

Adaptivno prediktivno vodenje raztopljenega kisika v bioloških reaktorjih čistilnih naprav

Gregor KANDARE, Antonio NEVADO REVIRIEGO

Izveček: V članku so predstavljeni adaptivni prediktivni ekspertni regulatorji ter primer njihove uporabe za regulacijo koncentracije raztopljenega kisika v bioloških reaktorjih čistilnih naprav. Sistem za vodenje, ki je opisan v članku, je sestavljen iz adaptivnih prediktivnih ekspertnih povratnih zank ter dodatne optimizacijske logike. Uporabljeni regulatorji obvladujejo nelinearnost procesa in spremenljive delovne pogoje, tako da na osnovi modela napovedo obnašanje procesa in sproti prilagajajo model. Prednosti natančnejše in stabilnejše regulacije raztopljenega kisika sta boljša kakovost vode na iztoku ter manjša poraba energije. Komplementarna optimizacijska logika išče minimalno referenčno vrednost tlaka zraka v skupni cevi, ki še zagotavlja zadovoljivo vodenje kisika. To bistveno prispeva k zmanjšanju porabe energije.

Ključne besede: adaptivno prediktivno vodenje, čistilne naprave, regulacija raztopljenega kisika, zmanjšanje porabe energije

■ 1 Uvod

Proces aktivnega blata je najbolj razširjen biološki proces v čistilnih napravah. Obsega biološko obdelavo z aktivnim blatom za odstranitev dušika in drugih organskih snovi. V anaerobnem delu procesa nitrifikacijske bakterije potrebujejo raztopljen kisik za pretvarjanje amonija v nitrate. Ta faza se imenuje nitrifikacija. V naslednjem koraku (denitrifikacija) se nitrate, proizvedeni med nitrifikacijo, pretvorijo v plinast dušik.

Dr. Gregor Kandare, univ. dipl. inž., Institut Jožef Stefan, Ljubljana
Prof. Antonio Nevado Reviriego Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, Španija

Koncentracija raztopljenega kisika je ena izmed najpomembnejših procesnih spremenljivk v procesu aktivnega blata. Regulacija koncentracije raztopljenega kisika je pomembna tako z vidika učinkovitosti procesa kot tudi iz ekonomskih razlogov. Koncentracija mora biti dovolj visoka, da zagotovi dovolj kisika za mikroorganizme v aktivnem blatu. Po drugi strani pa mora biti recirkulacija kisika iz aerobne v anaerobno cono minimalna, da se ne pokvari učinkovitost faze denitrifikacije. Tudi z energetskega vidika je ugodno imeti želeno vrednost koncentracije raztopljenega kisika čim nižjo, ker to pomeni manjšo porabo energije. Dejstvo je, da poraba energije za vpihovanje zraka narašča eksponentno v odvisnosti od reference koncentracije raztopljenega kisika.

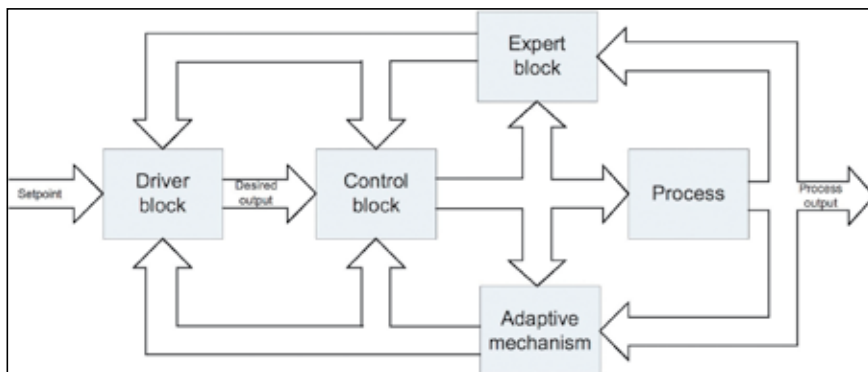
Z regulacijskega vidika je proces aktivnega blata zelo kompleksen, predvsem zaradi izrazite nelinearnosti, časovno spremenljive dinamike, ve-

likih mrtvih časov ter multivariabilne strukture. Klasični sistemi vodenja zato le stežka zadovoljivo vodijo take procese ([1], [2]).

V članku je predstavljena uporaba adaptivnih prediktivnih ekspertnih regulatorjev ADEX™ ([3], [4]) pri regulaciji raztopljenega kisika v čistilni napravi La Gavia v Madridu. Zmogljivost te čistilne naprave je 950.000 populacijskih ekvivalentov. Regulatorji ADEX so rezultat tridesetletnih raziskav in razvoja in se uporabljajo v različnih sektorjih procesnega vodenja.

■ 2 Adaptivni prediktivni ekspertni regulatorji

Tehnologija adaptivnih prediktivnih ekspertnih regulatorjev je zasnovana na paradigmi prediktivnega vodenja. Glavna razlika v primerjavi s klasičnimi regulatorji, kot so PID, je v tem, da slednji reagirajo zgolj na



Slika 1. Bločni diagram adaptivnega prediktivnega ekspertnega regulatorja

pretekle in trenutne pogreške med referenco in regulirano veličino. Prediktivni regulatorji pa lahko s pomočjo modela ocenijo trajektorijo regulirane veličine v prihodnosti ter tako generirajo take izhode, da bo regulirana veličina sledila neki željeni trajektoriji.

