16,0091z^{-1} + 4,4902z^{-2}}{1 - 0,4129z^{-1} - 0,5871z^{-2}}$$

a pro chlazení

$$G_{R2}(z^{-1}) = \frac{-20,3179 + 27,1078z^{-1} - 8,5351z^{-2}}{1 - 0,6323z^{-1} - 0,3593z^{-2}}$$

Simulovaný průběh regulace je na obr. 6. Regulovaná veličina dosáhne žádané hodnoty přibližně za 1 700 s, nejvyšší překmit je přibližně 15% a k ustálení teploty dochází za 4 000 s.

Průběh reálného měření je na obr. 7. Regulátory začnou soustavu řídit v okamžiku dosažení 75% žádané hodnoty. Nulová regulační odchylka nastává přibližně za 2 100 s a po této době kolísá změna akčního zásahu v rozmezí 30%.

3.2 Regulace pH

3.2.1 Identifikace

Identifikaci soustavy jsme stejně jako u teploty provedli změřením přechodové charakteristiky. Základem byla opět fermentační směs v nádrži, do které byl dáv-

kován 2% KOH. Po změně akčního zásahu z 0 na 100 % jsme měřili v pravidelných časových intervalech pH. Protože se soustava chovala jako ideální integrační člen prvního řádu bez setrvačnosti, aproximovali jsme ji přímkou (obr. 8). Přenos soustavy je

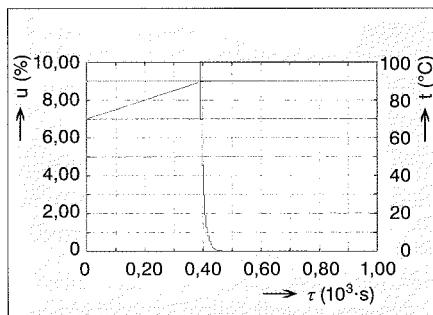
$$G_{s3}(s) = \frac{0,0031}{s}$$

Zesílení soustavy je poměr hodnoty pH a velikosti akčního zásahu v procentech.

3.2.2 Regulace

Pro regulaci astatické soustavy je vhodný P regulátor, který pouze zesiluje regulační odchylku. Zesílení regulátoru jsme navrhli jako převrácenou hodnotu zesílení soustavy. Odtud plyne $r_0 = 320$. Zesílení má rozměr jedna a je to poměr velikosti akčního zásahu v procentech a hodnoty pH.

Na základě zkušeností získaných při identifikaci jsme volili $T_v = 5$ s. Simulova-

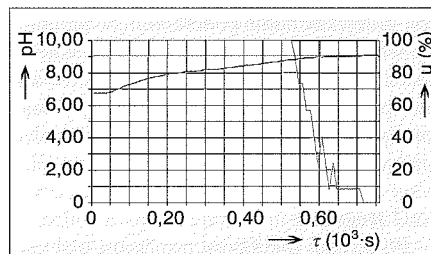


Obr. 9. Simulace řízení pH fermentoru P regulátorem (*y* – zelená barva, *w* – modrá barva, *u* – červená barva)

ný průběh regulačního pochodu při předpokladu, že počáteční pH je 7 (neutrální směs) a žádaná hodnota pH je 9, znázorňuje obr. 9. Je zde patrný vliv regulátoru, který reaguje

na okamžitou změnu hodnoty měřené veličiny, a žádaného stavu se dosáhne přibližně za 400 s.

Reálný průběh regulačního pochodu pH je na obr. 10. Dosažení žádané hodnoty je přibližně o 200 s delší než u simulačního průbě-



Obr. 10. Reálné řízení pH fermentoru P regulátorem (*y* – zelená barva, *w* – modrá barva, *u* – červená barva)

hu, což je dáno počátečním stavem roztoku, který byl mírně kyselý (pH < 7).

4. Závěr

V tomto příspěvku jsme se soustředili na řízení technologického procesu enzymatické hydrolyzy. Zaměřili jsme se na první fázi – proces fermentace. Hledali jsme cestu pro řízení technologického zařízení, které je realizováno v laboratorních podmínkách našeho institutu.

