

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 618

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Lubomír Jaroš

Použití metod umělé inteligence
při operativním řízení
povodňových průtoků nádrží

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav vodního hospodářství krajiny

Ing. Lubomír Jaroš

**POUŽITÍ METOD UMĚLÉ INTELIGENCE
PŘI OPERATIVNÍM ŘÍZENÍ
POVODŇOVÝCH PRŮTOKŮ NÁDRŽÍ**

USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS
DURING OPERATIVE CONTROL
OF FLOOD FLOW BY RESERVOIR

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Vědní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Školitel: Prof. Ing. Miloš Starý, CSc.

Oponenti: Prof. Ing. Karel Nacházel, DrSc.
Prof. Ing. Jiří Zezulák, DrSc.
Ing. Karel Drbal, Ph.D.

Datum obhajoby: 18.2.2011

KLÍČOVÁ SLOVA

operativní řízení nádrží, umělá inteligence, fuzzy množiny, fuzzy inferenční systém, funkce příslušnosti, neuronové sítě, topologie neuronových sítí, deterministická předpověď, stochastická předpověď, stochastické řízení nádrže, náhodná srážková pole, optimalizace, princip adaptivity

KEY WORDS

operative control of reservoir, artificial intelligence, fuzzy sets, fuzzy inference system, membership function, neural networks, topology of neural network, deterministic forecast, stochastic forecast, stochastic control of reservoir, random precipitation square, optimization, principle of adaptation

Práce je uložena v Knihovnickém informačním centru, Fakulta stavební Vysokého učení technického v Brně, Veveří 331/95, Brno

© Lubomír Jaroš, 2011

ISBN 978-80-214-4262-7

ISSN 1213-4198

OBSAH

OBSAH	3
1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	7
2.1 VODOHOSPODÁŘSKÝ DISPEČINK.....	8
2.2 OPERATIVNÍ ŘÍZENÍ VODOHOSPODÁŘSKÝCH NÁDRŽÍ A SOUSTAV	8
3 PRÁCE ZABÝVAJÍCÍ SE PŘÍBUZNOU PROBLEMATIKOU	9
4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE.....	11
5 POUŽITÉ METODY ŘEŠENÍ.....	11
5.1 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY	11
5.2 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ ROVNICE NÁDRŽE	12
5.3 ZÁKLADY FUZZY MODELOVÁNÍ	12
5.3.1 <i>Fuzzy množiny</i>	12
Vznik teorie fuzzy množin.....	12
Úvod do teorie fuzzy množin	12
Základní typy parametrizovaných funkcí příslušnosti	13
Vlastnosti fuzzy množin	13
Operace s fuzzy množinami.....	14
Fuzzy relace.....	14
5.3.2 <i>Fuzzy logika</i>	15
Fuzzy výroky a jejich skládání	15
Fuzzy implikace.....	15
5.3.3 <i>Fuzzy systémy</i>	16
5.4 NEURONOVÉ SÍTĚ	17
5.4.1 <i>Historie neuronových sítí</i>	17
5.4.2 <i>Základní pojmy</i>	17
5.4.3 <i>Základní typy přenosových funkcí</i>	17
5.4.4 <i>Topologie neuronových sítí</i>	18
5.4.5 <i>Trénování neuronové sítě</i>	18
5.5 PRINCIP ADAPTIVITY	19
5.6 MODEL NEJISTOT VSTUPNÍCH DAT	19
6 VÝSLEDKY A ZÁVĚRY DISERTAČNÍ PRÁCE.....	20
POUŽITÁ LITERATURA	26
SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ AUTORA	29
ŽIVOTOPIS AUTORA	30
ABSTRACT	31

1 ÚVOD

Území České republiky je významnou pramennou oblastí evropského kontinentu a z hydrologického hlediska je tato oblast často označována za „střechu Evropy“. Rozkládá se na rozvodnici tří moří, tj. Severního moře (povodí Labe), Baltského moře (povodí Odry) a Černého moře (povodí Dunaje). Tato skutečnost je důvodem, proč jsou vodní zdroje České republiky závislé výhradně jen na atmosférických srážkách a proč tato přímá závislost nutí vodohospodáře k efektivnímu využívání povrchové vody v závislosti na technických možnostech společnosti. Rozvojem společnosti a pozvolným nástupem technické revoluce se zvyšovala poptávka po surové vodě jak pro průmyslovou výrobu, tak především pro úpravu na vodu pitnou. Tyto zvýšené požadavky bylo a stále je možno nejefektivněji zabezpečit pouze akumulací povrchové vody v období přebytku pro její pozdější využití v období deficitu. Akumulace povrchové vody je technicky zajišťována přehrazením určitého vodního toku v morfologicky vhodném profilu a výstavbou funkčních objektů pro zajištění požadovaných funkcí tohoto vodního díla. Vzhledem k požadovaným funkcím má však každé vodní dílo svá omezení, ať už jde o funkci zásobní, ochrannou, energetickou, rekreační či jinou. Postupem doby, se zvyšujícím se počtem provozovaných vodních děl v povodí a narůstající mírou poznání bylo zjištěno, že nejefektivnějším způsobem řízení vodohospodářských nádrží je řízení soustavy vodních děl jako celku, což je v současné vodohospodářské praxi již běžnou realitou, viz například (Povodí Odry, s. p., 1999).

Provozovatelé nádrží potřebují k zajištění bezproblémového řízení nezbytné technické vybavení, které provozovateli bude nepřetržitě poskytovat zpětnou vazbu řízeného dynamického systému (tj. vodohospodářské nádrže, resp. soustavy). Toto technické vybavení představuje především měřicí zařízení, které kontinuálně měří vstupní a výstupní veličiny systému, tomu odpovídající hardwarové a softwarové vybavení nutné k zpracování sledovaných dat, archivaci dat a vyhodnocení dynamického systému vzhledem k požadovanému cílovému stavu. Samozřejmostí je také kvalifikované personální obsazení, neboť úloha člověka v řídicím procesu je v současné době nezastupitelná a v nejbližší budoucnosti se pravděpodobně tato role nezmění.

Zaměříme-li se nyní pouze na protipovodňovou ochranu v povodí zajišťovanou nádržemi, je tato funkce ovlivňována retenční kapacitou nádrží, manipulacemi na nádržích, technickými parametry výpustných zařízení (tj. spodních výpustí a bezpečnostních přelivů), kapacitou koryt v podpovodí a v neposlední řadě meteorologickou předpovědí a její vypovídající schopností. Při řízení nádrží za povodňových situací se na základě vydané předpovědi srážek nad povodím, některým z běžně užívaných předpovědních modelů, stanoví pomocí srážkoodtokového modelu průběh prognózovaných průtoků v prognózních profilech sítě říčních koryt. V těchto prognózních profilech jsou také zahrnuty nádrže, resp. přítoky vody do nádrží, na základě kterých je možno provádět odpovídající manipulace vedoucí k maximální možné ochraně území pod nádržemi. V případě vodohospodářské soustavy je optimalizováno řízení soustavy jako celku.

Z předchozího textu je zřejmé, že úspěšné řízení vodohospodářské nádrže, resp. soustavy je závislé na úspěšné předpovědi rozložení srážek nad povodím jak v čase, tak v prostoru, a na použití přílehavého srážkoodtokového modelu s vhodně schematizovanou říční sítí. Jak předpověď srážek, tak simulace srážkoodtokových procesů v povodí jsou zatíženy poměrně vysokou mírou neurčitosti, která pramení z neurčitosti obsažené převážně v měřených veličinách vstupujících do modelování výše zmíněných procesů, v použitém zjednodušení modelovaných jevů, ve zvolené schematizaci povodí a v řadě dalších veličin. Na druhé straně je nutno podotknout, že předpověď srážek je jednou z nejsložitějších činností v meteorologii. V České republice je krátkodobá předpověď srážek zajišťována Českým hydrometeorologickým ústavem a k této činnosti je především využíván numerický předpovědní model Aladin. Jeho cílem je zpřesnění výsledků globálního modelu provozovaného na Météo – France v Toulouse. Výsledkem zmíněného předpovědního modelu je deterministická předpověď prognózovaných meteorologických veličin (jako např. celkové srážky, teplota vzduchu ve 2 metrech nad zemí, maximální, resp. minimální teplota atd.), která však ne zcela korektně vystihuje vlastnosti náhodných procesů probíhajících v atmosféře.

Vrátíme-li se však k srážkoodtokovému modelování v povodí, je disertační práce tematicky zaměřena na problematiku řízení vodohospodářských nádrží za povodňových situací v podmínkách neurčitosti, která především pramení z neurčitostí obsažených v předpovídaném vývoji srážek v povodí. V souladu s odkazem na Jana Amose Komenského (Kožík, 1970) bylo postupováno v řešené problematice od řešení jednodušších úloh k těm složitějším. Prvotním cílem tak bylo sestavení řídicího algoritmu jedné vodohospodářské nádrže pro zadaný průběh přítoku vody do nádrže. Za vývojové prostředí bylo zvoleno prostředí Matlab (The MathWorks, 1984-2010), které je vhodné pro modelování nejrůznějších procesů, návrhy algoritmů, simulaci, analýzu a v neposlední řadě pro grafickou prezentaci dat. Výhodou se jevílo také využití specializovaných aplikačních knihoven (tzv. toolboxů) s řadou vestavěných a optimalizovaných funkcí (např. Neural Network Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox aj.). V sestaveném řídicím algoritmu byl za typ regulátoru, v souladu s dosaženými výsledky výzkumu (Drbal, 1999), (Starý, 2001), resp. (Starý, Doležal, 2004) použit fuzzy regulátor proporciálně integrální, tj. PI fuzzy regulátor. Dalším dílčím úkolem bylo ověření náhrady PI fuzzy regulátoru natrénovanou neuronovou sítí a aproximační maticí, stanovení ztráty přesnosti a potřeby strojového času na řešení simulace řízení nádrže za povodňové situace. Po zvládnutí této části práce bylo přikročeno k řešení problematiky stanovení předepsané řídicí veličiny pro deterministickou předpověď přítoku vody do nádrže na předem definovaném intervalu, pro který je maximální odtok z nádrže minimalizován, tj. jednalo se o optimalizační úlohu. Po zvládnutí všech výše uvedených úloh bylo možno přistoupit k řešení problematiky stochastického způsobu řízení nádrže za povodňové situace a k testování zvolených výběrových kritérií pro stochasticky zadaný přítok vody do nádrže. Vlivem

rostoucího počtu řídicích algoritmů nádrže a jejich možného variantního řešení bylo ve vývojovém prostředí Matlab sestaveno zjednodušené uživatelské rozhraní pro uživatelsky komfortní zadávání počátečních podmínek řešených úloh. Tímto byl rozsah této disertační práce vyčerpán.