Regulatorji ADEX uporabljajo linearne modele za napoved izhodov procesa. Parametri modela se prilagajajo spremenljivim razmeram. Poleg tega se pri strategiji vodenja uporablja tudi ekspertno znanje, ki je v regulatorju podano v obliki tabel. Bločni diagram regulatorja ADEX je prikazan na sliki 1.

Referenčni blok definira želena trajektorijo regulirane veličine. Ta poteka od trenutne vrednosti regulirane veličine do referenčne vrednosti, ki je podana na vhodu referenčnega bloka. Dinamika trajektorije je definirana s časovno konstanto, ki jo določi uporabnik.

Prediktivni model je jedro regulatorja. Model je sestavljen iz linearnih diskretnih prenosnih funkcij, ki opisujejo dinamiko izhoda procesa v odvisnosti od vhoda in merljivih motenj. Regulator s pomočjo modela v vsaki regulacijski periodi izračunava vhod v proces, ki bo povzročil, da bo izhod procesa sledil referenčni trajektoriji.

Realni procesi so nelinearni in časovno spremenljivi, zato regulatorji s konstantnimi parametri ne morejo zadovoljivo napovedati izhoda procesa v različnih delovnih točkah. V ta namen imajo regulatorji ADEX vgrajen *adaptacijski mehanizem*, ki prilagaja parametre modela glede na razliko med napovedano in dejansko vrednostjo izhoda procesa.

Z vidika regulatorja je delovno območje izhoda procesa razdeljeno na tri domene (slika 2). Osrednjo domeno, v kateri bo izhod procesa pri normalnem delovanju, imenujemo *adaptivno-prediktivna domena*. V tej domeni opravlja svojo funkcijo *adaptivno-prediktivni algoritem*. Če se izhod procesa zaradi kakršnegakoli vzroka oddalji od osrednje domene, v eno od t. i. ekspertnih domen, prevzame kontrolo *ekspertni blok*, ki s pomočjo enostavnih akcij na osnovi pravil poskuša spraviti proces v osrednjo domeno.

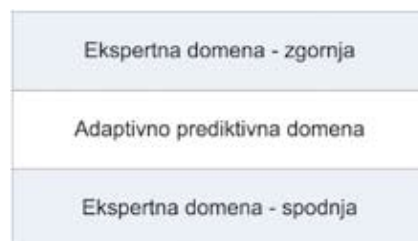
Regulator ADEX temelji na inkrementalnem dinamičnem modelu procesa. Osnovno zaporedje operacij v vsaki regulacijski periodi k je naslednje:

1. Meritev izhoda procesa y_p in izračun inkrementalnega izhoda procesa $y(k)$:

$$y(k) = y_p(k) - y_p(k - 1) \quad (1)$$

2. Predvidimo adaptivno-prediktivni model drugega reda brez merljivih motenj. Pri tem se apriori ocena inkrementalnega izhoda procesa izračuna po naslednji formuli:

$$\hat{y}(k|k - 1) = \sum_{i=1}^2 \hat{a}_i(k - 1)y(k - i) + \sum_{i=1}^3 \hat{b}_i(k - 1)u(k - i) \quad (2)$$



Slika 2. Domene regulatorjev ADEX

Napaka ocene je podana kot

$$e(k) = y(k) - \hat{y}(k|k - 1) \quad (3)$$

Vrednosti $u(k-i)$ dobimo iz:

$$u(k - i) = u_p(k - i) - u_p(k - 1 - i) \quad (4)$$

kjer je $u_p(k-i)$ vhod v proces v trenutku $k-i$.

3. Izračun parametrov modela (2) z gradientnim algoritmom.
4. Izračun želenega inkrementalnega izhoda $y_d(k+1)$ s pomočjo modela (2) z želeno dinamiko, pri čemer je $u(k)$ referenca, izhod pa želena trajektorija.
5. Izračun regulacijskega signala $u_p(k)$:

$$u(k) = \frac{1}{\hat{b}_1(k)} \left[y_d(k + 1) - \sum_{i=1}^2 \hat{a}_i(k)y(k + 1 - i) - \sum_{i=2}^3 \hat{b}_i(k)u(k + 1 - i) \right] \quad (5)$$

Opisano prediktivno vodenje uporablja enokoračno strategijo. Inkrementalni regulacijski signal $u(k)$ se v trenutku k izračuna iz (5). S tem zagotovimo, da sta napovedani in željeni inkrementalni regulacijski signal v trenutku $k+1$ enaka.

$$u_p(k) = u(k) + u_p(k - 1) \quad (6)$$

6. Vrednost regulacijskega signala po potrebi omejimo.

3 Opis procesa aktivnega blata

Proces je sestavljen iz štirih aerobnih reaktorjev (bazenov), v katerih poteka odstranjevanje bioloških snovi. V bazene priteka odpadna voda s pretokom 3000 m³/uro. Da bi zagotovili želena koncentracijo raztopljenega kisika, moramo v bazene vpihavati zrak. Sistem za vpihanje zraka je sestavljen iz pihal, cevi, ventilov in membran.

Za kompresijo zraka so na voljo štiri puhal. Število aktivnih pihal je od-

visno od zahtev po stisnjem zraku. Izhodni tlak puhal se regulira s položajem difuzorjev.

