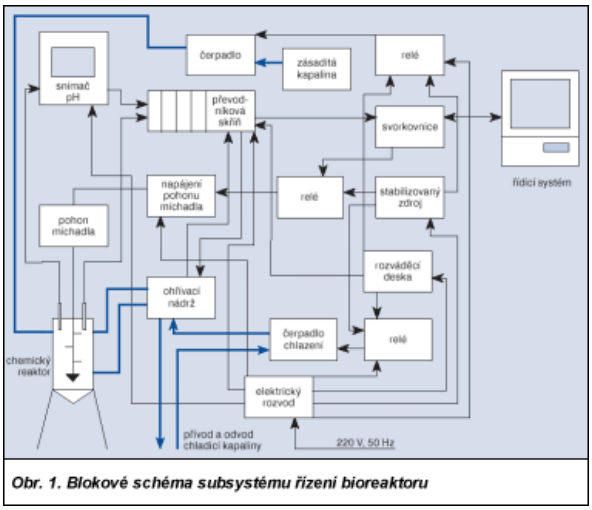
Pavel Pokorný, Vladimír Vašek

Na našem pracovišti, Institutu informačních technologií FT UTB ve Zlíně, byla vyvinuta technologie pro zpracování kožedělných odpadů pomocí enzymatické hydrolýzy. 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 postačí 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.



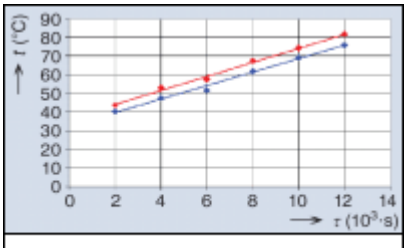
Obr. 1. Blokové schéma subsystému řízení bioreaktoru

Obr. 1.

1. Úvod

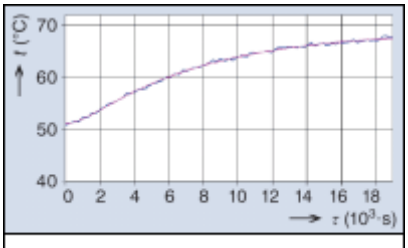
Technologický proces enzymatické hydrolýzy se skládá ze tří částí. První je chemická reakce v bioreaktoru (fermentoru) – její produkt se řízeným způsobem filtruje a hydrolyzát se suší v podtlakové odparce. K takto vzniklému bílkovinnému odpadu s vodou se přidává anorganická alkálie. Vytvořená směs se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



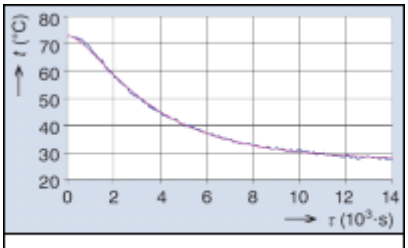
Obr. 2.

Obr. 2.



Obr. 3.

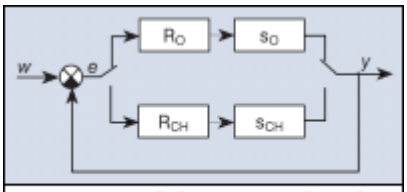
Obr. 3.



Obr. 4.

Obr. 4.

Obr. 2. Statické charakteristiky nádrže (červená barva) a reaktoru (modrá barva)
Obr. 3. Naměřená (modrá barva) a vypočítaná (fialová barva) přechodová charakteristika ohřevu fermentačního reaktoru
Obr. 4. Naměřená (modrá barva) a vypočítaná (fialová barva) přechodová charakteristika chlazení fermentačního reaktoru



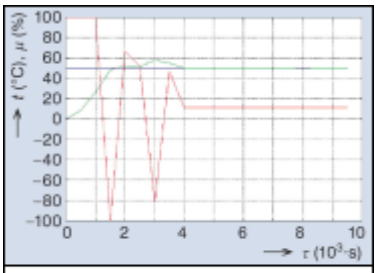
Obr. 5. Regulační obvod s možností záporného akčního zásahu

Obr. 5.