Z výše uvedeného vyplývá, že ve své podstatě se jednalo o výzkum, který se snažil o rozvoj aplikované hydrologie v oblasti předpovědní, resp. hlásné a varovné služby. V současné době jsou tyto služby provozovány na centrálních předpovědních pracovištích Českého hydrometeorologického ústavu a dále jsou v případě nebezpečí výskytu povodní a během samotných povodní zahušťovány a doplňovány státními podniky Povodí, a to především v závislosti na jejich znalostech kapacit říčních koryt a ohroženosti zastavěného území v říčních nivách.

Dle schváleného Plánu hlavních povodí České republiky, resp. 8 plánů oblastí povodí (Horního a Středního Labe, Horní Vltavy, Berounky, Dolní Vltavy, Ohře, Dolního Labe, Odry, Moravy a Dyje) je možno práci začlenit do rozvoje operativních opatření na omezení negativních účinků povodní.

Teoretická část práce, zabývající se popisem metod řešení použitých v aplikační části, byla uvedena podrobněji za účelem ucelenosti a přehlednosti teoretických základů řešených úloh pro případné čtenáře práce.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Hospodárné využívání vody je jeden ze sociálně-ekonomických ukazatelů vyspělosti naší společnosti. Vzrůstající cena vody (ať už se jedná o užitkovou nebo pitnou vodu) vedla po roce 1989 k hospodárnému využívání této životně důležité komodity a k poklesu potřeby vody na jednoho obyvatele. Prognóza celosvětového vývoje klimatu spolu s efektivnějším využíváním zásobních prostorů vodohospodářských nádrží nás nutí k hledání stále sofistikovanějších způsobů řízení. V současné době se nádrže řídí pomocí dispečerských diagramů, které vyjadřují závislost potřebných objemů vody v nádrži na celkovém odtoku v průběhu roku (suma odběrů a nalepšeného odtoku pod profilem nádrže). Tyto diagramy jsou součástí manipulačního řádu každého vodního díla, a pokud jednotlivá vodní díla spolupracují v systému (soustavě), pak je pro tuto soustavu také zpracován manipulační řád soustavy. Řízení nádrží pomocí dispečerských diagramů k nám začalo pronikat po skončení druhé světové války z ruské literatury (Morozov, 1954). Konstrukce těchto diagramů je detailně popsána v odborné literatuře (Starý, 1990), resp. (Patera, Nacházel, Fošumpaur, 2002).

Manipulační řád je ucelený soubor pravidel, popisující způsob manipulace na vodním díle tak, aby byly respektovány zájmy provozovatelů tohoto vodního díla, popřípadě zájmů dalších organizací či jednotlivců využívajících území podél toku pod profilem nádrže. V souladu s manipulačním řádem jsou dále prováděny takové manipulace na vodním díle, které vedou k vysoké kvalitě vody jak v samotné nádrži, tak v tocích pod nádrží, a v neposlední řadě k zajištění protipovodňové ochrany území pod nádrží. Veškeré manipulace musí být přitom prováděny tak, aby nedošlo k porušení bezpečnosti, stability a spolehlivosti vodního díla.

Z uvedených aspektů vyplývá, že stanovení manipulačních pravidel není jednoduchá úloha, neboť požadavky kladené na vodní dílo jednotlivými uživateli se mohou i navzájem vylučovat. Nalezení korektního řešení vede na vícekritériální optimalizaci dané úlohy, která patří k nejnáročnějším a zároveň méně propracovaným matematickým úlohám. Skladba a obsah manipulačního řádu je dána normou TNV 75 2910 – „Manipulační řády vodních děl na vodních tocích“.

K tomu, abychom mohli správně řídit vodohospodářskou nádrž, je zapotřebí dostatek dat a informací o stavu nádrže (kvalitativní i kvantitativní povahy), přítocích a odtocích vody z nádrže, o stavu povodí a o časovém a prostorovém rozložení srážek, popř. teplot nad povodím. Sběr a přenos těchto informací zajišťuje v rámci řízeného povodí vodohospodářský dispečink.

2.1 VODOHOSPODÁŘSKÝ DISPEČINK

Základní funkce vodohospodářského dispečinku jsou tedy řízení a monitoring. Pro zajištění těchto činností je vysoce efektivní užívat moderní informační a komunikační technologie, což zpravidla přináší vyšší finanční nároky. Proces řízení a monitorování každé soustavy lze dělit na následující fáze:

- sběr hodnot sledovaných veličin a jejich změnu na data v příslušném místě soustavy;
- přenos dat z místa vzniku do vodohospodářského dispečinku;
- zpracování a vyhodnocení dat vodohospodářským dispečinkem;
- předání povelu ke změně stavu řízené soustavy (pokud to situace vyžaduje);
- další operace, nesouvisející s vlastním řízením a monitorováním soustavy.

2.2 OPERATIVNÍ ŘÍZENÍ VODOHOSPODÁŘSKÝCH NÁDRŽÍ A SOUSTAV

Ve vývoji společnosti jsme nespočetněkrát byli svědky vědeckého objevu, který vznikl ze snahy člověka ulehčit si osobní či profesní život. V posledních desetiletích je to zřetelněji patrné díky dynamickému vývoji v oblasti výpočetní techniky a jejímu zpřístupnění široké veřejnosti. Nejen tyto podněty vedly k rozvoji teorie řízení a zejména její oblasti zabývající se řízením systémů v podmínkách neurčitosti. Tato oblast se nazývá inteligentní řízení. Co je to vlastně neurčitost a kde se vzala? V dostupné vědecké literatuře, například (Nacházel, Starý, Zezulák, 2004), je neurčitost popsána jako vlastnost některých procesů a jevů vyznačovat se jejich nahodilostí nebo vágností. Pod pojmem nahodilost si můžeme představit takové procesy ve vodním hospodářství, jako je například přítok vody do nádrže, intenzita srážky a její prostorové či časové rozložení, výška sněhu a rozložení vodní hodnoty sněhu v povodí, tloušťka ledu v nádrži, směr a rychlost větru atd. Pod pojmem vágnost, kterou zavedl poprvé americký filozof Max Black (Black, 1937), si můžeme představit míru, se kterou daný prvek patří nebo nepatří do dané třídy jevu (množiny). Nejen tato filozofická rozvaha přispěla ke vzniku elegantní

teorie fuzzy množin. Za zakladatele uvedené teorie je považován profesor Lotfi Zadeh, který ji takto pojmenoval ve svém článku (Zadeh, 1965).

Nyní se opět vraťme k řízení vodohospodářských nádrží a soustav. Pokud chceme řídit vodohospodářskou nádrž v podmínkách neurčitosti, musíme sestavit řídicí systém. Tím máme na mysli určit všechny řídicí a řízené prvky systému, určit vstupní a výstupní veličiny, jednotlivé vztahy a vazby mezi nimi. K tomu, abychom mohli tento systém řídit v reálném čase, nezbytně potřebujeme v přijatelné době získávat vstupní hodnoty a prostřednictvím přijatelně zjednodušeného matematického modelu stanovit hodnoty výstupních veličin pro zvolené kritérium optimálnosti. Toto kritérium se samozřejmě mění v závislosti na povaze vstupních veličin a stavu řízeného systému. Je zřejmé, že jiné kritérium bude zvoleno v běžných provozních podmínkách (např. zásobení vodárenského distributivního systému vodou – kvalitativní kritérium) a jiné kritérium bude při zaznamenání extrémních přítoků vody do nádrže (kvantitativní kritérium). Nezbytnou součástí řídicího systému je existence zpětné vazby, prostřednictvím které je řídicí algoritmus schopen reagovat na změny vstupních veličin a měnit regulační členy řízeného systému tak, aby docházelo k dodržení řídicí veličiny, stanovené na základě zvoleného kritéria optimálnosti. Prakticky řízení sestaveného systému probíhá tak, že pro predikovaný průběh přítoku vody do systému a stavu systému, pomocí numerické optimalizace matematického modelu vodohospodářské nádrže se nalezne průběh nastavení regulačních členů řízeného systému (např. otevření spodních výpustí), který může nebo nemusí být konstantní na délce předpovědi přítoku vody do nádrže.

Dle podílu obsluhy vodního díla na výsledné manipulaci lze řízení rozčlenit do tří režimů (Vavřín, Zelina, 1977), resp. (Starý, Kožnárek, Šoustal, Šálek, 1987):

- režim řízení on-line,
- režim řízení in-line,
- režim řízení off-line.