Stisnjeni zrak nato potuje po skupni cevi, ki se razveji v posamezne cevi za vsak reaktor posebej. Na teh ceveh so nameščeni avtomatski loputni ventili, ki uravnavajo količino stisnjene zraka, ki se vpihuje v bazen skozi membrane, nameščene na dnu bazena.

V sistemu so nameščena naslednja tipala:

- tipalo tlaka na skupni cevi,
- po eno tipalo pretoka zraka na vsaki cevi, ki vodi v posamezen bazen,
- po dve tipali raztopljenega kisika v vodi – eden na pritoku, drugi na iztoku.

■ 4 Vodenje procesa

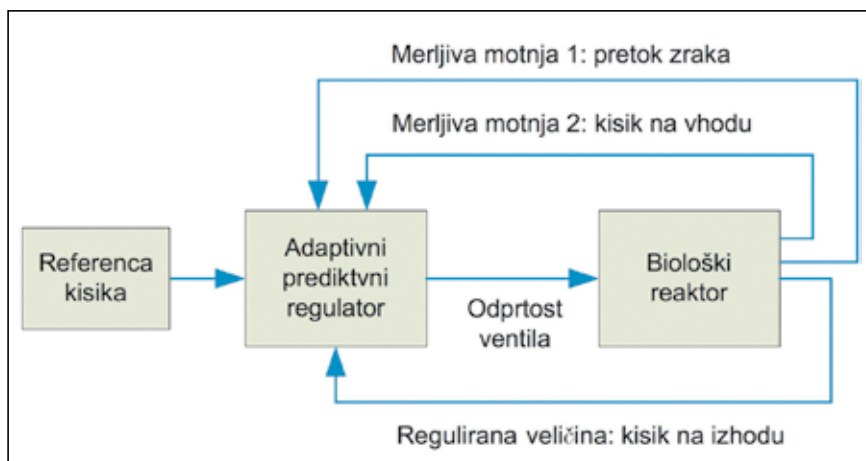
Odstranjevanje amoniaka z aktivnim blatom je časovno spremenljiv proces z velikimi motnjami v dotoku odpadne vode. Spremenljive vremenske razmere (temperatura, padavine) občutno vplivajo na dinamiko procesa, čemur se mora sistem za vodenje sproti prilagajati ([5]). Poleg tega je proces nelinearen. Število in obnašanje mikroorganizmov v aktivnem blatu se spreminjata, zato se spreminja odnos med vpihanim zrakom in koncentracijo raztopljenega kisika. Več reaktorjev si deli skupno cev za dovod stisnjene zraka, kar povzroči neželene interakcije med regulacijskimi zankami posameznih bazenov. Zaradi naštetih lastnosti je vodenje tovrstnega procesa zelo zahtevno.

4.1 Cilji vodenja

Glavni cilji vodenja procesa aktivnega blata so naslednji ([6]):

- zagotoviti zahtevano kakovost iztočne vode,
- zagotoviti, da regulirane veličine sledijo referenčnim vrednostim, ne glede na motnje in spremembe procesnih pogojev,
- minimizirati porabo energije.

V čistilni napravi, predstavljeni v tem članku, so bili konkretni cilji vodenja naslednji:



Slika 3. Regulacijska zanka za kisik

- regulirati koncentracijo raztopljenega kisika v bazenih,
- vzdrževati tak minimalni tlak stisnjene zraka v skupni cevi, ki še zagotavlja zadovoljivo delovanje zanke za regulacijo kisika.

4.2 Regulacija koncentracije raztopljenega kisika

V praksi obstajajo trije načini za regulacijo koncentracije raztopljenega kisika v bazenu:

- s spremembo hitrosti vrtenja mešala v bazenu ([7]),
- s spremembo vsebnosti kisika v vpihanem stisnjem zraku,
- s spremembo pretoka vpihanega stisnjene zraka.

Zadnjo različico najpogosteje zasledimo v praksi in se tudi uporablja v čistilni napravi, opisani v tem članku.

Pretok stisnjene zraka neposredno vpliva na koncentracijo raztopljenega kisika v reaktorju. Pretok lahko spreminjamo s spreminjanjem tlaka ali z odpiranjem loputnega ventila. Odnos med pretokom zraka in raztopljenem kisikom v reaktorju je skoraj linearen. V čistilnih napravah, kjer ima vsak bazen svoj izvor komprimiranega zraka, je zato kot regulirno veličino najbolje uporabiti tlak zraka. V našem primeru to ni mogoče, ker so vsi aeracijski bazeni vezani na en sam izvor zraka. V tem primeru je treba kot regulirno veličino uporabiti odprtost ventila za zrak. Pomanjkljivost te izvedbe je v tem, da je odnos med odprtostjo ventila in pretokom zraka (ter posledično

koncentracijo raztopljenega kisika v bazenu) izrazito nelinearen.

Najpogostejša implementacija regulacijske zanke za vodenje kisika je kaskadna regulacijska shema. Zunanja zanka regulira koncentracijo kisika z regulirno veličino pretok zraka. Le-ta predstavlja referenco za notranjo zanko, ki regulira pretok zraka z odprtostjo loputnega ventila. Notranja zanka na nek način linearizira delovanje ventila. V literaturi zasledimo celo poročila o implementaciji dodatne zunanje zanke, ki regulira amonijev dušik na koncu aerobne stopnje s spreminjanjem reference za raztopljeni kisik ([8], [9]).

