

## APLIKACE INTELIGENTNÍ MEMBRÁNOVÉ SEPARACE

JAN STÁREK<sup>a,b</sup>, ZORAN ZWAAN<sup>a,b</sup>, MARTIN ZLÁMAL<sup>a</sup>, MARTIN PAIDAR<sup>a</sup>, ALEŠ ČERNÍN<sup>b</sup>,  
LUKÁŠ MALÝ<sup>d</sup>, JAN KINČL<sup>d</sup> a VLADIMÍR SÝKORA<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ústav anorganické technologie, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, <sup>b</sup> New Water Group s.r.o., Nádražní 312, 407 56 Jiřetín pod Jedlovou, <sup>c</sup> Ústav technologie vody a prostředí, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, <sup>d</sup> Alad CZ s.r.o., Pod Holým vrchem 358, 470 01 Česká Lipa, Česká republika  
starekj@vscht.cz

Recyklace vody a výroba pitné vody se stává poslední dobou velmi aktuálním tématem. Tlakové membránové procesy umožňují produkovat vodu s kvalitou vyšší či srovnatelnou s produktem konvenčně využívaných procesů jako je například písková filtrace a flotace. Provozování membránových technologií ovšem vyžaduje odbornou znalost. Správnou analýzou vstupních parametrů vody a kontrolou provozních parametrů procesu je technologie schopná dosáhnout vysoké návratnosti s velmi vysokou kvalitou produktu za současně nízké spotřeby energie. Inteligentní software IQ-MINT dokáže v reálném čase analyzovat tyto parametry a je schopný okamžitě měnit provozní parametry technologie s důrazem na získání co nejvyšší návratnosti a s ohledem na bezpečnost provozu a životnost membrány. Software byl validován na příkladu čištění reálné povrchové vody v jednotce UF60-MINT. Při zapnutí software upravoval provozní parametry technologie tak, aby na úkor návratnosti s důrazem na bezpečnost provozu prodloužil životnost membrány a snížil spotřebu chemikálií a energie. Použití softwaru IQ-MINT tedy umožňuje autonomní funkci technologie na jakémkoliv typu vstupní vody bez nutnosti stálé kontroly a regulace obsluhou.

Klíčová slova: membránová technologie, membránová separace, membrána, ultrafiltrace, inteligentní řízení, permeabilita, transmembránový tlak, inteligentní software

## Obsah

1. Úvod
  - 1.1. Membránové tlakové procesy
  - 1.2. Ultrafiltrace
  - 1.3. Konfigurace ultrafiltrace
  - 1.4. Čištění membrány
  - 1.5. Samooptimalizace
  - 1.6. Využití inteligentního řízení samooptimalizace v procesu ultrafiltrace
2. Praktická část, výsledky
  - 2.1. Optimalizace na reálném typu vod
  - 2.2. Nastavení hodnot in-line koagulace
  - 2.3. Validace inteligentního řízení v reálné aplikaci
  - 2.4. Hodnocení funkce softwaru IQ-MINT
3. Závěr

## 1. Úvod

Aplikací moderní membránové technologie je možno eliminovat nedostatky konvenčních separačních technologií nebo umožnit realizaci jejich požadovaných optimalizací. Konkrétně se jedná např. o zvýšení výtěžku produkce vody, snížení množství použitých chemikálií, snížení energetické náročnosti procesu, snížení nároků na rozměry

technologie, zvýšení stability procesu i produktu a zejména jeho kvality.

V současnosti moderní membránové technologie již zcela nahradily původně uplatňované konvenční postupy nebo je efektivně doplňují do integrovaných technologických celků jako další procesní stupeň, s cílem zvýšení jejich účinnosti a produkované kvality. Díky širokému spektru separačních vlastností různých typů membrán tyto technologie nabízí širokou škálu využití v konkrétních aplikacích<sup>1</sup>. Ve vodohospodářství nachází uplatnění zejména při výrobě pitné vody z povrchových či podzemních zdrojů, z brakických a mořských vod, při recyklaci odpadních vod, nebo při dočištění odpadních komunálních i průmyslových vod jako terciární stupeň čištění odpadních vod. Jejich většímu aplikačnímu rozšiřování a stabilnímu, provozně bezpečnému a efektivnímu provozu často brání dodržení předepsaných provozních a operačních podmínek<sup>2</sup>. To je přímo závislé na kvalitě a odpovědném přístupu provozovatele včetně nedostatku kvalifikované obsluhy na pracovním trhu. Budoucí směr, jak tyto provozní nedostatky účinně řešit, je opatření membránové technologie softwarem s umělou inteligencí, která by uměla autonomně reagovat na variabilitu nátoků a systematicky upozorňovat obsluhu na eliminaci technologických rizik<sup>1</sup>.

### 1.1. Membránové tlakové procesy

Membránové tlakové procesy umožňují pomocí gradientu tlaku, jako hnací síly, účinnou separaci jednotlivých složek z nátoky podle funkčního typu použité membrány. Tato hnací síla se nazývá transmembránový tlak (TMP). Produktem membránové filtrace je tzv. permeát, představující filtrát a zbytek filtrace tzv. retentát, představující koncentrát složek neprocházejících skrze membránu. Kromě efektivní separace látek umožňují také fyzikální dezinfekci vod bez použití chemických činidel, protože jsou schopny odstranit některé bakterie a viry. Podle velikosti hnací síly a typu použité membrány lze tlakové membránové procesy rozdělit na mikrofiltraci (MF), ultrafiltraci (UF), nanofiltraci (NF) a reversní osmózu (RO). Mikrofiltrace a ultrafiltrace separují složky na základě síťového efektu, kdežto nanofiltrace s reversní osmózou využívají separace látek na základě rozpustnostně-difuzního mechanismu<sup>1,2</sup>. Tato studie se bude nadále zabývat pouze ultrafiltrací.