3 PRÁCE ZABÝVAJÍCÍ SE PŘÍBUZNOU PROBLEMATIKOU

Problematika řízení vodohospodářských soustav se v našich podmínkách začala řešit v tehdejší státním plánu základního výzkumu v roce 1986. V průběhu výzkumu se ukázalo, že stanovené pětileté období určené pro objasnění této problematiky po metodické i aplikační stránce je nedostatečné. Výsledky výzkumu je možno nalézt ve zprávách (Zeman a kol., 1990a,b), resp. (Zeman a kol., 1994). Problematika operativního řízení byla dále objasňována na katedře hydrotechniky na Stavební fakultě Českého vysokého učení technického (dále jen ČVUT) v Praze. Zde byla problematika operativního řízení vodohospodářských nádrží řešena jak s důrazem na řízení nádrží za povodňových situací, tak na řízení s ohledem na kvalitu vody v nádrži. Z široké škály publikovaných prací zabývajících se kvantitativním přístupem řízení jmenujme například (Fošumpaur, Nacházel, Patera, 2002), (Fošumpaur, Nacházel, Patera, 2003), (Fošumpaurová, 2003) a z prací

zabývajících se kvalitativním přístupem například (Nacházel, Patera, Hejzlar, 1999a,b), (Ružička, Hejzlar, Mikešová, Cole, 2000) či (Nacházel, Fošumpaur, Fošumpaurová, Křemen, 2004a,b). Ve výše zmíněných pracích autorů Fošumpaur, Nacházel, Patera bylo řízení vodohospodářské nádrže popsáno nejen klasickým způsobem, ale i s využitím fuzzy logiky spadající do oboru umělé inteligence. Počátky tohoto relativně nového vědního oboru se datují od roku 1950, kdy významný britský matematik Alan Mathison Turing publikoval úvahy o tom, zda mohou počítače myslet. Do tohoto perspektivního vědního oboru spadá problematika neuronových sítí, expertních a znalostních systémů, genetických algoritmů, fuzzy logiky a řada dalších. Detailní popis jednotlivých metod umělé inteligence lze nalézt v pentalogii (Mařík, Štěpánková, Lažanský a kol., 1993, 1997, 2001, 2003, 2007).

Výzkum zabývající se aplikacemi metod umělé inteligence ve vodním hospodářství probíhal paralelně s již zmíněným výzkumem na pražském ČVUT také na brněnském Vysokém učení technickém (dále jen VUT), Stavební fakultě. Jedná se především o práce (Starý, 1998a,b) zabývající se aplikací umělých neuronových sítí při předpovědi kulminačních průtoků a objemů v povodí Ostravice, resp. při řízení vodohospodářských nádrží. Použití fuzzy regulátoru v řídicím algoritmu vodohospodářské nádrže za povodňové situace bylo prezentováno v práci (Drbal, 1999) a následně provozně ověřeno (Starý, 2001).

Neopomínejme samozřejmě ani vědecké práce zkoumající možnosti využití expertních a znalostních systémů v našich podmínkách ve vodním hospodářství, například (Sedláček, 1997), (Toman, Sedláček, 1996), (Toman, Sedláček, 1997), (Toman, Mikulecký, 2000) atd.

V knižní podobě je pro hlubší seznámení se s metodami umělé inteligence dostupná literatura například (Berka, 1994), (Bíla, 1996), (Vysoký, 1996), (Jura, 2003) či již zmíněná pentalogie. Publikací, která přináší poznatky z aplikací jednotlivých metod umělé inteligence ve vodním hospodářství v ucelené podobě, je (Nacházel, Starý, Zezulák, 2004). Podotkněme zde, že tento publikační počín získal literární cenu profesora A. Danilevského za rok 2004 udělenou výborem České matice technické.

Ze zahraničních prací věnujících se využití metod umělé inteligence v oblasti aplikované hydrologie jmenujme například (Kojiri, Ikebuchi, 1988), (Wang, 1991), (Valdes, Marco, 1995), (Chang, Chen, 1998), (Chang, Chang, 2001), (Ramani, Woo, Faridha, Gopinath, 2007) a (Chiang, Chang, 2009).

Je samozřejmostí, že uvedený výčet prací není kompletní a posloužil jen jako základní zdroj informací pro pochopení řešené problematiky předkládané práce.

4 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Předmětem práce je využití metod umělé inteligence při operativním řízení povodňových průtoků vodohospodářskou nádrží. Simulace chování nádrže při řízení za povodňové situace bude naprogramována ve vývojovém prostředí Matlab (The MathWorks, 1984-2010) a jeho způsob řízení bude možno označit za off-line (Vavřín, Zelina, 1977).

Cílem bude navrhnout řídicí algoritmus odtoku vody z nádrže v průběhu povodňové situace pro deterministickou předpověď přítoku vody do nádrže s využitím metod umělé inteligence. Z metod umělé inteligence budou využity především princip adaptivity, fuzzy modely a umělé neuronové sítě. Po zvládnutí uvedené problematiky bude testován stochastický přístup k řízení nádrže za povodňové situace.

5 POUŽITÉ METODY ŘEŠENÍ

5.1 ZJEDNODUŠUJÍCÍ PŘEDPOKLADY

V předcházejících kapitolách byl již nastíněn současný stav řešené problematiky a také byly podrobněji definovány cíle práce. Při řešení vytyčených cílů bylo použito řady zjednodušujících předpokladů, které pro objektivitu práce předkládáme.

Mluví-li se v této práci o řízení nádrže, myslí se tím řízení vodohospodářské nádrže s jedním přítokem vody do nádrže a s jedním odtokem vody z nádrže, přičemž hydrogram přítoku vody do nádrže byl uvažován v profilu tělesa hráze.

Pro aplikaci zvolených metod řešení byla zvolena Vranovská nádrž na vodním toku Dyje (ř. km 174,450 dle technicko-provozní evidence státního podniku Povodí Moravy), a to především z důvodu snadné dostupnosti nezbytných vstupních dat. Cíleně byl zmenšen retenční objem nádrže, tj. maximální zásobní hladina byla uvažována na kótě nehrazených bezpečnostních přelivů.

Při konstrukci řídicího algoritmu nádrže byl zanedbán vliv ztráty vody výparem z volné hladiny nádrže, ztráta vody průsakem přes těleso hráze, vliv vodárenského odběru pro skupinové vodovody Vranov, Moravské Budějovice, Dukovany a Znojmo na celkovou bilanci povrchové vody a v neposlední řadě byl také zanedbán odtok vody přes malou vodní elektrárnu umístěnou v tělese betonové tížní hráze.

Při numerickém řešení nádrže není také brán v úvahu vliv hydrodynamického postupu povodňové vlny nádrží, případný vliv zanášení konce vzduť nádrže zvýšeným chodem splavenin v průběhu simulované povodňové epizody, resp. vliv nejistot obsažených v samotném hydrogramu přítoku vody do nádrže či použitých matematických postupů.

V této počáteční fázi výzkumu v oblasti stochastického řízení nádrže za povodňové epizody, což je hlavním cílem této práce, bylo ovlivnění výsledku výše zmíněnými nejistotami považováno za minimální.

5.2 NUMERICKÉ ŘEŠENÍ ROVNICE NÁDRŽE

Nechť je dána funkce přítoku vody do nádrže $Q = f_1(t)$ a funkce odtoku vody z nádrže $O = f_2(t)$. Diference mezi těmito dvěma funkcemi udává výslednou retenci R , která je taktéž funkcí času t . Chceme-li vyjádřit objem vody, který přitekne do nádrže za nekonečně malý časový interval dt , můžeme psát

$$dV = (Q(t) - O(H(V(t)), u(t)))dt, \quad (5.2.1)$$

kde $Q(t)$ a $O(H(V(t)), u(t))$ jsou střední hodnoty přítoku a odtoku vody na intervalu dt . Závislost objemu vody na výšce vody v nádrži je dána batygrafickou křivkou nádrže, často označovanou jako základní charakteristika nádrže. Současně je odtok závislý na otevření spodních výpustí $u(t)$. Rovnici (5.2.1) je možné přepsat do základního tvaru obyčejné diferenciální rovnice prvního řádu

$$\frac{dV}{dt} = Q(t) - O(H(V(t)), u(t)). \quad (5.2.2)$$

Pro řešení rovnice (5.2.2) je možno využít širokou škálu více či méně elegantních numerických metod. V této práci byla využita numerická metoda Runge-Kutta 4. řádu (Starý, 1990). Jedná se o jednokrokovou čtyřbodovou numerickou metodu vyznačující se velkou přesností řádu h^4 (Dalík, 1997).

5.3 ZÁKLADY FUZZY MODELOVÁNÍ

5.3.1 Fuzzy množiny

Vznik teorie fuzzy množin

Fuzzy přístup není jen jakýsi nový přístup k vyjádření neurčitosti, který má zajímavé technické aplikace, ale částečně staví na hlavu způsob usuzování, který používá západní civilizace od dob antiky. Od dob Aristotelových se učí logice, ve které tvrzení může být buď pravdivé nebo nepravdivé, třetí možnost neexistuje. Způsob uvažování založený na vícehodnotové logice se zdá cizí evropské tradici vycházející z aristotelovské logiky. Tento způsob však není cizí některým filozofiím orientálním.

První, kdo se začal po filozofické stránce zabývat jiným než pravděpodobnostním pohledem na neurčitost a který zavedl pojem „vagueness“ (vágnost), byl americký filozof Max Black. Blackovy práce v tehdejší době měly však malý ohlas, doba ještě nebyla zralá. Doba uzrála až v roce 1965, kdy publikoval Lotfi Zadeh svůj článek s názvem „Fuzzy Sets“ (Zadeh, 1965), který dal fuzzy množinám jméno a který je všeobecně považován za začátek éry fuzzy množin.