V našem primeru smo implementirali enozančno regulacijo z večvhodnim regulatorjem ADEX. Koncentracijo raztopljenega kisika na izhodu bazena smo regulirali neposredno z odprtostjo ventila. Prednost tega načina pred kaskadno regulacijo je v tem, da ne poskuša regulirati pretoka zraka in zato manj obremenjuje ventile. Slika 3 prikazuje bločni diagram regulacijske zanke za kisik.

Izhod regulatorja se izračunava z modelom, ki opisuje dinamični odnos med odprtostjo ventila in koncentracijo raztopljenega kisika. Regulator pri računanju izhoda upošteva tudi merljive motnje, v našem primeru sta to koncentracija raztopljenega kisika na začetku bazena ter pretok zraka. S tem, da smo upoštevali pretok zraka kot merljivo motnjo, smo dosegli podoben učinek kot s kaskadno regulacijo. Koncentracijo raztopljenega kisika na začetku bazena lahko obrav-

navamo kot napoved koncentracije na koncu bazena, zato je dobrodošla veličina za pohitritev regulacijske zanke.

Adaptacijski mehanizem v vsaki regulacijski periodi spreminja model procesa in model motenj ter tako prilagaja regulator na spreminjajoče se delovne razmere. Da bi eliminirali interakcije med regulacijskimi zankami posameznih bazenov, moramo z dodatno regulacijsko zanko vzdrževati konstantno vrednost zračnega tlaka v skupni cevi. To nalogo opravlja lokalni sistem vodenja puhal, ki s spreminjanjem položaja difuzorjev regulira zračni tlak na izhodu iz puhal.

4.3 Optimizacija referenčne vrednosti tlaka stisnjena zrak

Elektromotorji puhal z nazivno močjo nekaj sto kilovatov so največji porabniki električne energije v čistilni napravi. Običajno porabijo 50–70 % celotne energije, potrebne za delovanje čistilne naprave. Poraba elektromotorjev je neposredno odvisna od tlaka stisnjena zrak, ki ga proizvaja puhal.

Sistem vodenja, ki ga opisujemo v članku, skrbi za optimizacijo referenčne vrednosti tlaka zrak, upoštevajoč naslednje kriterije:

- Zagotoviti je potrebno takšen tlak zrak, ki zagotavlja zadovoljivo regulacijo kisika. Če je tlak premajhen, regulacijske zanke za kisik ne morejo doseči zelene vrednosti kisika, čeprav popolnoma odprejo ventile. Poleg tega se v primeru prenizkega tlaka močno zmanjša občutljivost pretoka zrak v odvisnosti od odprtosti ventila, kar poslabša delovanje regulacijske zanke za kisik.
- Istočasno pa mora biti tlak zrak čim manjši, saj to neposredno zmanjšuje porabo energije. Če je tlak prevelik, regulacijske zanke za kisik zaprejo ventile, kar poveča tlačni padec. Tako delovanje je energetsko neučinkovito.
- Sistem za vodenje upošteva navedene kriterije in trenutno stanje procesa ter v skladu s tem poveča ali zmanjša referenčno vrednost

za tlak stisnjena zrak. Referenca se spremeni na osnovi naslednjih pravil:

- *Povečanje referenčne vrednosti tlaka.* To se zgodi, ko je eden od ventilov odprt na vrednost, večjo od 75 %, medtem ko ostane koncentracija raztopljenega kisika rahlo nad referenčno vrednostjo (referenca +0,01 ppm) v določenem časovnem intervalu (15 min). V tem primeru se referenčna vrednost tlaka poveča za 0,002 bara.
- *Zmanjšanje referenčne vrednosti tlaka.* Ko je eden od ventilov zaprt pod vrednostjo 40 % v časovnem intervalu 15 minut in v tem času kisik ne pade znatno pod referenčno vrednost (referenca -0,01 ppm), se referenca tlaka zmanjša za 0,002 bara.

Če povzamemo: Optimizacijska logika poveča referenčno vrednost tlaka, kadar koncentracija raztopljenega kisika ne more doseči svoje referenčne, čeprav je pripadajoči ventil zelo odprt. Po drugi strani, če kljub zaprtosti enega od ventilov kisik ne pade bistveno pod referenčno vrednost, si lahko privoščimo zmanjšanje referenčne tlaka in s tem prihranimo energijo. Optimizacijska logika prioritetno zmanjšuje vrednost tlaka, povečuje jo le, kadar je to potrebno.

4.4 Poraba energije

Učinkovitost različnih strategij vodenja lahko ugotovljamo na osnovi meritev oziroma ocen porabo energije.

Merjenje porabe visokonapetostnih elektromotorjev puhal je tehnično zahtevno in v čistilnih napravah ponavadi niso na voljo ustrezni merilniki. Zato smo razvili metodo za ocenjevanje porabe energije oziroma moči na osnovi vrednosti zračnega tlaka in pretoka.