### 1.2. Ultrafiltrace

Velikost pórů v ultrafiltrační membráně je dostatečná k zachycení nerozpuštěných látek, makromolekulárních látek, koloidů, bakterií a většiny virů. Ionty anorganických solí nejsou ultrafiltrací separovány. Intenzita toku skrze membránu je pak přímo úměrná velikosti působícího tlakového rozdílu, který odpovídá daným tlakům na jednotlivých stranách membrány<sup>1</sup>:

$$J_p = \frac{1}{A} \frac{dV_p}{d\tau} = \frac{Q_p}{A} \quad [\text{dm}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}] \quad (1)$$

kde  $J_p$  je intenzita toku permeátu,  $A$  je aktivní plocha membrány,  $V_p$  je proteklý objem permeátu a  $t$  je čas.  $Q_p$  je pak objemový tok permeátu za jednotku času.

Transmembránový tlak (TMP) je definován jako rozdíl mezi průměrným tlakem v nástřiku  $p_F$  a retentátu  $p_R$  a tlakem permeátu  $p_p$ . TMP je hnací silou toku membrána a používá se k indikaci znečištění membrány<sup>1</sup>:

$$\text{TMP} = \frac{p_F + p_R}{2} - p_p \quad [\text{bar}] \quad (2)$$

Dalším důležitým faktorem popisujícím tok membrána je permeabilita  $P$ . Permeabilita určuje specifický tok membrána neboli velikost hnací síly potřebné k vyvolání daného toku permeátu na jednotku plochy povrchu membrány. Permeabilita klesá ve vazbě na stupeň znečištění membrány<sup>1</sup>:

$$P = \frac{J_p}{\text{TMP}} \quad \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}} \right] \quad (3)$$

V membránové terminologii se k vyjadřování permeability využívá jednotka LMH/bar, která vyjadřuje výše uvedenou jednotku permeability.

Z hlediska udržitelnosti celkového procesu filtrace se sleduje parametr zvaný „Recovery“, nebo návratnost, regenerace či výtěžek, který určuje, kolik procent objemu nátoky proteče membrána do permeátu. Obecně tento parametr určuje celkovou účinnost systému. Provoz se zvýšenou výtěžností však může mít za následek zvýšení rychlosti znečištění, zvýšení četnosti mechanického a chemického čištění a tím snížení životnosti membrány<sup>1</sup>:

$$R = \frac{V_p - V_{BW}}{V_F} \cdot 100 \% \quad (4)$$

kde  $V_F$  je objem proteklého nátoky a  $V_{BW}$  je objem vody použité ke zpětnému proplachu. Všechny veličiny se počítají za minimální časové období jednoho filtračního cyklu<sup>1,3,4</sup>.

Často využívanou veličinou je hodnota  $P_{20}$ , která vyjadřuje hodnotu permeability přepočítanou na odpovídající hodnotu při 20 °C. Tento přepočet se využívá hlavně z důvodu lepší orientace v naměřených hodnotách permeability za rozdílných teplot.  $P_{20}$  lze vyjádřit následující rovnicí<sup>1</sup>:

$$P_{20} = \frac{P \cdot \eta_T}{\eta_{20^\circ\text{C}}} \quad \left[ \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar}} \right] \quad (5)$$

kde  $\eta_T$  značí viskozitu vody při měřené teplotě a  $\eta_{20^\circ\text{C}}$  viskozitu vody při 20 °C.

### 1.3. Konfigurace ultrafiltrace

Proces ultrafiltrace může být provozován ve dvou základních režimech, a to v režimu „dead-end“ a v režimu „cross-flow“. Tyto anglické termíny představují zavedenou terminologii v problematice membránových procesů, proto bude těchto výrazů využíváno i v následujícím textu.

Nejčastěji využívaným uspořádáním toku je režim „cross-flow“, při kterém, na rozdíl od klasické filtrace, proudí nástřik velkou rychlostí podél povrchu membrány. Permeát prochází membrána a je odváděn v kolmém směru vůči povrchu membrány, naopak zbylý nástřik je odváděn podélně ve formě tzv. retentátu. Nedochází tak k významné akumulaci filtrované složky na povrchu membrány a k tvorbě filtračního koláče (filmu), protože nástřik kolem membrány proudí vysokou rychlostí a filtrační koláč je proudem strháván do retentátu. Retentát je buď odváděn do dalšího stupně nebo vracen do nástřiku k recirkulaci. Při režimu „dead-end“ proudí nástřik kolmo na povrch membrány. V tomto režimu dochází k akumulaci filtrované složky na povrchu membrány, což přispívá k růstu filtračního koláče na membráně, a tím i k poklesu permeability. Tento režim je možné využít např. při filtraci méně znečištěných vod<sup>5,6</sup>.