Úvod do teorie fuzzy množin

Definici fuzzy množiny a funkce příslušnosti je možné ve většině zahraničních publikací nalézt v následující formě. Jestliže U je souborem prvků označovaných x ,

potom fuzzy množina Φ v prostoru U je definována jako množina uspořádaných dvojic

$$\Phi = \{(x, \mu_{\Phi}(x)), x \in U\}, \quad (5.3.1.1)$$

kde $\mu_{\Phi}(x)$ označuje funkci příslušnosti fuzzy množiny Φ . Funkce příslušnosti přiřazuje každému prvku x prostoru U stupeň příslušnosti z intervalu $\langle 0,1 \rangle$

$$\mu_{\Phi} : U \rightarrow \langle 0,1 \rangle. \quad (5.3.1.2)$$

Základní typy parametrizovaných funkcí příslušnosti

Z širokého výčtu základních typů parametrizovaných funkcí příslušnosti byly použity v této práci funkce příslušnosti trojúhelníkového a Gaussova typu. Ostatní typy funkcí příslušnosti lze najít v odborné publikaci (Jura, 2003), (Nacházel, Starý, Zezulák, 2004).

Trojúhelníková funkce příslušnosti (triangular) je definována vztahem

$$\text{trian}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}, \quad (5.3.1.3)$$

parametry $\{a, b, c\}$, pro které platí $a < b < c$, vyjadřují souřadnice x vrcholů trojúhelníku.

Gaussova funkce příslušnosti je určena pomocí dvojice parametrů $\{c, \sigma\}$ vztahem

$$\text{gauss}(x; c, \sigma) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2\right], \quad (5.3.1.4)$$

kde parametr c reprezentuje střed funkce příslušnosti a σ určuje její šířku.

Vlastnosti fuzzy množin

Fuzzy množina je tedy jednoznačně určena funkcí příslušnosti. Pro podrobnější vyjádření a popis vlastností funkce příslušnosti je nezbytné uvést běžně užívané názvosloví. K popisu této problematiky bylo využito odborné literatury (Dubois, Prade, 1980a), (Nacházel, Starý, Zezulák, 2004) a (Jura, 2003).

Nosič (support) fuzzy množiny Φ je ostrá množina $\text{support}(\Phi)$ definována jako množina všech prvků $x \in U$, které mají kladnou funkci příslušnosti, tj.

$$\text{support}(\Phi) = \{x, \mu_{\Phi}(x) > 0\}. \quad (5.3.1.5)$$

Jádro (core) fuzzy množiny Φ je definováno jako ostrá množina $\text{core}(\Phi)$ všech prvků, jejichž funkce příslušnosti je rovna 1, tj.

$$\text{core}(\Phi) = \{x, \mu_{\Phi}(x) = 1\}. \quad (5.3.1.6)$$

V případě, kdy ostrá množina $core(\Phi)$ obsahuje pouze jeden prvek, tento bod se nazývá špičková hodnota (peak value).

Fuzzy množina Φ je normální, jestliže ostrá množina $core(\Phi)$ je neprázdná množina, tzn. lze určit prvek $x \in U$, pro který platí $\mu_\Phi(x) = 1$. Opakem je subnormální fuzzy množina.

Bod přesahu (crossover point) fuzzy množiny Φ je bod $x \in U$, ve kterém $\mu_\Phi(x) = 0,5$, tj.

$$crossover(\Phi) = \{x, \mu_\Phi(x) = 0,5\}. \quad (5.3.1.7)$$

Fuzzy množina Φ se nazývá *singleton*, pokud jejím nosičem je bod z univerza U s $\mu_\Phi(x) = 1$.

α -řez (α -cut) fuzzy množiny Φ , kde $\alpha \in \langle 0,1 \rangle$, je ostrá množiny Φ_α definována jako

$$\Phi_\alpha = \{x, \mu_\Phi(x) \geq \alpha\}. \quad (5.3.1.8)$$

Silný α -řez (*strong α -cut*) je definován podobně:

$$\Phi_\alpha = \{x, \mu_\Phi(x) > \alpha\}. \quad (5.3.1.9)$$

Operace s fuzzy množinami

V teorii fuzzy množin nejsou pojmy sjednocení, průnik i doplněk množiny tak jednoduché, jako jsou v klasických množinách. Vyplývá to z faktu, že funkce příslušnosti může nabývat všech hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Zadeh zavádí operaci průniku, sjednocení a doplňku pro všechna $x \in U$ takto:

$$\mu_{\Phi \cap \Gamma} = \min(\mu_\Phi(x), \mu_\Gamma(x)) = \mu_\Phi(x) \wedge \mu_\Gamma(x), \quad (5.3.1.10)$$

$$\mu_{\Phi \cup \Gamma} = \max(\mu_\Phi(x), \mu_\Gamma(x)) = \mu_\Phi(x) \vee \mu_\Gamma(x), \quad (5.3.1.11)$$

$$\mu_{\bar{\Phi}}(x) = 1 - \mu_\Phi(x). \quad (5.3.1.12)$$

Tyto definice jsou jednoduchým rozšířením klasických operací průniku, sjednocení a doplňku.

Fuzzy relace

V případě ostrých množin byla relace definována jako (ostrá) množina uspořádaných dvojic, případně n -tic. Podobně fuzzy relace je fuzzy množina uspořádaných dvojic, případně n -tic. Jsou-li spočetná univerza U a V a funkce $\mu_R : U \times V \rightarrow \langle 0,1 \rangle$, která mapuje kartézský součin na interval $\langle 0,1 \rangle$, potom

$$R = \{((x, y), \mu_R(x, y)) \mid (x, y) \in U \times V\} = \sum_{U \times V} \mu_R(x, y) / (x, y) \quad (5.3.1.13)$$

je binární fuzzy relace na kartézském součinu $U \times V$. Jsou-li univerza nespočetná, je tato binární relace definována jako

$$R = \int_{U \times V} \mu_R(x, y)/(x, y). \quad (5.3.1.14)$$

5.3.2 Fuzzy logika

Fuzzy výroky a jejich skládání

S teorií fuzzy množin úzce souvisí fuzzy logika. Fuzzy logika pracuje se znalostmi, které jsou vyjádřeny v jazykové formě, např.: „odchylka má malou negativní hodnotu“ nebo „odchylka má velkou negativní hodnotu“. Převod těchto znalostí vyjádřených v přirozeném jazyce do jazykové proměnné provedeme ve třech krocích:

Pro označení fyzikální proměnné „odchylka“ zvolme symbol e .

Pro označení jejich hodnot „negativně malá“, resp. „negativně velká“ zvolme označení NS (*negative small*), resp. NB (*negative big*).

Pro vyjádření skutečnosti, že „odchylka je negativně malá“, resp. „odchylka je negativně velká“, volme zápis ve tvaru „ e je NS “, resp. „ e je NB “. V některé odborné literatuře se můžeme setkat s tvarem „ $e = NS$ “, resp. „ $e = NB$ “.

Tyto nejjednodušší fuzzy výroky se nazývají atomické. Jejich význam je definovaný funkcí příslušnosti μ_{NS} , resp. μ_{NB} , které jsou definovány na univerzu U_e . Hodnoty funkcí příslušnosti pak určují stupně, s jakými ostré hodnoty fyzikálních veličin „odchylka“ patří do množiny NS , resp. NB . Je tedy atomický fuzzy výrok vyjádřen pomocí fuzzy množiny.

Atomické výroky spolu mohou být spojeny spojkami *and*, *or*, *not*, vytvářejíce tak složené fuzzy výroky. Těmto spojkám potom odpovídá konjunkce, disjunkce, resp. negace fuzzy množin (Jura, 2003).

Fuzzy implikace

V klasické logice podmíněný výrok typu „*if* (výrok) *then* (výrok)“ představuje *implikaci*. Fuzzy podmíněný výrok typu *if-then* je symbolicky vyjádřen jako

$$\textit{if} (\textit{fuzzy výrok}) \textit{then} (\textit{fuzzy výrok}), \quad (5.3.2.1)$$

kde (*fuzzy výrok*) je buď atomický, nebo složený. Výrok (5.3.2.1) představuje *fuzzy implikaci*. Fuzzy výrok před částí „*then*“ se nazývá *antecedent* (*předpoklad* nebo též *premise*), fuzzy výrok za částí „*then*“ se nazývá *konsekvent* (*závěr*) fuzzy implikace.