Iz termodinamike je znano, da je diferencial mehanskega dela, ki ga opravi plin (zrak) pri ekspanziji pri konstantnem tlaku, določen z enačbo:

$$dW = p dV \quad (7)$$

kjer je dW diferencial dela, p tlak in

dV diferencial prostornine. Moč je po definiciji enaka časovnemu odvodu dela:

$$P = \frac{dW}{dt} = p \frac{dV}{dt} = p q_v \quad (8)$$

kjer je q_v prostorninski pretok zrak. Sistem za vodenje ima na voljo signale meritve pretoka in tlaka zrak v vsakem trenutku vzorčenja. Zato lahko izračunamo mehansko energijo, porabljeno v časovnem intervalu med t_0 in t_1 , po naslednji formuli:

$$W = \int_{t_0}^{t_1} p(t) q_v(t) dt \quad (9)$$

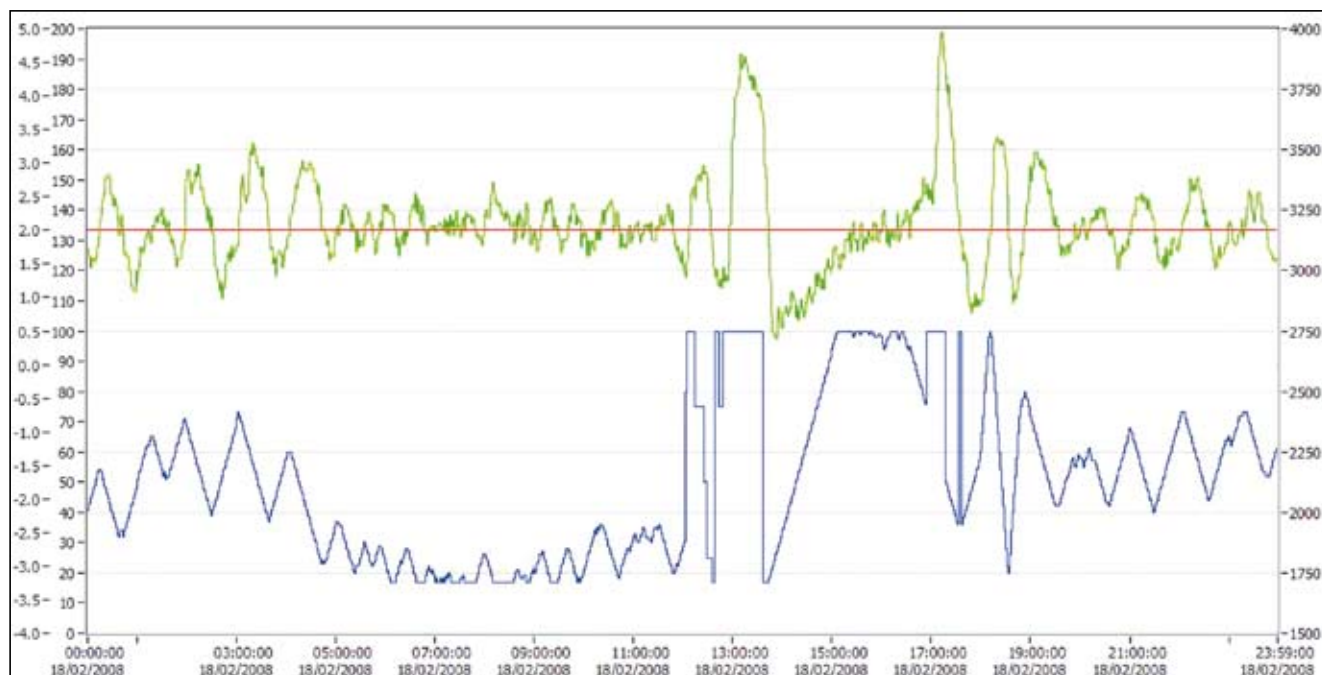
5 Rezultati

5.1 Regulacija koncentracije raztopljenega kisika

Slika 1 prikazuje regulacijo kisika z regulatorjem PID v bazenu 1 v času 24 ur. Rdeča črta predstavlja referenčno vrednost kisika (2 ppm), zelena črta koncentracije raztopljenega kisika na izhodu iz bazena, modra črta pa odprtost ventila za zrak. Kot lahko vidimo, vrednost koncentracije kisika močno oscilira, kar je neugodno tako za kakovost procesa kot tudi za porabo energije. Poleg tega močno oscilira tudi signal odprtosti ventila, kar povzroči destabilizacijo ostalih regulacijskih zank kisika v ostalih bazenih.

Slika 5 prikazuje regulacijo kisika z regulatorjem ADEX v istem bazenu v podobnih razmerah. Čas vzorčenja regulatorja je bil 4 sekund. Vrednosti časovne konstante procesa smo ocenili na 10 minut, zato smo izbrali za vrednost regulacijske periode 150 sekund. S slike 5 vidimo, da regulator ADEX bistveno zmanjša oscilacije signala kisika, hkrati pa ne odpira in zapira ventila tako agresivno kot regulator PID.

Oscilacije signala kisika lahko ocenimo tako, da izračunamo standardno deviacijo signala. Oscilacijsko razmerje dobimo, če delimo standardno deviacijo signala kisika, reguliranega z regulatorjem PID, s standardno deviacijo istega signala, reguliranega z regulatorjem ADEX. Oscilacijsko raz-



Slika 4. Regulacija kisika z regulatorjem PID

merje je mera za sposobnost dušenja oscilacij z regulatorjem ADEX v primerjavi z regulatorje PID. Večje ko je razmerje, boljša je regulacija ADEX. Rezultati za vse aktivne aeracijske baze so prikazani v tabeli 1:

Sliki 4 in 5 prikazujeta primerjavo med regulacijo PID in ADEX v podobnih, čeprav ne identičnih razmerah, meritve so bile namreč narejene v dveh različnih dneh. Slika 6 prikazuje prekop iz vodenja z regulatorjem ADEX v vodenje z regulatorjem PID