#### 1.4. Čištění membrány

Příčinou poklesu intenzity toku filtrovaného média membránou v průběhu filtrace je soubor jevů probíhajících na povrchu membrány a uvnitř jejích pórů. V případě, kdy je velikost částic separované složky srovnatelná s velikostí pórů, může docházet k jejich blokování, čímž dochází k postupnému zanášení povrchu membrány a jevu tzv. koncentrační polarizace (obr. 1). Koncentrace částic na povrchu membrány může dosahovat až takových hodnot, kdy dojde k vytvoření tzv. gelové vrstvy (gelová polarizace). Je-li velikost separovaných částic menší než velikost pórů membrány, může naopak docházet k vzájemným interakcím částice – povrch póru, jako je např. adsorpce.

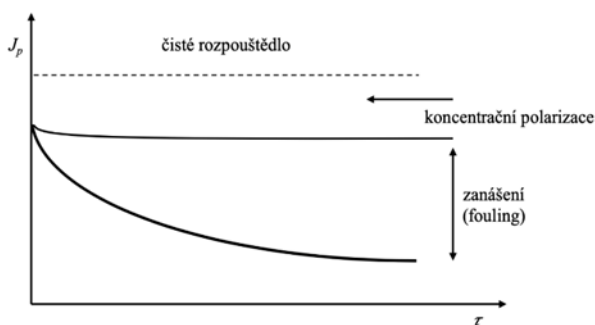
Koncentrační polarizace a adsorpce částic na povrchu póru jsou děje vratné. Naopak gelová polarizace je děj nevratný a membrána musí být vyměněna.

V průběhu technologického procesu ultrafiltrace dojde dříve nebo později k postupnému snížení průtoku permeátu k nepřijatelným hodnotám (hlavně z hlediska efektivity a tím i ekonomické výhodnosti procesu). Z tohoto důvodu je nutné membrány pravidelně čistit nebo aktivně předcházet jejich rychlému zanášení. V praxi se využívají dva typy metod intenzifikace procesu, a to metody vyžadující přerušování procesu, jako je např. zpětné promývání a chemické čištění, a metody, které přerušování procesu nevyžadují, např. předúprava vstupní vody<sup>2,6,7</sup>.

#### 1.5. Samooptimalizace

Prvním stupněm inteligentního řízení každého membránového provozu je jeho automatizace. Řízení pomocí PID „proportional-integral-derivative“ regulátoru je standardní proces řízení průmyslových strojů a zajišťuje tak jeho automatizaci. Využití PID regulátoru je jedna z nejčastěji využívaných forem regulace řízených veličin. PID regulátor se skládá ze tří složek:

- proporcionální – P – určuje reakci regulátoru na velikost regulační odchylky,
- integrační – I – určuje reakci regulátoru na dobu trvání regulační odchylky,



Obr. 1. Závislost intenzity toku membránou na čase; znázornění koncentrační polarizace a zanášení membrány, převzato z cit.<sup>1</sup>

- derivační – D – určuje reakci regulátoru na rychlost změny hodnoty regulační odchylky.

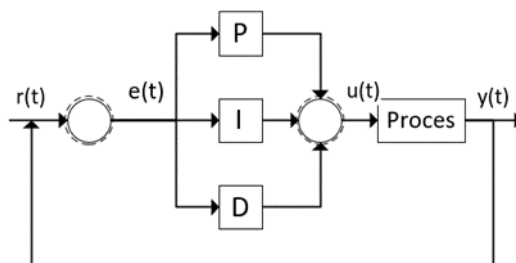
Charakteristickým rysem PID regulátoru je schopnost využívat všechny tři regulační členy, tedy proporcionální, integrační a derivační vliv na výstupu z regulátoru k optimální a co nejpřesnější regulaci procesu. Blokové schéma na obr. 2 zobrazuje princip PID regulace. Zobrazuje PID regulátor, který nepřetržitě počítá hodnotu regulační odchylky  $e(t)$  jako rozdíl mezi požadovanou nastavenou hodnotou  $r(t)$  a měřenou výstupní proměnnou hodnotou  $y(t)$ ;  $e(t) = r(t) - y(t)$  a provede opravu dle proporcionální, integrační a derivační podmínky. Regulátor se snaží odchylku v průběhu času minimalizovat úpravou řídicí proměnné  $u(t)$  změnou stavu regulačního členu na novou hodnotu určenou váženým součtem řídicích členů<sup>8</sup>.

Člen P je tedy přímo úměrný aktuální hodnotě odchylky  $e(t)$ . Pokud je chyba velká, bude regulační výstup úměrně velký při použití faktoru zesilovací konstanty  $K_p$ . Samotné použití proporcionálního řízení bude mít za následek chybu mezi nastavenou hodnotou a procesní hodnotou, protože regulátor vyžaduje chybu pro generování odezvy proporcionálního výstupu. V podmínkách procesu v ustáleném stavu je dosaženo rovnováhy s ustáleným „offsetem“ odchylky  $e(t)$  (cit.<sup>8-10</sup>).

Člen I zohledňuje minulé hodnoty regulační odchylky  $e(t)$  a integruje je dále v čase. Pokud zde existuje zbytková odchylka po aplikaci proporcionálního řízení, integrační člen se snaží eliminovat zbytkovou odchylku přidáním regulačního efektu v důsledku historické kumulativní hodnoty regulační odchylky. Ve chvíli, kdy je tato chyba odstraněna, integrační člen přestane narůstat. To bude mít za následek zmenšování proporcionálního vlivu se snižující se odchylkou, což však bude kompenzováno rostoucím integračním členem.

Člen D slouží jako odhad budoucího trendu regulační odchylky  $e(t)$  na základě aktuální rychlosti její změny. Čím je změna rychlejší, tím se zvyšuje regulační nebo tlumící účinek.