U procesu fermentace jsme měřili a řídili teplotu a pH. Při řízení teploty existují dva okruhy – topný a chladicí. Vzhledem k tomu jsme zde aplikovali regulační obvod se dvěma regulátory, které se přepínají na základě vypočítané akční veličiny (topení pro kladný a chlazení pro záporný akční zásah). Proto je možné použít větší počáteční akční zásah a veškeré regulace byly navrženy tak, že zpočátku je trvalý akční zásah 100% a teprve při přibliž-

ní regulované veličiny žádané hodnotě začne fungovat regulace. Z metod pro návrh deterministických regulátorů použitých v fermentace se pro reálné řízení teploty jako nejlepší jevíly regulátory navržené metodou přiřazení pólů. Proto jsme je následně aplikovali do reálného prostředí. pH jsme regulovali prostým P regulátorem, protože se soustava chovala astaticky.

Literatura:

- [1] ÁSTRÖM, K. – WITTENMARK, B. *Computer-Controlled Systems*. 1. ed. USA, Upper Saddle River: Prentice Hall Information and System Sciences Series, 1997, 558 p. ISBN 0-13-736787-2.
- [2] BOBÁL, V. a kol.: *Praktické aspekty samočinně se nastavujících regulátorů: algoritmy a implementace*. 1. vyd. VUT Brno, 1999, 242 s. ISBN 80-214-1299-2.
- [3] KOLOMAZNÍK, K. a kol.: *Zpracování chromočiněných odpadů s komplexní recyklací chromu*. [Závěrečná zpráva o řešení grantového projektu.] Reg. č. 104/93/1054. FT VUT Brno, 1995.
- [4] POKORNÝ, P.: *Problematika řízení při hydrolyzačním zpracování bílkovinných druhotných surovin*. [Disertační práce.] FT UTB Zlín, 2003.
- [5] PROKOP, R. – CORRIOU, J. P.: *Design and analysis of simple robust controllers*. Int. Journal of Control, 1997, Vol. 66, No. 6, pp. 905–921.
- [6] VAŠEK, V.: *Teorie automatického řízení II*. 1. vyd. VUT Brno, 1990, 139 s. ISBN 80-214-0115-X.

Ing. Pavel Pokorný, Ph.D.,
prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.,
Univerzita Tomáše Bati,
Institut informačních technologií
(pokorny@ft.utb.cz, vasek@ft.utb.cz)

Recenze: Umělá inteligence (4)

V. Mařík, O. Štěpánková, J. Lažanský a kol.: Umělá inteligence (4), Academia, Praha 2003, 475 stran.

Ptal se mě před několika lety jeden můj kamarád, tehdy čerstvý absolvent – informatik: Co je to ta umělá inteligence, není to nějaký podvod? Myslel to vážně. Připadalo mi legrační i smutné, jak málo může vědět odborník o umělé inteligenci. Vysvětlil jsem mu to a snad ho i přesvědčil. Minulé léto jsem se zúčastnil přechodu jedněch slovenských hor se čtyřmi v praxi ostřílenými elektroinženýry – kteří o umělé inteligenci také nic nevěděli. Dva případy, i když statis-

ticky nevýznamné, přece jen vzbuzují podezření, že to se znalostmi o umělé inteligenci asi není nijak slavné. Recenzovaná kniha může pomoci takový stav napravit. Jejím cílem je zpřístupnit znalosti o umělé inteligenci (UI) českému odborníkovi.

Obecné hodnocení

Nejprve zhodnotím knihu obecně, celkově. Nechcete-li tuto část recenze číst, zejména

na znáte-li předchozí, třetí díl, není to třeba. Celkově jsou si oba díly velmi podobné. Když jsem si znova četl svou recenzi předchozího dílu, říkal jsem si, že bych teď mohl napsat skoro to samé. Ale nedalo mi to a napsal jsem ji trochu jinak. Chci hodnotit co nejobektivněji. Žádný náš výtvar není dokonalý, ani tato kniha. Vyberu proto několik hledisek, ze kterých se mi zdá publikace přínosná, i několik slabín. Nechám na vás, abyste si závěr udělali sami.

+ Kniha svůj cíl plní, tj. *zpřístupňuje znalosti* o UI fyzicky, ekonomicky (za 185 Kč – některé odkazované knihy stojí