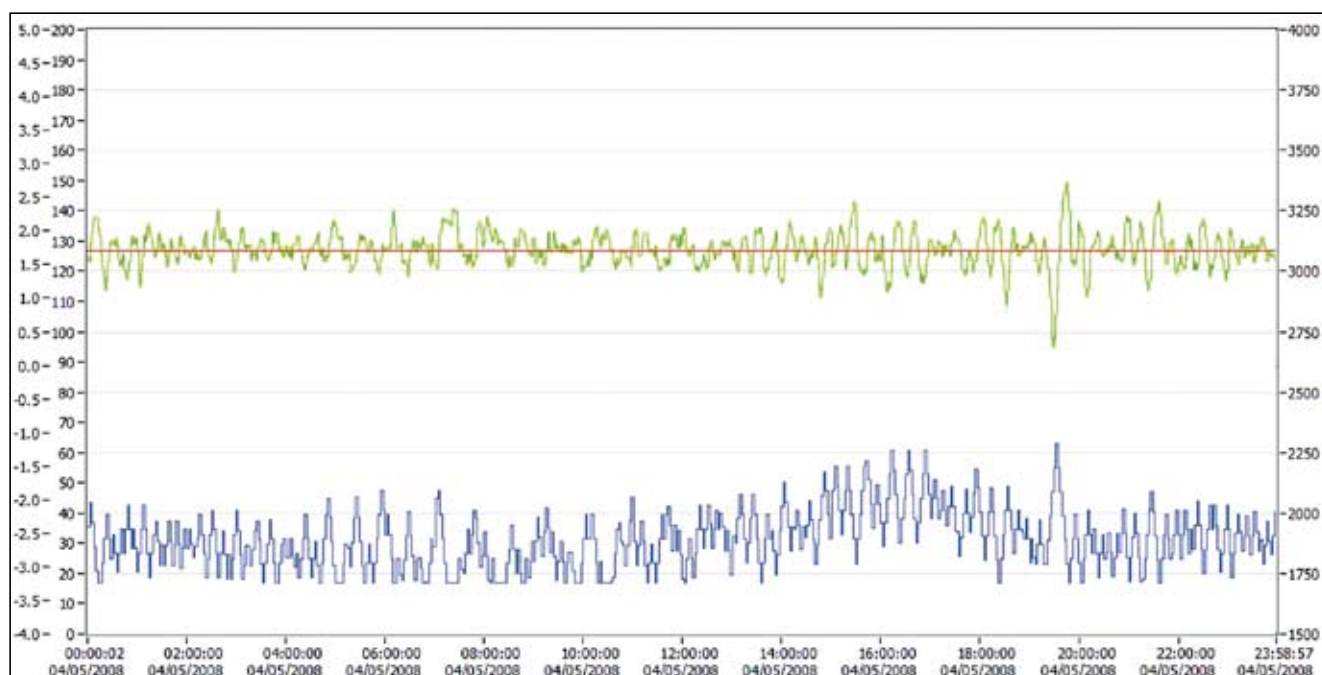
v istem dnevu. Razlika v kakovosti regulacije procesa je očitna.

Tabela 1. Vrednotenje oscilacijskih razmerij

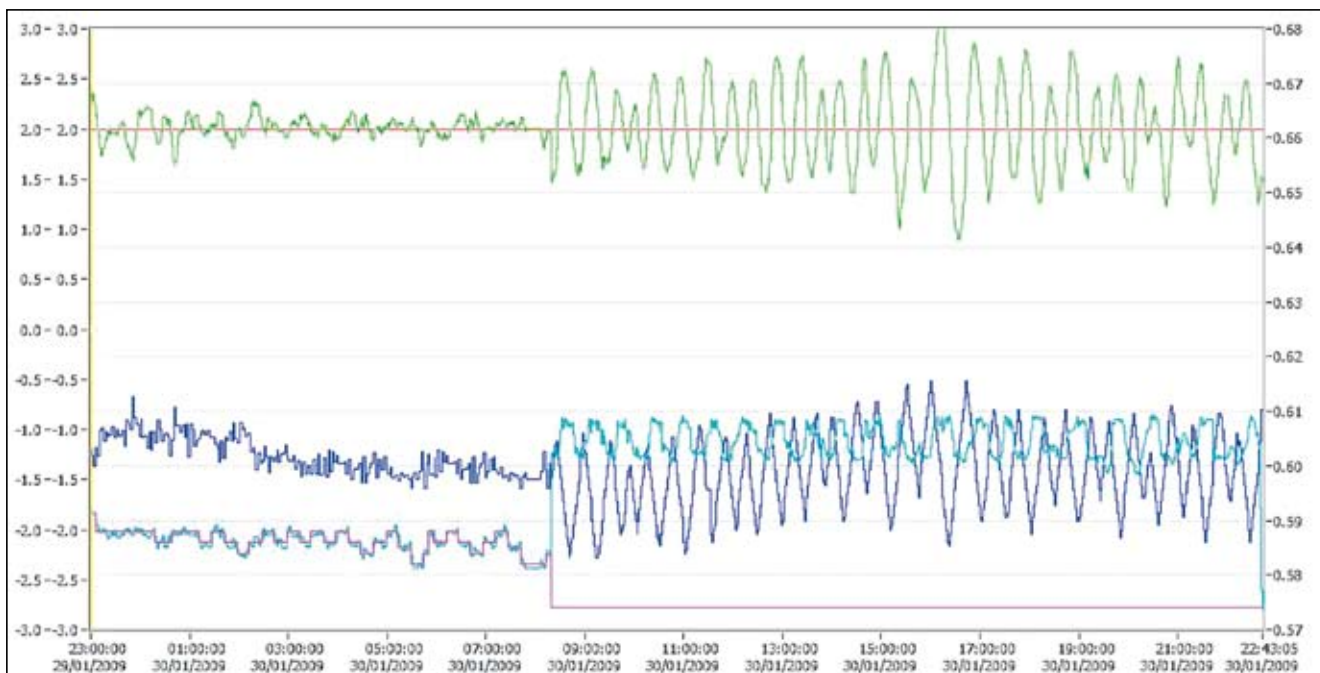
Bazen	PID DO sdev	A D E X DO sdev	Osc. razmerje
1	0,397	0,186	2,13
2	0,663	0,253	2,62
3	0,522	0,143	3,65
4	0,914	0,151	6,05