V současné době je známa celá řada různých druhů fuzzy implikací. Na nejvýznamnější z nich je možno narazit například v (Tagaki, Sugeno, 1985), (Vysoký, 1996) nebo (Jura, 2003). Zde si názorně uvedeme jednu z nejpoužívanějších implikací, tj. „*implikaci*“ *Mamdani* (z matematického hlediska se nejedná o implikaci, přesto je takto v literatuře nazývána). Využívá $p \rightarrow q = p \textit{ and}$

q , kde pro operaci *and* je použito T -normy *min*. Pro fuzzy relaci R_c , reprezentující tuto fuzzy implikaci a její funkci příslušnosti, tedy platí

$$R_c = ce(\Phi) \cap ce(\Gamma) = \int \min(\mu_\Phi(x), \mu_\Gamma(y)) / (x, y), \quad (5.3.2.2)$$

$$\mu_{R_c}(x, y) = \min(\mu_\Phi(x), \mu_\Gamma(y)).$$

Pokud budeme chtít dále stanovit výsledné rozhodnutí na základě souboru pravidel

$$R_m^{(k)} : \text{if } (x \text{ je } \Phi^{(k)}) \text{ then } (y \text{ je } \Gamma^{(k)}), \quad (5.3.2.3)$$

kde k je číslo pravidla a r je počet pravidel, z nichž každé představuje nejužívanější implikaci typu Mamdani, potom

$$R_m^{(k)} = \int_{U_{\Phi^{(k)}} \times V_{\Gamma^{(k)}}} \min(\mu_{\Phi^{(k)}}(x), \mu_{\Gamma^{(k)}}(y)) / (x, y), \quad (5.3.2.4)$$

s funkcí příslušnosti

$$\mu_{R_m^{(k)}}(x, y) = \min(\mu_{\Phi^{(k)}}(x), \mu_{\Gamma^{(k)}}(y)). \quad (5.3.2.5)$$

Výsledné rozhodnutí tedy vzniká sjednocením všech pravidel celého souboru

$$R_m = \bigcup_{k=1}^r R_m^{(k)}, \text{ kde } k = 1, 2, \dots, r. \quad (5.3.2.6)$$

Vztah (5.3.2.6) představuje výslednou fuzzy relaci s charakteristickou funkcí

$$\mu_{R_m}(x, y) = \max_{\forall k} (\mu_{R_m^{(k)}}(x, y)). \quad (5.3.2.7)$$

5.3.3 Fuzzy systémy

Pod pojmem fuzzy systém rozumíme takový ucelený systém, který pracuje alespoň s jednou proměnnou definovanou na univerzu U_i . Necht' x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ jsou vstupní proměnné, které jsou definovány na univerzech U_i . Necht' je dále každé toto univerzum pokryto systémem fuzzy množin $L_{x_i} = \{\Phi_i^1, \Phi_i^2, \dots, \Phi_i^{n_i}\}$ a necht' je výstupní proměnná definována na univerzu V , které je pokryto systémem fuzzy množin $L_{y_i} = \{\Gamma_i^1, \Gamma_i^2, \dots, \Gamma_i^{m_i}\}$. Pak můžeme rovnici 5.3.2.3 z předcházející kapitoly přepsat do tvaru

$$R^{(k)} : \text{if } (x_1 = \Phi_1^{(k)}) \text{ and } (x_2 = \Phi_2^{(k)}) \text{ and } \dots \text{ and } (x_n = \Phi_n^{(k)}) \text{ then } (y = \Gamma^{(k)}), k = 1, 2, \dots, r, \quad (5.3.3.1)$$

kde k je číslo pravidla a r je počet pravidel. Vstupní vektor $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ je tedy definován na kartézském součinu $U = U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$. Následně pak dojde ke sjednocení všech výstupních fuzzy množin. Takto formalizovaný systém se nazývá *fuzzy systém*.

V praxi však hodnoty vstupních, resp. výstupních proměnných vstupují, resp. vystupují jako ostré množiny do, resp. z takto definovaného systému. V tomto

případě je třeba doplnit fuzzy systém o dva nepostradatelné moduly, a to o modul *fuzzifikace* a modul *defuzzifikace*.

5.4 NEURONOVÉ SÍTĚ

5.4.1 Historie neuronových sítí

Za zakladatele oboru neuronových sítí jsou obecně považováni Warren McCulloch a Walter Pitts, kteří v roce 1943 vytvořili velmi jednoduchý matematický model neuronu, což je základní buňka nervové soustavy. Číselné hodnoty parametrů byly převážně bipolární (tj. z množiny $\{-1, 0, 1\}$). Ve svých vědeckých pracích demonstrovali, že nejjednodušší typy neuronových sítí jsou schopny řešit libovolnou aritmetickou nebo logickou funkci. Ačkoliv nepočítali s možností bezprostředního využití, jejich článek měl velký vliv na ostatní badatele (např. Norberta Wienera či Johna von Neumanna).

5.4.2 Základní pojmy

Umělou neuronovou síť definujeme jako orientovaný graf $G(N, H)$, ve kterém množinu vrcholů N tvoří těla neuronů n_i a množinu hran H tvoří spojnice neuronů $h_{i,j}$ (Nacházel, Starý, Zezulák, 2004). Jednotlivé neurony jsou seskupeny do vrstev. První vrstva je nazývána vstupní vrstvou. Neurony v této vrstvě nevykonávají žádnou funkci, pouze slouží k distribuci vstupních signálů, a tudíž se vstupní vrstva nezapočítává do celkového počtu fyzických vrstev. Neobsahuje-li neuronová síť žádné uzavřené smyčky, nazývá se dopředná nebo též jednosměrná. Protipólem jednosměrné sítě je rekurentní neuronová síť (obsahuje uzavřené smyčky). Rekurentní síť obsahuje paměť, a proto její výstup nezávisí jen na okamžitých hodnotách vstupů, ale i na předešlých hodnotách.

5.4.3 Základní typy přenosových funkcí

Nechť je *lineární přenosová funkce* dána rovnicí

$$a = \text{purelin}(z) = k \cdot z, \quad (5.4.3.1)$$

kde k je směrnice přímky a $z \in R$. Při navrhování topologie užitých neuronových sítí a zvolených typů přenosových funkcí mezi sousedícími vrstvami byla směrnice k lineární přenosové funkce standardně rovna hodnotě 1.

Sigmoidální přenosová funkce je definována vztahem

$$a = \text{logsig}(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}, \quad (5.4.3.2)$$

kde $z \in R$.

Tangenciální přenosová funkce nechť je jednoznačně definována rovnicí tvaru

$$a = \text{tansig}(z) = \tanh(2/(1 + e^{-2 \cdot z}) - 1), \quad (5.4.3.3)$$

kde $z \in R$.

5.4.4 Topologie neuronových sítí

Určení topologie neuronové sítě není jednoduchou záležitostí. Obecně neexistuje jednoznačné pravidlo, jehož dodržением bychom stanovili celkový počet skrytých vrstev a příslušné počty neuronů v jednotlivých skrytých vrstvách. Počet neuronů ve vstupní, resp. výstupní vrstvě je dán počtem vstupních, resp. výstupních proměnných. Elegantním řešením jak stanovit počet skrytých vrstev v umělé neuronové síti je zvolit jednu skrytou vrstvu s malým počtem neuronů, natrénovat ji a stanovit výslednou odchylku zvolené architektury neuronové sítě definovanou vztahem

$$E = \sum_{k=1}^n E_k, \quad (5.4.4.1)$$

kde index $k = 1, 2, \dots, n$, n odpovídá celkovému počtu tréninkových vzorů, E_k je chyba odpovídající k -tému trénovacímu vzoru definovaného rovnicí

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_j (a_j - d_{k,j}), \quad (5.4.4.2)$$

kde index j probíhá přes všechny neurony výstupní vrstvy, a_j je hodnota výstupu z j -tého neuronu a $d_{k,j}$ je j -tý element požadovaného výstupu k -tého trénovacího vzoru. Takto stanovenou výslednou odchylku E natrénované neuronové sítě si uchováme a přidáme do skryté vrstvy další neuron, popř. další skrytou vrstvu a opět se přistoupí k trénování nově vytvořené neuronové sítě. V případě, že výsledná hodnota odchylky E je menší než výsledná odchylka předcházející neuronové sítě, přijme se tato nová topologie za přílehavější. V aplikační části této práce byla použita jednosměrná neuronová síť typu Perceptron (Šíma, Neruda, 1996).

5.4.5 Trénování neuronové sítě

Principem trénování (učení) neuronové sítě je nalezení takové matice vah, popř. matice prahů či parametrů použitých přenosových funkcí, aby výsledná odchylka daná rovnicí (5.4.4.1) byla minimální. K řešení tohoto problému může být použita celá řada optimalizačních úloh. Pro optimalizaci výsledné odchylky se v základním modelu sítě nejčastěji používají gradientní metody. Na začátku učení se všechny hodnoty vah včetně prahů nastaví na malé náhodné hodnoty se střední hodnotou v okolí nuly, např. z heuristicky doporučeného intervalu $\left\langle -\frac{2}{s}, \frac{2}{s} \right\rangle$, kde veličina s je počet vstupů do neuronu, pro které váhy nastavujeme. Poté se předkládají jednotlivé trénovací vzory, pro které se dle rovnice (5.4.4.2) stanoví příslušné chyby, jež se přes všechny vzory sumarizují dle rovnice (5.4.4.1) a na jejím základě dojde k upravení hodnot vah sítě dle vztahu

$$w_{i,j}(k+1) = w_{i,j}(k) + \Delta w_{i,j}, \quad (5.4.5.1)$$

kde změny vah získáme ze vztahu

$$\Delta w_{i,j} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{i,j}}, \quad (5.4.5.2)$$

kde η je parametr učení nabývající hodnot z intervalu $\langle 0,1 \rangle$. Parciální derivace výsledné odchylky podle vah sítě uvedená ve vztahu (5.4.5.2) představuje její minimalizaci pomocí vah gradientní metodou, jejíž odvození lze nalézt například v odborné literatuře (Mařík, Štěpánková, Lažanský, 2004).

5.5 PRINCIP ADAPTIVITY

Ať už si to uvědomujeme nebo neuvědomujeme, je prokázanou skutečností, že je náš způsob života ovlivněn prostředím, ve kterém se nacházíme. Tento fakt lze zobecnit na všechny formy živé hmoty. Případná změna okolního prostředí, v němž se nacházíme, nás bezprostředně nutí ke změně našich dosavadních návyků, procedur, používaných technik či dokonce k radikální změně dosavadního způsobu života. Je zřejmé, že ve výsledku může být náš nový způsob života vzhledem k počátečnímu stavu buďto kvalitativně lepší, nebo kvalitativně horší. Tato schopnost člověka nebo jakékoliv jiné formy živé hmoty přizpůsobit se novým podmínkám, se nazývá adaptivita (někdy také nazývána adaptivnost, adaptace). V odborné literatuře je možno setkat se s definicí, která konstatuje, že život je jen adaptivní proces, a v případě, kdy se vyčerpají všechny adaptivní mechanismy daného organismu, tento organismus umírá (Charvát, 1970), (Kotek, Brůha, Chalupa, Jelínek, 1980). Odvěká snaha člověka zkoumat, učit se či dokonce snaha řídit dynamicky se vyvíjející systémy v přírodě vedla s postupem techniky ke zrodu vědních oborů kybernetiky a teorie řízení.