Wyvážení všech efektů jednotlivých členů je dosaženo laděním smyčky pro vytvoření optimální funkce ovládaní. Ladicí koeficienty (níže uvedeny jako  $K$ ) jsou odvo-



Obr. 2. Schéma funkce PID regulátoru

zeny vždy pro konkrétní řídicí aplikaci, protože závisí na charakteristice odezvy kompletní smyčky vně regulátoru. Koeficienty jsou závislé na chování měřicího čidla koncového regulačního prvku (např. regulačního ventilu), případných zpožděních řídicích signálů a na samotném procesu. Přibližné hodnoty koeficientů lze obvykle zpočátku zadat s odvozením od typu aplikace a zpřesňují se v průběhu procesu po obdržení prvních dat<sup>8,10</sup>.

Funkce PID regulátoru je popsána dle následující rovnice (6) (cit.<sup>8</sup>):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

kde  $K_p$ ,  $K_i$  a  $K_d$  označují všechny nezáporné koeficienty, proporcionální, integrální a derivační člen (označované jako P, I a D). Standardně jsou tyto členy vyjadřovány koeficientem  $K_p$  ve tvaru,  $K_i = K_p/T_i$  a  $K_d = K_p T_d$ . Výhoda tohoto tvaru je, že  $T_i$  a  $T_d$  mají srozumitelný fyzikální význam, protože reprezentují integrační a derivační čas.  $K_p T_d$  je tedy časová konstanta, se kterou se regulátor pokusí přiblížit nastavené hodnotě a  $K_p/T_i$  určuje, jak dlouho bude regulátor tolerovat výstupní hodnotu nad nebo pod nastavenou vstupní hodnotou. Rovnice PID regulátoru tedy přejde do následujícího tvaru<sup>8</sup>:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{I}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (7)$$

Přestože má PID regulátor tři regulační členy, některé aplikace umožňují k zajištění vhodného řízení pouze jeden nebo dva členy. Toho je dosaženo nastavením nepoužitých parametrů na nulu a regulátor se následně nazývá PI, PD, P nebo I regulátor v nepřítomnosti jiných regulačních akcí. PI regulátory jsou poměrně běžné v aplikacích, kde by derivační akce byla citlivá na šum měření, ale integrální člen je často potřebný k tomu, aby systém dosáhl své cílové hodnoty<sup>8–10</sup>.

#### 1.6. Využití inteligentního řízení samooptimalizace v procesu ultrafiltrace

V rámci řešení výzkumného projektu s názvem Membránové inteligentní systémy 4.0, ev.č. FW01010020, podpořený Technologickou agenturou ČR v rámci programu TREND, byl společností New Water Group s.r.o. ve spolupráci s řešiteli ze společnosti Alad CZ s.r.o. vytvořen unikátní řídicí software IQ-MINT, pracující na principu PID regulace a hromadném sběru a sdílení dat, umožňující inteligentní a autonomní řízení procesu ultrafiltrace, použitelný na libovolný typ nátoky zpracovávané vody. Následnou vývojovou fází pak představovala aplikační validace tohoto softwaru IQ-MINT na reálném zdroji surové vody s cílem potvrdit inteligentní a samooptimalizační řízení procesu ultrafiltrace v reálném čase s důrazem na prodloužení životnosti membrány, zvýšení celkového recovery a snížení provozních nákladů. Toto aplikační ověření probíhalo v širším řešitelském konsorciu projektu,

tedy za aktivní účasti dalších řešitelů z VŠCHT Praha a společnosti Ircon s.r.o.

V obecném pohledu na filtrační režim lze proces ultrafiltrace (jeden filtrační cyklus) rozdělit na 3 základní operační kroky:

- filtrace,
- zpětný proplach (Backwash – BW),
- chemicky podpořený zpětný proplach (Chemically Enhanced Backwash – CEB).

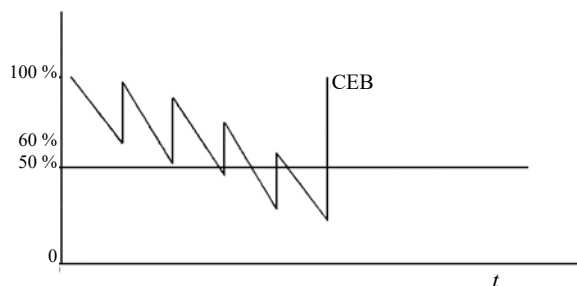
Každý krok filtračního cyklu má své opodstatnění, přičemž jejich délka, četnost a intenzita zpětného proplachu přímo ovlivňuje účinnost a stabilitu ultrafiltračního procesu. V obecném pohledu na inteligentní řízení cyklu filtrace lze předpokládat, že uvedené procesní kroky můžeme optimalizovat „samostatně“ a hodnotit jejich vliv na požadovanou hodnotu a trend permeability  $P$ , resp. permeability  $P_{20}$  přepočtené na hodnotu odpovídající teplotě 20 °C.

Při inteligentním řízení dále nutno zohlednit některé protichůdné technologické skutečnosti. Je-li membrána zanesená, pak permeabilita klesá a je nutné provést zpětný proplach (BW). Pokud přestává být zpětný proplach účinný, je nutné přistoupit k chemicky podpořenému proplachu (CEB). Každý chemický proplach ovšem razantně snižuje životnost materiálu membrány. Jedná se tedy až o poslední technologický proces k vyčištění membrány a je snaha jeho frekvenci co nejvíce snížit. Rychlost zanášení membrány je závislá na charakteru vstupní vody, který je v praxi často proměnlivý.