5.2 Optimizacija referenčne vrednosti tlaka

Slika 7 prikazuje 24-urni graf, na katerem so prikazani poteki koncentracije raztopljenega kisika (zeleno), referenca kisika (rdeča), odprtost ventila (modra), referenca tlaka (vijoličasta) in izmerjena vrednost tlaka (svetlo modra) v bazenu 2. Ta bazen ima visoko potrebo po kisiku, zato je njegov ventil za dovod zraka navadno zelo odprt, da lahko bazen dobi zadostno količino stisnjene zraka. Na sliki 7



Slika 5. Regulacija kisika z regulatorjem ADEX



Slika 6. Preklop iz regulacije ADEX v regulacijo PID

vidimo, da optimizacijska logika v prvih urah dneva postopoma zmanjšuje referenčno vrednost tlaka. To se zgodi zato, ker je ventil v bazenu 1 v tem času precej zaprt zaradi nizke potrebe po kisiku. Na prvi pogled se take akcije zdijo nelogične, saj je ventil bazena 2 (slika 7) zelo odprt. Vendar si to lahko privoščimo, saj do 13. ure kisik v bazenu 2 ne pade bistveno pod referenčno vrednost. Šele ko se to zgodi, ob popolnem odprtju

ventila 2, optimizacijski logiki ne preostane drugega, kot da začne postopoma povečevati referenco tlaka, da zagotovi zadosten pretok zraka v bazen 2.

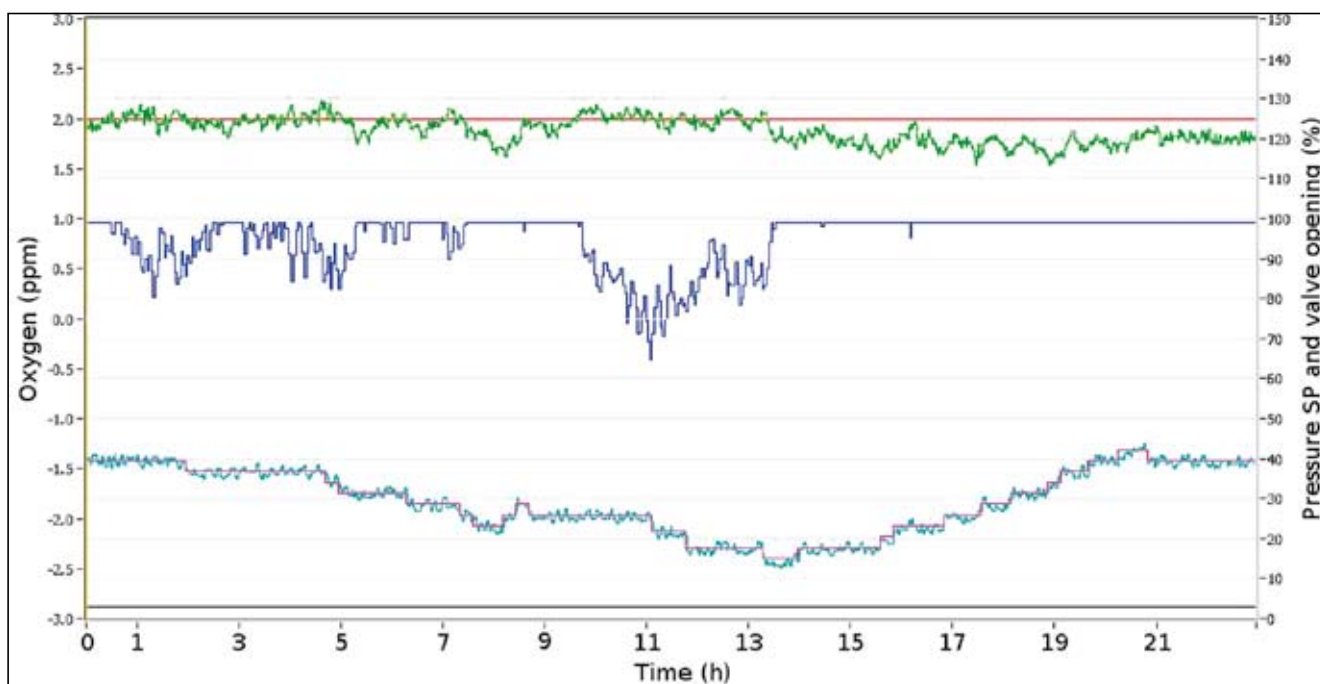
Z metodo za ocenjevanje porabe energije smo ocenili potrebno povprečno dnevno moč v vsakem aeracijskem bazenu posebej za sistem z regulatorji PID kot tudi za sistem z regulatorji ADEX ter logiko za opti-

mizacijo tlaka. Rezultati so prikazani v tabeli 2.