Procesy dynamického systému vyznačující se schopností adaptace necht' se nazývají adaptivními procesy. Mezi nejdůležitější vlastnosti adaptivního systému patří z teoretického i praktického hlediska jeho stochastická povaha na něm probíhajících procesů. V rámci adaptivního procesu je většinou sledována určitá funkce, resp. soubor funkcí, jejichž změnou je za jakýchkoliv okolností dosaženo vždy rovnovážné polohy – systém pak má tzv. homeostatický charakter. Adaptivní proces, jímž se uplatňuje princip adaptivity, lze tedy charakterizovat jeho stochastickou a homeostatickou povahou, která zajišťuje jeho stabilitu za všech okolností, tzv. ultrastabilitu (Patera, 1978a,b). Za další vlastnost adaptivního systému považujeme rychlost, s jakou dojde ke změně parametrů systému nebo ke změně jeho struktury, případně kombinací těchto změn tak, aby bylo dosaženo opětovné stability systému.

5.6 MODEL NEJISTOT VSTUPNÍCH DAT

Matematické modely, které popisují naše bezprostřední okolí, ve kterém žijeme, se převážně opírají o vstupní data, na základě kterých je možno předpovídat minulé, současné i budoucí stavy prostředí. Ve skutečnosti jsou tato vstupní data zatížena značnou neurčitostí a nahodilostí. Neurčitosti (nejistoty) mohou pramenit z nepřesných měřicích metod, vzorkování dat, interpolací mezi jednotlivými

měřenými veličinami, členěním modelů, volbou jejich parametrů, použitím numerických metod a volbou zjednodušujících předpokladů. Jestliže jsou vstupy těchto matematických modelů zatíženy nejistotou, získané výstupy budou také zatíženy nejistotou (šíření nejistoty modelem). Společně tyto nejistoty ve výstupních veličinách mohou výrazně ovlivnit jejich vypovídací schopnost nebo použitelnost dat. Důvodem může být skutečnost, že míra neurčitosti výstupních dat je těžko kvantifikovatelná.

Data Uncertainty Engine (dále jen DUE) (Brown, Heuvelink, 2006) připouští nejistoty ve vstupních veličinách, aby je bylo možno popsat a stanovit jejich propagaci předpovědními modely. Vzorová data mohou být použita u odborného odhadu, který pomůže k sestavení modelu nejistot vstupních dat softwarem DUE.

Jakýkoliv model nejistot dat může být definován pro jednu nebo více vstupních (závislých i nezávislých) veličin užitím pravděpodobnostního rozdělení, intervalem spolehlivosti nebo souborem možných realizací výstupů, jež jsou závislé na dostupných a odborných znalostech.

Uvedený software byl jedním z výstupů evropského projektu HarmoniRiB (kontrakt EVK1CT 2002-00109), jehož spoluřešitelem byl i státní podnik Povodí Moravy. Dle dostupných informací byl také software využíván na státním podniku Povodí Labe.

6 VÝSLEDKY A ZÁVĚRY DISERTAČNÍ PRÁCE

Úvodem závěrečné kapitoly je možno uvést, že vytyčené cíle v úvodu práce je možno považovat za splněné. Vyvinutý řídicí algoritmus vycházející z principu adaptivity byl sestaven, naprogramován a odladěn ve vývojovém prostředí Matlab. Pro vlastní řízení je využita kombinace nelineární optimalizace a fuzzy regulace. Pomocí optimalizace je hledán průběh řídicí veličiny (řídicího odtoku vody z nádrže). Pro dosažení souladu mezi řídicím a řízeným odtokem vody z nádrže byl využit proporciálně integrální fuzzy regulátor, jehož topologie byla navržena a stabilita při řízení ověřena. Řídicí algoritmus byl použit při simulaci procesu operativního řízení odtoku vody z nádrže systémem off-line za povodňové situace.

Ve snaze urychlit výpočty byla ověřena možnost náhrady fuzzy regulátoru neuro-regulátorem, resp. aproximační maticí. Taktéž byla vyřešena problematika stanovení řídicí veličiny pro deterministicky zadanou předpověď přítoku vody do nádrže. Dostatečný prostor byl věnován efektivnímu způsobu transformace průtoků nádrží.

Inovativní přístup k řízení nádrží v oboru vodního hospodářství byl řešen při konstrukci stochastického řídicího algoritmu nádrže jak pro synteticky vytvořená vstupní data, tak pro reálnou hydrologickou situaci. Na závěr práce bylo vytvořeno zjednodušené uživatelské prostředí ve vývojovém prostředí Matlab, usnadňující práci s vyvinutými algoritmy pro variantní řešení problému.

Je zřejmé, že podmínkou pro dosažení kvalitních výstupů řešené problematiky bylo získání reprezentativních vstupních dat. Simulace operativního řízení odtoku

vody z nádrže byla řešena pro hydrologickou situaci ze srpna 2002 na Vranovské nádrži. Data byla naměřena, zpracována a vyhodnocena Českým hydrometeorologickým ústavem, pobočkou Brno.

V dalším textu jsou uvedeny skutečnosti, které vyžadují podrobnější komentář.

Subjektivně byla navržena struktura fuzzy inferenčního systému (fuzzy regulátoru) v řídicím subjektu regulačního obvodu. Byl nalezen vhodný typ a počet parametrizovaných funkcí příslušnosti a stanoveny délky univerz vstupních, resp. výstupních veličin. Nejvhodnější strukturou se ukázal fuzzy regulátor využívající pěti funkcí příslušnosti, která zajišťovala dostatečnou přesnost simulace řízení nádrže při délce výpočtového kroku 1.0 minuta. Kvalitativně odpovídajících si výsledků bylo dosaženo při využití parametrizovaných funkcí příslušnosti jak trojúhelníkového, tak Gaussova typu. Při konstrukci fuzzy regulátoru byl využit Fuzzy Logic Toolbox.

Alternativní náhrada fuzzy regulátoru byla řešena konstrukcí neuro-regulátoru, resp. aproximační maticí zkonstruovanou z průběhu řídicí plochy fuzzy inferenčního systému. Neuro-regulátor byl tvořen jednosměrnou neuronovou sítí typu Perceptron. Poměrně značné úsilí bylo věnováno návrhu topologie neuronové sítě. Ze široké škály možností byla vybrána neuronová síť s maximálním ohledem na minimální ztrátu přesnosti při řízení. Použitá neuronová síť je jednosměrná, jednovrstvá a s počtem pěti neuronů ve skryté vrstvě. Matice vzorů, použitá při trénování zvolených umělých neuronových sítí, byla následně využita při náhradě fuzzy regulátoru aproximační maticí. Ta lineárně aproximuje průběh řídicí plochy fuzzy inferenčního systému. Použité alternativní náhrady fuzzy inferenčního systému dosahovaly kvalitativně vysoce uspokojivých výsledků. Testování bylo provedeno pro zadaný průběh řídicího odtoku vody z nádrže v sestaveném řídicím algoritmu, tj. jednalo se o jednoduchou úlohu povodňového řízení nádrže.

Problematika stanovení průběhu řídicí veličiny vedla k řešení optimalizační úlohy. Pro nalezení průběhu řídicího odtoku vody z nádrže byla využita rovnoměrná komparativní metoda, kde kritériem optimalizace byla hodnota kulminačního řízeného odtoku vody z nádrže, která byla minimalizována. Pro zjednodušení optimalizační úlohy byl uvažován průběh řídicí veličiny na délce deterministické předpovědi přítoku vody do nádrže konstantní, resp. po částech konstantní. Z porovnání odpovídajících si výsledků simulací řízení bylo možno konstatovat, že v obou případech bylo dosaženo přibližně stejných výsledků kulminačních odtoků vody z nádrže, tj. dosažená odchylka se pohybovala maximálně v řádu jednotek procent. Časově náročnější byly simulace řízení odtoku vody z nádrže pro řídicí veličinu po částech konstantní, kde počet možných průběhů této veličiny narůstal exponenciální řadou v závislosti na zvoleném dělení délky deterministické předpovědi přítoku vody do nádrže a počtu zpřesňujících cyklů výpočtu. Výsledky simulací řízení byly dále rozšířeny o poznatky vyplývající z modifikace řídicího algoritmu nádrže o modul kontroly maximálního přípustného koncového plnění retenčního objemu nádrže. Zakomponováním uvedeného modulu do řídicího

algoritmu došlo k účinnější transformaci povodně, které bylo docíleno vytvořením bezpečnostní rezervy v retenčním prostoru nádrže pro pozdější účinnou transformaci kulminačních průtoků. Výsledky sestaveného adaptivního řídicího algoritmu nádrže jednoznačně prokázaly vhodnost jeho využití pro deterministicky zadávanou předpověď přítoku vody do nádrže. Při aplikaci uvedeného řídicího algoritmu došlo již při délce předpovědi 48 hodin k uřízení celé povodňové epizody. Presentovaný algoritmus řízení nádrže byl schopen pro délku deterministické předpovědi přítoku vody 5 dní uřídit simulovanou povodňovou epizodu téměř na neškodný odtok. Potřeba strojového času u tohoto způsobu řízení nádrže není limitujícím faktorem ani při využití zvoleného vývojového prostředí Matlab, tj. potřeba cca 12 minut pro simulaci řízení nádrže s délkou deterministické předpovědi přítoku vody do nádrže 5 dní.