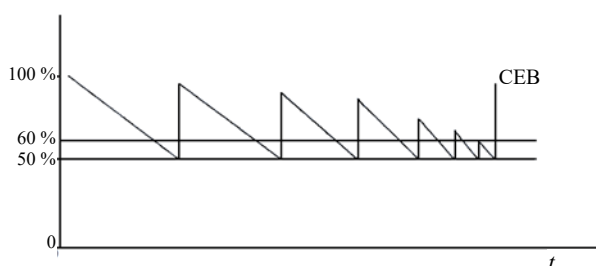
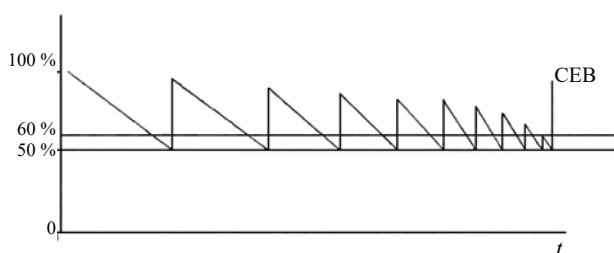
Při zohlednění výše uvedených skutečností lze konstatovat, že software IQ-MINT, vyvinutý společností New Water Group s.r.o. a Alad CZ s.r.o. je schopný okamžitě reagovat na změnu charakteru vstupní vody a tím přizpůsobit procesní nastavení uváděných operačních kroků tak, aby hodnota permeability dosahovala maximálních hodnot v požadovaném „neměnném“ časovém trendu, ale s ohledem na bezpečnost provozu a životnost použitých membrán.

Na obr. 3 je znázorněn typický pokles permeability v rámci manuálního řízení ultrafiltrace s fixní dobou filtrace.

Na obr. 4 lze pozorovat výsledný efekt optimalizačního softwaru IQ-MINT na hodnotu a trend permeability. Jeli zpětný proplach proveden ihned při poklesu permeability pouze pod určitou procentuální hodnotu, dochází



Obr. 3. Standardní řízení procesu s fixní hodnotou délky filtračního cyklu,  $y = P_{20}$

Obr. 4. Optimalizované řízení podle poklesu  $P_{20}$ ,  $y = P_{20}$ Obr. 5. Optimalizované řízení podle poklesu  $P_{20}$  s adaptivním zpětným proplachem,  $y = P_{20}$ 

k účinnějšímu proplachu membrány a tím např. i k prodloužení intervalu mezi chemicky podpořenými proplachy.

Na obr. 5 lze pozorovat efekt delší doby a vyšší intenzity zpětného proplachu. Dochází-li k nedokonalému zpětnému proplachu, nastává prodloužení jeho délky. Pokud prodloužení doby zpětného proplachu nemá zásadní vliv na zvýšení hodnoty permeability, dochází pomocí navržených algoritmů ke zvýšení intenzity jeho toku. Optimalizací parametrů zpětného proplachu tedy dochází k účinnějšímu prodloužení intervalu mezi chemickými proplachy.

Hlavní výhodnou samooptimalizačního softwaru IQ-MINT je skutečnost, že toto inteligentní řízení procesu ultrafiltrace pracuje na základě aktuálně hodnocených provozních parametrů a umožňuje okamžitou úpravu relevantních provozních parametrů nezávisle na kvalitě nátoku nebo produktu.

Použití softwaru IQ-MINT tedy umožňuje dosažení požadovaného optimálního provozního režimu technologie bez nutnosti hlubší znalosti procesu i kvalitativních parametrů jednotlivých procesních proudů.

## 2. Praktická část, výsledky

### 2.1. Optimalizace na reálném typu vod

V rámci testování funkce softwaru IQ-MINT byl tento implementován do technologického zařízení ultrafiltrace UF60-MINT, navrženého společností New Water Group s.r.o. Cílem testování bylo potvrdit funkci samooptimalizačního softwaru IQ-MINT na reálném zdroji povrchové vody s důrazem na optimalizaci celkového recovery (resp. jeho maximálního zvýšení), snížení rizika nevratného zanesení membrány (resp. maximalizace dlouhodobé hodnoty permeability) a na přínos při snižování provozních nákladů.

Jako vhodná lokalita pro validaci funkce softwaru IQ-MINT byla zvolena Úpravná vody v Bedřichově. Zdroj surové vody zde představuje povrchová voda z Josefova Dolu, která je dle analytického rozboru značně kontaminována organickými látkami, konkrétně směsí huminových látek. Protože rozptyl velikosti organických molekul huminových látek přesahuje schopnost jejich účinného odstranění pouze pomocí ultrafiltrace, bylo nutno aplikovat v rámci použitého zařízení UF60-MINT kombinaci ultrafiltrace s in-line koagulací.

### 2.2. Nastavení hodnot in-line koagulace

V konvenčním procesu úpravy vod se využívá koagulace jako technologický proces, který vede ke zvýšení účinnosti odstraňování organického znečištění. V případě membránového procesu se využívá proces tzv. in-line koagulace, kdy je koagulační činidlo dávkováno přímo do nátoku surové vody s kontinuální úpravou pH na požadovanou hodnotu. V proudu surové vody před vstupem na membránu se tak po úpravě pH a nadávkování koagulačního činidla tvoří mikrovločky, které je ultrafiltrační membrána schopna účinně zachytit.