2. Popis fermentačního zařízení

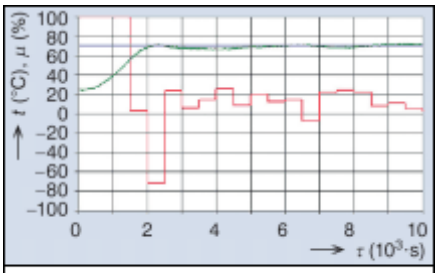
Schéma laboratorní měřicí a regulační aparatury je na obr. 1. Chemická reakce probíhá v reaktoru (maximální objem 12 l). V něm jsou umístěny snímače teploty (Pt100) a pH (snímač s argentchloridovou elektrodou). Oba snímače jsou propojeny s převodníkovou skříní, kde se signály linearizují a unifikují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



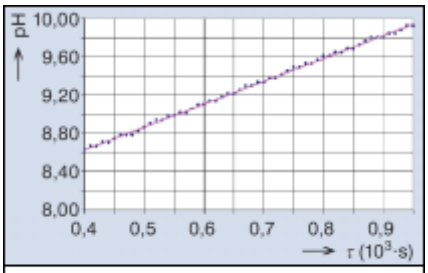
Obr. 6.

Obr. 6.



Obr. 7.

Obr. 7.



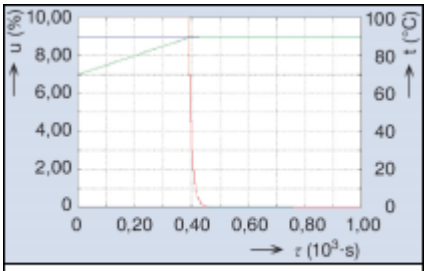
Obr. 8.

Obr. 8.

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

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 kyselé látky (zvýšení pH), ale zkušenosti vedly ke zjištění, že během reakce se pH stále snižuje, a tak se toto řešení ukázalo jako zbytečné.

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



Obr. 9.

Obr. 9.

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 rozmezí 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. Naměřené 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 6ího 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

$$G_{S1}(s)=\frac{4{,}4}{(7201{,}7s+1)(736{,}7s+1)}$$

Vztah 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

$$G_{S2}(s)=\frac{-0{,}46}{(3462{,}64s+1)(582{,}60s+1)}$$

Vztah 2.

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 požadované teploty reaktoru (60 až 80 °C) za co nejkratší dobu při minimálním překmitu. Uvažovali jsme skok řídící 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 (dvoupolohová regulace) a v určitém okamžiku došlo k přepnutí na některý z navržených regulátorů. Pro návrh regulátoru jsme použili následující postupy: dvoupolohová (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 akční 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.

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

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

Vztah 3.

a pro chlazení

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

Vztah 4.

Simulovaný průběh regulace je na obr. 6. Regulovaná veličina dosáhne žádané hodnoty přibližně za 1 700 s, nejvyšší překmit je přibližně 15ází za 4 000 s.

Průběh reálného měření je na obr. 7. Regulátory začnou soustavu řídit v okamžiku dosažení 75odchylka 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 dávkován 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

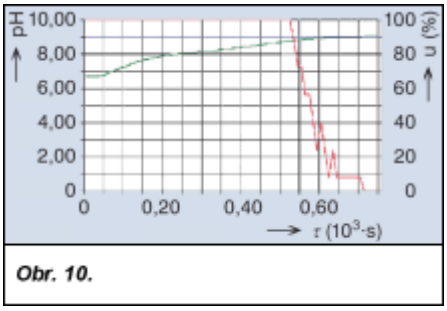
$$G_{S3}(s) = \frac{0{,}0031}{s}$$

Vztah 5.

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 r0 = 320. Zesílení má rozměr jedna a je to poměr velikosti akčního zásahu v procentech a hodnoty pH.



Obr. 10.

Obr. 10.

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

Na základě zkušeností získaných při identifikaci jsme volili Tv = 5 s. Simulovaný 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 průběhu, 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 hydrolýzy. 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 přiblížení regulované veličiny žádané hodnotě začne fungovat regulace. Z metod pro návrh deterministických regulátorů použitých u fermentace se pro reálné řízení teploty jako nejlepší jevily 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] ASTRÖM, 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 chrómu. [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)