Dříve zmíněný problém reprezentativnosti vstupních dat se naplno projevil při řešení problematiky stochastického řízení nádrže za povodňové situace. Z důvodu absence modelu vydávajícího stochastické operativní předpovědi odtoků vody z povodí na počátku řešení uvedené problematiky bylo pro generování předpovědi využito softwaru Data Uncertainty Engine. Prostřednictvím volně přístupného softwaru byl vygenerován na podkladu průtokové řady hodinových záznamů okamžitých průtoků v průběhu hydrologické situace ze srpna 2002 v profilu Vranovské nádrže svazek hydrologických předpovědí, který do jisté míry charakterizoval možnou variabilitu předpovědi přítoku vody do nádrže. Následně byla provedena simulace stochastického řízení nádrže. Nerepresentativnost vstupních dat se projevovala výskytem lokálních chyb v řízení nádrže především na sestupných větvích reálného hydrogramu přítoku vody do nádrže, kde variabilita předpovědi neodpovídala skutečnému vývoji srážkové činnosti v povodí řízené nádrže. Další nevýhodou se jevila značná potřeba strojového času na řešení této optimalizační úlohy, přestože stochastické řízení nádrže probíhalo na výkonnější počítačové stanici, tj. cca 2 hodiny 33 minut strojového času pro délku předpovědi 24 hodin a pro 100 stochastických předpovědí přítoku vody do nádrže. Pro délku předpovědi 5 dní lze, na základě zde prezentovaných výsledků, očekávat potřebu strojového času potřebného na simulaci stochastického řízení jedné nádrže ve vývojovém prostředí Matlab cca 20 hodin. I přes tyto nedostatky bylo jednoznačně prokázáno, že sestavený algoritmus stochastického řízení nádrže dosahoval uspokojujících a logických výsledků. Prokázalo se, že software Data Uncertainty Engine je možné využít při generování stochastických předpovědí přítoku vody do nádrže v rámci testování navrženého řídicího algoritmu. Rovněž je možno jej využít při dispečerských hrách, kdy uvedený prostředek, v kombinaci s navrženým řídicím algoritmem s možností vstupu dispečera do řízení, může sloužit jako trenážer umožňující v předstihu získat nezbytné návyky nutné pro kvalitní práci obsluhy řízeného vodního díla – řízení off-line. Odstranění vysoké potřeby strojového času při využití stochastického způsobu řízení je možno docílit naprogramováním, resp. přenesením navrženého algoritmu řízení nádrže do jiného vývojového prostředí.

V uvedené fázi řešení vyvstala otázka, do jaké míry ovlivní změna průběhu směrodatné odchylky vstupních dat v jednotlivých rozhodovacích bodech řízení výsledky stochastického řízení nádrže. Zvolen byl lineární průběh procentuálního nárůstu ovlivnění vstupních dat s maximální hodnotou 20 procent na konci délky předpovědi (rozevření vějíře předpovězených průtoků). Interval maximálních záporných, resp. kladných odchylek mezi hodnotami dosažených kulminačních řízených odtoků vody z nádrže při využití neovlivněných a ovlivněných vstupních dat dosahoval pouze řádu desetin procent původních hodnot. Zaznamenaný minimální vliv byl zapříčiněn využitím adaptivního způsobu řízení nádrže, vlivem vygenerovaných vstupních dat použitým softwarem (předpovědi nejsou jednostranně vychýleny, kolísají kolem střední hodnoty), kolísáním hladiny vody v horních partiích batygrafické křivky nádrže, popř. zaokrouhlovacími chybami, vznikajícími v průběhu numerického řešení úlohy.

Nevýhodu enormní potřeby strojového času na simulaci stochastického řízení nádrže bylo možno eliminovat použitím alternativního přístupu stochastického řízení. Přístup spočíval v možnosti výběru určité realizace ze svazku hydrologických předpovědí přítoku vody do nádrže na základě zvolené pravděpodobnosti překročení průtoku, resp. objem v čase. Testována byla pětice navržených alternativních přístupů stochastického řízení, kde na základě získaných výsledků a zvolené klasifikace bylo možno konstatovat, že nejvhodnější výběrové kritérium bylo založeno na výběru hydrogramu hydrologické předpovědi přítoku vody do nádrže na základě zvolené pravděpodobnosti překročení maximálních průtoků na délce předpovědi. Nutno dodat, že tyto závěry byly získány na podkladě výsledků stochastického řízení nádrže s využitím syntetických vstupních dat.

Uvedené závěry stochastického řízení nádrže byly ověřeny na výsledcích reálné případové studie. Z tohoto důvodu bylo využito dílčího výstupu z disertační práce „Operativní předpovědi odtoku vody z povodí za povodňových situací ze stochasticky popsaných předpovědí srážek“ řešené Ing. Březkovou na Stavební fakultě Vysokého učení technického v Brně na Ústavu vodního hospodářství krajiny. Práce poskytovala stochastické hydrologické předpovědi simulované srážkoodtokovým modelem Hydrog na základě generovaných náhodných polí prostorového rozložení srážek, avšak v dané chvíli pouze pro délku hydrologické předpovědi 24 hodin a korekci řízení 6 hodin. Na základě získaných výsledků použitého způsobu řízení nádrže bylo možno uspokojivě konstatovat, že došlo k odstranění lokálních chyb řízení na sestupných větvích reálného hydrogramu přítoku vody do nádrže, které se projevovaly při využití syntetických vstupních dat. Stochastický způsob řízení nádrže dosahoval kvalitativně lepších transformačních účinků než při deterministickém způsobu řízení nádrže. Stále však přetrvávala nevýhoda spojená s enormní potřebou strojového času na simulaci stochastického řízení nádrže.

Proto bylo analogicky využito dříve zmíněného alternativního způsobu stochastického řízení nádrže využívajícího výstupů ze srážkoodtokového modelu Hydrog na základě generovaných náhodných polí prostorového rozložení srážek

nad povodím řešené nádrže. Z obdržných výsledků bylo možno konstatovat, že při využití stejné klasifikace jako v předcházejícím případě bylo za nejvhodnější výběrové kritérium zvoleno kritérium založené na výběru hydrogramu hydrologické předpovědi přítoku vody do nádrže ze svazku možných realizací na základě zvolené pravděpodobnosti překročení objemů hydrologických předpovědí na intervalu, který byl dán zvolenou délkou předpovědi přítoku vody do nádrže. Zároveň ani jedno z pěti použitých výběrových kritérií nevykazovalo takových výsledků, které by jednoznačně zavrhovaly možnost jeho dalšího použití.

V průběhu řešené problematiky vyplynula řada otevřených problémů a podnětů k řešení v navazujících fázích výzkumu. Předpokládá se řešení problematiky:

- zalgoritmovat určení topologie fuzzy inferenčního systému, resp. neuronové sítě v používaném řídicím algoritmu tak, aby doladění fuzzy inferenčního systému při využití jiné nádrže proběhlo v automatickém, popř. poloautomatickém režimu;
- určení vlivu průběhu řídicí veličiny (řídicí odtok vody z nádrže) po částech konstantního na délce předpovědi na výsledný transformační efekt nádrže;
- otestování vlivu zadání maximálního koncového plnění nádrže na délce předpovědi pro účinnou transformaci kulminačních průtoků nádrží;
- naprogramování stochastického řídicího algoritmu nádrže ve vhodnějším vývojovém prostředí včetně fuzzy inferenčního systému, především s ohledem na minimalizaci strojového času na řešení úlohy pro jeho případné možné využití v praxi;
- detailnější testování stochastického způsobu řízení nádrže využívajícího reprezentativních vstupních dat;
- naprogramování, popř. kompilace fuzzy inferenčního systému, resp. jeho kvalitativně vhodně zvolené náhrady v použitém vývojovém prostředí;
- ověření možnosti využití sofistikovanějších optimalizačních metod při stanovování průběhu řídicího odtoku vody z nádrže;
- pro ověření a případné zobecnění získaných výsledků simulací řízení by bylo nutno provést další simulace řízení na různých nádržích s využitím široké škály reálných hydrologických situací;
- ověření stochastického způsobu řízení vodohospodářské soustavy, která by zahrnovala jak povodí ovlivněné, tak neovlivněné nádržemi, resp. stanovování vlivu transformačních efektů stochasticky řízených nádrží a jejich propagace v podpovodí nádrží.