V laboratoři VŠCHT Praha byly před spuštěním pilotního provozu nejprve provedeny standardní kádinkové testy se síranem hlinitým v simulovaných podmínkách s odebranou surovou vodou při teplotě vody nátoku 2,5 °C. Koagulační činidlo i teplota odpovídala podmínkám na Úpravně vody v Bedřichově. Počáteční dávka koagulantu pro kádinkové testy byla zvolena 7,6 ml h<sup>-1</sup>, tedy 2,1 ml m<sup>-3</sup>, což odpovídá průměrné dávce koagulantu dávkované na ÚV v Bedřichově při pH 5,9–6,0. Při kádinkových testech nedocházelo za výše uvedených podmínek k tvorbě viditelných vloček ani při zvolené dávce ani při dávkách nižších či vyšších. Viditelné vločky začaly vznikat až při vyšších hodnotách pH, konkrétně 6,9–7,1, kde vločky ovšem tvoří primárně produkty hydrolyzy koagulantu bez organických molekul. Přítomné organické látky by měly koagulovat při pH právě 5,9–6,1, ovšem nízká teplota (< 5 °C) zhoršuje schopnost tvořit vločky, to ovšem znamená, že by v roztoku neměly vznikat mikrovločky. Bylo tedy nutné přistoupit k testům v reálném provozu. Nejprve byly provedeny testy dávek 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 2,7 a 3,0 ml m<sup>-3</sup> při hodnotě pH 6,1 a byla měřena absorbance

produktu při 387 nm a následně koncentrace hliníku a zákal. Dávka koagulantu pro vzorek s nejnižšími hodnotami absorbance a zákalu produktu (tedy 2,7 ml m<sup>-3</sup>) byla zvolena jako vhodná a následně bylo při aplikaci zvolené dávky měněno pH s cílem zvýšení účinnosti koagulace. Jako vhodné pH byla nakonec zjištěna hodnota pH 6,8. I přes dosažení vysoké účinnosti koagulace měl produkt UF stále vyšší hodnoty absorbance při 387 nm než produkt ÚV Bedřichov, což odpovídá vyšší koncentraci organického znečištění. V dalším kroku byl snižován průtok filtrace z důvodu zvýšení doby zdržení mezi hodnoty 1,8 a 2,4 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

Finální návrhové parametry in-line koagulace byly tedy následující:

- dávka koagulantu 2,7 ml m<sup>-3</sup>;
- pH 6,8;
- průtok filtrace 1,8–2,4 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

### 2.3. Validace inteligentního řízení v reálné aplikaci

Jednotka UF60-MINT s jedním membránovým modulem o aktivním povrchu 60 m<sup>2</sup> ve formě multikanálového dutého vlákna v dead-end uspořádání byla testována na příkladu vody odpovídající kvalitě povrchové vody neboli surové vody upravované ÚV Bedřichov. Teplota nátku byla přibližně v rozmezí 5–2 °C.

Před zahájením pilotního provozu byly nastaveny následující počáteční parametry pro filtrační cyklus:

- filtrace: průtok 3,6 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (60 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) po dobu 40 min,
- BW: průtok 13,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> (240 l m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>) po dobu 50 s,
- CEB zásaditý: 1× denně, dávkován 33% NaOH na pH 12,5, plnění 7,2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> po dobu 45 s, loužení po dobu 30 min, výplach 13,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> po dobu 45 s,
- CEB kyselý: 1× denně, dávkována 37% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> na pH 1,5, plnění 7,2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> po dobu 45 s, loužení po dobu 30 min, výplach 13,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> po dobu 45 s,
- CEB dezinfekce: 1× denně, dávkován 1% NaClO, pH max. 12, plnění 7,2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> po dobu 45 s, loužení po dobu 60 s, výplach 13,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> po dobu 45 s.

Dále byly nastaveny počáteční a limitní hodnoty procesních parametrů pro validaci SW samooptimalizace včetně podmínek pro spuštění BW a CEB. Ty respektovaly doporučení výrobce membrány ve vazbě na kinetiku zanášení membrány.

Na počátku testovací fáze před spuštěním samooptimalizačního softwaru se permeabilita  $P_{20}$  pohybovala v rozmezí 270–390 dm<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup>. Chemicky podpořené proplachy se v průběhu samooptimalizace ustálily v intervalu jeden za dva dny. Těsně před spuštěním samooptimalizace byly provedeny testy in-line koagulace. Od tohoto okamžiku byla spuštěna in-line koagulace, vlivem které bylo nutné snížit průtok filtrace. Díky sníženému průtoku a probíhající in-line koagulaci se snížila hodnota permeability z hodnoty okolo 370 dm<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup> na 230–340 dm<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> bar<sup>-1</sup>.

V případě transmembránového tlaku, tedy hnací síly filtrace, byly stanoveny následující průběhy. Hodnoty TMP se pohybovaly v rozmezí 0,22–0,26 bar před zapnutím samooptimalizace a při objemovém průtoku 3,6 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, resp. v rozmezí 0,145–0,155 bar po zapnutí in-line koagulace při aplikovaném snížení objemového průtoku na 1,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Tento rozsah zůstal zachován i v případě aplikace softwaru samooptimalizace. Při procesu in-line koagulace byla hodnota pH upravována na konstantní hodnotu 6,8 pomocí dávkování 1–5% roztoku NaOH.