Rezultati kažejo, da je sistem ADEX znatno zmanjšal porabo energije.

6 Zaključek

Članek predstavlja aplikacijo adaptivno-prediktivnih ekspertnih regulatorjev za regulacijo koncentracije raztopljenega kisika v aerobnih ba-



Slika 7. Optimizacija referenčne vrednosti tlaka

Tabela 2. Primerjava porabe energije med sistemoma PID in ADEX 2 st

Bazen	PID (kW)	ADEX (kW)	Razlika [%]
1	51,36	42,25	17,74
2	61,55	34,97	43,18
5	67,63	52,28	22,70
6	54,47	41,98	22,93
Skupno	235,01	171,49	27,03

zenih čistilne naprave odpadnih vod. Biološki procesi, ki potekajo v bazenih, so nelinearni in časovno spremenljivi ter kot taki zelo zahtevni za regulacijo s klasičnimi regulatorji, kot je PID. Pokazalo se je, da so adaptivno-prediktivni regulatorji veliko bolj uspešni pri vodenju takih procesov, saj generirajo take izhode, ki vodijo proces po želeni referenčni trajektoriji, za razliko od regulatorjev PID, ki se zgolj odzivajo na pretekle in trenutne pogoje med regulirano veličino in referenco. Adaptivni del regulatorja stalno prilagaja vrednosti parametrov prediktivnega modela in tako ohranja model aktualen v spreminjajočih se procesnih razmerah. Če se regulirana veličina zelo oddalji od normalnega delovnega področja, ekspertni modul regulatorja poskrbi, da se vrne nazaj v delovno območje, kjer vaje spet prevzame adaptivno-prediktivni del. Izkazalo se je, da regulator ADEX učinkoviteje regulira raztopljeni kisik v vseh obratovalnih razmerah.

Boljša regulacija raztopljenega kisika ima več prednosti. Poveča se učinkovitost faze denitrifikacije,

hkrati se izboljša stabilnost celotnega biološkega procesa. Zaradi manjših oscilacij koncentracije raztopljenega kisika se lahko operater z nastavitvijo reference kisika bolj približa mejnim vrednostim ter tako zmanjša porabo energije.

Literatura

[1] Andrews, J. F. (ed.), (1992) *Dynamics and Control of the Activated Sludge Process*, Technomic Publishing Company, Lancaster, Pennsylvania, USA.

[2] Traoré, A., Grieu, S., Puig, S., Corominas, L., Thiery, F., Polit, M. and Colprim, J. (2005). Fuzzy control of dissolved oxygen in a sequencing batch reactor pilot plant. *Chemical Engineering Journal*, 111(1), 13–19.

[3] Martín Sánchez, J. M. and Rodellar, J. (1996). *Adaptive Predictive Control From the Concepts to Plant Optimization*. Prentice Hall International, UK.

[4] Martín Sánchez, J. M., Adaptive Predictive Expert Control System. International Patent

Application. Application No: PCT/US00/17836, Priority Date: June 28, 2001. U.S.A. Patent No. 6,662,058 B1, Dec. 9, 2003.

[5] Schütze, M., Campisano, A., Colas, H., Schilling, W. and Vanrolleghem, P.A. (2004), Real time control of urban wastewater systems – where do we stand today?, *Journal of Hydrology* 299(3–4), 335–348.

[6] Olsson, G. and Newell, B. (1999). *Wastewater Treatment Systems, Modelling, Diagnosis and Control*, IWA Publishing, London, UK.

[7] Åkesson, M. and Hagander, P. (1999) A Gain-scheduling Approach for Control of Dissolved Oxygen in Stirred Bioreactors. *Preprints 14th World Congress of IFAC*, volume O, Beijing, China, 505–510.

[8] Vrečko, D., Hvala, N., Stare, A., Burica, O., Stražar, M., Levstek, M., Cerar, P. and Podbevšek, S. (2006). Improvement of Ammonia Removal in Activated Sludge Process with Feedforward-feedback Aeration Controllers. *Water Science and Technology*, 53(4–5), 125–132.

[9] Olsson, G., Nielsen, M. K., Yuan, Z., Lynggaard-Jensen, A. and Steyer, J.-P. (2005). *Instrumentation, Control and Automation in Wastewater Systems*, IWA Publishing, London, UK.

Adaptive predictive control of dissolved oxygen in biological reactors of wastewater treatment plants

Abstract: In this paper we present the adaptive predictive expert controllers and their application in dissolved oxygen (DO) control in the aerobic reactors of a wastewater treatment plant. The control system described in the paper consists of adaptive predictive expert control loops complemented by optimisation logic. The employed controllers successfully cope with the nonlinearity and the changing operating conditions of the process by predicting the evolution of the controlled variable and adapting to the changes of the process dynamics. This results in a more precise and stable DO control, which has many advantages. The complementary optimisation logic maintains the air pressure in the common collector at the lowest possible level, which permits adequate DO control and thus considerably reduces the energy consumption.

Keywords: Adaptive predictive control, wastewater treatment plants, dissolved oxygen control, energy consumption reduction.