Dále byla hodnocena závislost výtěžku, doby filtrace a zpětného proplachu BW a CEB procesu ultrafiltrace na parametrech v průběhu validovaného provozu. Z pohledu optimalizace doby filtrace lze konstatovat, že v případě, kdy nebyl zapnut samooptimalizační software, byla doba filtrace srovnatelná s případem, kdy byl software zapnut. Samooptimalizační software tedy primárně ovlivňoval objemový průtok filtrace. Doba filtrace se nezměnila ani v případě, kdy byla spuštěna in-line koagulace. Samooptimalizace opět změnila hodnoty průtoku v rozmezí průtoků ideálních pro funkci in-line koagulace. Délka zpětného proplachu se nejprve zvýšila na 60 s, poté se zvýšila intenzita jeho průtoku na 14,2 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, kdy následně došlo k jeho zkrácení zpět na 50 s. To samé platí i v případě veličiny recovery, která byla značně ovlivněna vyšším počtem kratších filtračních cyklů, a tedy i zvýšeným počtem zpětných proplachů. Ihned po zapnutí samooptimalizačního softwaru při průtoku 2,4 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> veličina recovery skokově vzrostla, což bylo způsobeno zvýšením hodnoty průtoku, doba jednoho filtračního cyklu se mírně zkrátila. Poté si samooptimalizace upravila průtok filtrace na 1,8 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> a veličina recovery se úměrně snížila. Snížení veličiny recovery ovlivnila hlavně spuštěná in-line koagulace. V následující tab. I je uvedeno srovnání provozních

Tabulka I

Srovnání provozních parametrů před a po zapnutí samooptimalizace

Fáze	$P_{20}$ [dm <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> bar <sup>-1</sup> ]	TMP [bar]	Průtok filtrace [l h <sup>-1</sup> ]	R [%]
1.1 <sup>a</sup>	334,2	0,28	3600	87,5
1.2 <sup>b</sup>	336,8	0,19	1800	84,7
2 <sup>c</sup>	297,8	0,18	2400; 1800	72,4

<sup>a</sup> Filtrace bez in-line koagulace, vypnutý samooptimalizační software, <sup>b</sup> Filtrace s in-line koagulací, vypnutý samooptimalizační software, <sup>c</sup> Filtrace s in-line koagulací, zapnutý samooptimalizační software

Tabulka II  
Souhrn analytických parametrů

Parametr	Vzorek	Vypnutý SW	Zapnutý SW
CHSK <sub>Mn</sub> , mg l <sup>-1</sup>	nátok	4,14	4,07
	produkt	1,53	1,49
pH	nátok	6,24	6,31
	produkt	6,58	6,52
RL <sub>105</sub> , mg l <sup>-1 a</sup>	nátok	50,50	53,00
	produkt	43,50	46,00
NL <sub>105</sub> , mg l <sup>-1 b</sup>	nátok	7,00	7,50
	produkt	0,00	0,00
Dusičnany, mg l <sup>-1</sup>	nátok	0,76	0,79
	produkt	0,78	0,76
Hliník, mg l <sup>-1</sup>	nátok	0,04	0,02
	produkt	0,03	0,02

<sup>a</sup> Rozpuštěné látky měřené při 105 °C, <sup>b</sup> Nerozpuštěné látky měřené při 105 °C

parametrů při zapnuté samooptimalizaci z testovacího provozu ve formě celkového průměru  $P_{20}$ , TMP, průtoku filtrace a recovery  $R$ .

Velmi důležité je zmínit, že technologie splňovala kvalitativní parametry provozu. V tab. II jsou uvedené průměry měřených kvalitativních hodnot při vypnutém a zapnutém softwaru IQ-MINT.

#### 2.4. Hodnocení funkce softwaru IQ-MINT

Parametry funkce samooptimalizačního softwaru IQ-MINT byly hodnoceny dle dvou hlavních kritérií. V první řadě byly pomocí softwaru nastaveny provozní parametry ultrafiltrace tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší hodnoty recovery. V druhém případě byly pomocí softwaru upravovány provozní parametry tak, aby co nejúčinněji prodlužovaly životnost membrány, tj. zvyšovaly účinnost zpětných proplachů, zvyšovaly interval mezi CEB a udržovaly permeabilitu ve filtračním cyklu s nízkou mírou rozptylu. Tyto dva přístupy optimalizace provozu jdou logicky proti sobě.

V kontextu tohoto přístupu inteligentního řízení bylo pomocí aplikovaného softwaru upřednostněno snížení četnosti chemicky podpořených proplachů oproti maximálnímu zvýšení hodnoty recovery. Snížení hodnoty recovery bylo zapříčiněno aplikací vyšší četnosti zpětných proplachů, čímž byl eliminován klesající trend permeability. Z dat lze dále pozorovat, že v tomto režimu byly zpětné proplachy mnohem účinnější. Souhrnně lze konstatovat, že před spuštěním softwaru IQ-MINT byla četnost CEB 11,6 CEB/1000 m<sup>3</sup> a po spuštění samooptimalizačního softwaru se četnost CEB ustálila na 5,8 CEB/1000 m<sup>3</sup>. Touto úpravou provozních parametrů bylo pomocí softwaru dosaženo poloviční spotřeby chemikálií potřebných na údržbu membrány.

### 3. Závěr

Pilotní provoz integrovaného procesu in-line koagulace a ultrafiltrace při zpracování povrchové vody na Úpravně vody Bedřichov potvrdil, že bez aplikace inteligentního řízení dosahoval průměrné výtěžnosti na úrovni 84,7 %. Toto však bylo dosaženo za provozních podmínek, kdy ultrafiltrační membrána byla daleko více chemicky zatížena větší frekvencí zpětných proplachů CEB. Při tomto provozním režimu rovněž docházelo k vyššímu poklesu hodnoty permeability v rámci jednoho filtračního cyklu i k postupně klesajícímu trendu permeability mezi jednotlivými zpětnými proplachy membrány.

V případě aplikovaného samooptimalizačního softwaru IQ-MINT došlo ke snížení průměrné výtěžnosti na úroveň 72,4 %, což bylo způsobeno zvýšením intenzity zpětného proplachu BW ve vazbě na jeho četnost, průtok i délku. Tento režim však docílil zvýšenou účinnost zpětného proplachu BW ve vazbě na požadovanou konstantní a co nejvyšší hodnotu permeability a zároveň snížil frekvenci zpětného proplachu CEB. Tímto způsobem tedy dochází k efektivnější filtraci za minimalizace poklesu hodnot průměrné permeability při podmínkách, které zaručují delší životnost membrány. Tento režim dále jednoznačně prokázal vyšší účinnost zpětného proplachu BW ve vazbě na nežádoucí pokles permeability, což snižuje spotřebu energie, spotřebu chemikálií a zejména minimalizuje riziko nevratného zanesení membrány. To jednoznačně vede k optimalizaci celkových provozních nákladů a k eliminaci rizika nevratného zanesení membrány. Na základě získaných výsledků a kvalitativního hodnocení provozu lze tedy spolehlivě potvrdit správnou funkci optimalizačního softwaru IQ-MINT.

Potenciál využití softwaru IQ-MINT u procesu ultrafiltrace není pouze při výrobě pitné vody, ale je využitelný

i v dalších aplikacích. Je rovněž zřejmý i v jeho použitelnosti na některé další typy tlakových membránových procesů.

Vypracováno v rámci projektu ev.č. FW01010020, Membránové inteligentní systémy 4.0, který je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR, Programu TREND.

#### LITERATURA

1. Mikulášek P., Doleček P., Jiránková H., Kinčl J., Kočířík M., Pospíšil P., Schauer J.: *Tlakové membránové procesy*, 1. vyd. VŠCHT Praha, Praha 2013.
2. Pabby A. K., Rizvi S., Requena A.: *Handbook of Membrane Separations: Chemical, Pharmaceutical, Food, and Biotechnological Applications. Section II*. Taylor&Francis Group, Boca Raton 2008.
3. Boda R., Bates W. T., Bartels C. R.: *Use of Color Removal Membranes on Waste Water Treatment in Pulp and Paper Industry*. NTNU, Trondheim 2010.
4. Mulder M.: *Basic Principles of Membrane Technology*, 2. vyd. Kluwer Academic, Dordrecht 1996.
5. Pienemann K. V., Nunes S. P.: *Membrane Technology, Vol. 4: Membranes for Water Treatment*. Wiley-VCH, Weinheim 2010.
6. Strathmann H.: *J. Membr. Sci.* 246, 113 (2005).
7. Mikulášek P., Velikovská P., v knize: *Expanding Issues in Desalination*, str. 181. InTech, Rijeka 2011.
8. Bucz Š., Kozáková A., v knize: *Introduction to PID Controllers: Theory, Tuning and Application to Frontier Area*. InTech, Rijeka 2012.
9. Araki M.: *Control Systems, Robotics and Automation, Vol. 7: PID Control*. 2009.
10. Zhang J., Guo L.: *IEEE Control Systems Letters* 3, 643 (2019).

**J. Stárek<sup>a,b</sup>, Z. Zwaan<sup>a,b</sup>, M. Zlámal<sup>a</sup>, M. Paidar<sup>a</sup>, A. Černín<sup>b</sup>, L. Malý<sup>d</sup>, J. Kinčl<sup>d</sup>, and V. Sýkora<sup>c</sup>**  
<sup>a</sup>Department of Inorganic Technology, University of Chemistry and Technology, Prague, <sup>b</sup>New Water Group s.r.o., Jiřetín pod Jedlovou, <sup>c</sup>Department of Water Technology and Environmental Engineering, University of Chemistry and Technology, Prague, <sup>d</sup>Alad CZ s.r.o., Česká Lípa, Czech Republic): **Application of Intelligent Membrane Separation**

Water recycling and the production of drinking water have recently become a very actual topic. Pressure membrane processes make it possible to produce water with a quality higher than or comparable to the product of conventionally used processes such as sand filtration and flocculation. The operation of membrane technologies requires specialist knowledge. By correctly analysing the input parameters of the water and controlling the operating parameters of the process, the technology is capable of achieving a very high recovery with a very high product quality while simultaneously using low energy. The IQ-MINT intelligent software can analyze these parameters in real time and is able to immediately change the operating parameters of the technology with an emphasis on obtaining the highest possible recovery with regard to operational safety and membrane life. The software was validated on the example of cleaning real surface water in the UF60-MINT unit. When switched on, the software adjusted the operating parameters of the technology in such a way that – to the expense of the recovery – the lifetime of the membrane was extended and the consumption of chemicals and energy was reduced, with an emphasis on operational safety. The use of the IQ-MINT software thus enables the autonomous function of the technology with any type of incoming water without the need for a constant control and regulation by the operator.

**Keywords:** membrane technology, membrane separation, membrane, ultrafiltration, intelligent control, permeability, transmembrane pressure, intelligent software