Uvedené závěry a skutečnosti, které vyplynuly z dílčích výsledků předcházejících kapitol, plynou ze simulace operativního řízení jediné nádrže v průběhu jediné hydrologické situace. Je žádoucí pro další zobecnění závěrů aplikační prostor podstatně rozšířit.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] BERKA, P. *Tvorba znalostních systémů*. 1. vydání. Praha: Vysoká škola ekonomická, 1994. 170 s. ISBN 80-7079-676-6.
- [2] BÍLA, J. *Umělá inteligence a neuronové sítě v aplikacích*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. 115 s.
- [3] BLACK, M. Vagueness. An Exercise in Logical Analysis. *Philosophy of Science*, 1937. vol. 4. no. 4, s. 427-455. ISSN 0031-8248. *International Journal of General Systems*, 1990, vol. 17, no. 2-3, s. 107-128. ISSN 0308-1079.
- [4] BROWN, J.; HEUVELINK, G. *Data Uncertainty Engine, User's manual*. Amsterdam University: Institute of Biodiversity and Ecosystem Dynamics, The Netherlands, 2006. 52 p.
- [5] BŘEZKOVÁ, L.; STARÝ, M.; DOLEŽAL, P. *The real time stochastic flow forecast*. In.: Integrating water systems, Sheffield, 2009. 295-300 p. ISBN 978-0-415-54851-9.
- [6] CHANG, L., Ch.; CHANG, F., J. Intelligent Control for Modelling of Real-Time Reservoir Operation. *Hydrological Processes*. John Wiley, 2001. vol. 15 no. 9. p. 1621-1634 DOI: 10.1002/hyp.226.
- [7] CHANG, F., J.; CHEN, L. Real-Coded Genetic Algorithm for Rule-Based Flood Control Reservoir Management. *Water Research Management*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1998. no. 12. p. 185-198 ISSN 0920-4741.
- [8] CHIANG, Y., M.; CHANG, F., J. Integrating Hydrometeorological Information for Rainfall-Runoff Modelling by Artificial Neural Networks. *Hydrological Processes*. John Wiley, 2009. vol. 23 no. 11. p. 1650-1659 DOI: 10.1002/hyp.7299.
- [9] DALÍK, J. *Numerické metody*. Brno: Nakladatelství VUT, 1997. 145 s. ISBN 80-214-0646-1.
- [10] DRBAL K. *Operativní řízení povodňových průtoků fuzzy regulací v dolní části vodohospodářské soustavy*. Brno, 1999. 96 s., 60 s. příloh. Disertační práce (Ph.D.). Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav vodního hospodářství krajiny.
- [11] DUBOIS, D.; PRADE, H. *Fuzzy Sets and Systems. Theory and Applications*. New York: Academic Press, 1980a. 393 s. ISBN 0122227506.
- [12] FOŠUMPAUR, P.; NACHÁZEL, K.; PATERA, A. Rozhodovací model operativního řízení povodňového odtoku z nádrže. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, vol. 50. no. 1. 2002. 29-49 s. ISSN 0042-790X.
- [13] FOŠUMPAUR, P.; NACHÁZEL, K.; PATERA, A. *System Fuzzy Operating Rules for Flood Control in a Reservoir*. In: 2nd International Symposium on Integrated Water Resources Management. International Commission for Water Resources Systems of the IAHS, South Africa, Western Cape: University of Stellenbosch, 2003.
- [14] FOŠUMPAUROVÁ, P. *Modelování a řízení kvality vody ve vodárenské nádrži*. Praha, 2003. 107 s. Disertační práce (PhD). České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební.
- [15] CHARVÁT, J. *Život, adaptace a stres*. Praha: Avicenum, 1970.
- [16] JURA, P. *Základy fuzzy logiky pro řízení a modelování*. Brno: Nakladatelství VUTIUM, Vysoké učení technické v Brně, 2003. 132 s. ISBN 80-214-2261-0.
- [17] KOJIRI, T.; IKEBUCHI, S. *Real-time Operation of Dam Reservoir by Using Fuzzy Inference Theory*. In: 6th Congress Asian and Pacific Regional Division International Association for Hydraulic Research, Japan, Kyoto, July 1988. p. 437-445.
- [18] KOTEK, Z.; BRŮHA, I.; CHALUPA, V.; JELÍNEK, J. *Adaptivní a učící se systémy*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1980, 372 s.
- [19] KOŽÍK, F. *Světlo v temnotách: bolestný a hrdinský život Jana Amose Komenského*. 4. vydání. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1970. 173 s.
- [20] MAŘÍK, V.; ŠTĚPÁNKOVÁ, O.; LAŽANSKÝ, J. *Umělá inteligence (1)*. 1. vydání. Praha: Academia, 1993. 264 s. ISBN 80-200-0496-3.

- [21] MAŘÍK, V.; ŠTĚPÁNKOVÁ, O.; LAŽANSKÝ, J. *Umělá inteligence (2)*. 1. vydání. Praha: Academia, 1997. 374 s. ISBN 80-200-0504-8.
- [22] MAŘÍK, V.; ŠTĚPÁNKOVÁ, O.; LAŽANSKÝ, J. *Umělá inteligence (3)*. 1. vydání. Praha: Academia, 2001. 328 s. ISBN 80-200-0472-6.
- [23] MAŘÍK, V.; ŠTĚPÁNKOVÁ, O.; LAŽANSKÝ, J. *Umělá inteligence (4)*. 1. vydání. Praha: Academia, 2003. 475 s. ISBN 80-200-1044-0.
- [24] MAŘÍK, V.; ŠTĚPÁNKOVÁ, O.; LAŽANSKÝ, J. *Umělá inteligence (5)*. 1. vydání. Praha: Academia, 2007. 544 s. ISBN 80-200-0502-1.
- [25] MOROZOV, A., A. *Využití vodní energie. I. díl: Základy využití vodní energie*. Překlad z ruského originálu Ispol'zovanie vodnoj energii. Gosud. energ. izdat., Leningrad, Moskva, 1948, SNTL 1954, 251 s.
- [26] NACHÁZEL, K.; FOŠUMPAUR, P.; FOŠUMPAUROVÁ, P.; KŘEMEN, J. Vícekriteriální rozhodovací model pro operativní řízení kvality odebírané vody z vodárenské nádrže – Část 1: Metodické přístupy k návrhu modelu. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2004a. vol. 52, no. 1. 15-23 s. ISSN 0042-790X.
- [27] NACHÁZEL, K.; PATERA, A.; HEJZLAR, J. Fuzzy model řízení jakosti vody v nádrži. I. část – Vývoj problému a metodika výzkumu. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 1999a. vol. 47. no. 3. 153-179 s. ISSN 0042-790X.
- [28] NACHÁZEL, K.; PATERA, A.; HEJZLAR, J. Fuzzy model řízení jakosti vody v nádrži. II. část – Výsledky aplikace. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 1999b. vol. 47. no. 6. 389-404 s. ISSN 0042-790X.
- [29] NACHÁZEL, K.; STARÝ, M.; ZEZULÁK, J. *Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství*. 1. vydání. Praha: Academia, 2004. 319 s. ISBN 80-200-0229-4.
- [30] PATERA, A. Možnosti řešení adaptivních modelů nádrží a vodohospodářských soustav. *Vodohospodářský časopis*, 1978a. vol. 26. no. 2. 144-153 s. ISSN 0042-790X.
- [31] PATERA, A. Řešení adaptivity nádrží v krátkých realizacích hydrologických procesů. *Vodohospodářský časopis*, 1978b. vol. 26. no. 3. 228-244 s. ISSN 0042-790X.
- [32] PATERA, A.; NACHÁZEL, K.; FOŠUMPAUR, P. *Nádrže a vodohospodářské soustavy 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT, listopad 2002. 217 s. ISBN 80-01-02620-5.
- [33] RAMANI, B., V.; WOO, Ch., S.; FARIDHA, O.; GOPINATH, R. *Data Mining in Reservoir Operation and Flood Control Using Artificial Neural Networks*. In: Proceeding of the 2nd International Conference on Informatics, Selangor, Malaysia, November 2007. p. T1-14 – T1-20.
- [34] Povodí Odry, s. p. *Manipulační řád vodohospodářské soustavy povodí Odry - I. a II. část*. Ostrava, říjen 1999 s každoroční aktualizací. 44 s. + přílohy.
- [35] RUŽIČKA, M.; HEJZLAR, J.; MIKEŠOVÁ, P.; COLE, T., M. *2-D Warer Quality Modelling of a Drinking Water Reservoir: Římov Reservoir, Czech Republic*. Proc. 5th International Symposium Systems Analysis and Computing in Water Qaulity Management WATERMATEX 2000, Gent University, Gent, Belgium, září 2000. p. 1.59-1.66.
- [36] SEDLÁČEK, Z. Expertní systémy pro adaptivní řízení v soustavě nádrží. *Stavební obzor*, 1997. vol. 6, no. 1. 19-21 s. ISSN 1210-4027.
- [37] STARÝ, M. *Nádrže a vodohospodářské soustavy*. Brno: VUT FAST, 1990. 165 s. ISBN 80-214-0191-5.
- [38] STARÝ, M. Neuronové sítě a předpověď kulminačních průtoků a objemů povodní v povodí řeky Ostravice – uzávěrový profil Šance. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 1998a. vol. 46. no. 1. 45-61 s. ISSN 0042-790X.
- [39] STARÝ, M. Operativní řízení vodohospodářské soustavy a možnosti využití umělých neuronových sítí. *Operativní hydrologie a řízení vodohospodářských soustav*. Praha, 1998b. 9 s.

- [40] STARÝ, M. *Use of Fuzzy Regulator during Operative Control of Single Reservoir during the Flood Passage*. IXth International Poster Day, Transport of Water, Chemicals and Energy in the System Soil-Crop Canopy Atmosphere, Bratislava, listopad 2001. 7 s.
- [41] STARÝ, M.; BŘEZKOVÁ, L.; JAROŠ, L.; DOLEŽAL, P. *Simulace, predikce a operativní řízení odtoku vody z povodí za povodňových situací v podmínkách neurčitosti*. In.: 70 rokov SvF STU, Zborník príspevkov z medzinárodnej vedeckej konferencie, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta. 2008. 15 s. ISBN 978-80-227-2979-6.
- [42] STARÝ, M.; DOLEŽAL, P. *Operativní řízení odtoku vody Dyjsko-svrateckou soustavou nádrží za průchodu povodně pomocí fuzzy regulátoru*. In.: WORKSHOP 2004, Praha: ČVUT FS, listopad 2004. 54-58 s.
- [43] STARÝ, M.; KOŽNÁREK, Z.; ŠOUSTAL, O.; ŠÁLEK, J. *Automatizované systémy řízení ve vodním hospodářství. Metodické návody do cvičení a diplomového semináře*. Brno: Nakladatelství VUT, srpen 1987. 126 s.
- [44] ŠÍMA, J.; NERUDA, R. *Teoretické otázky neuronových sítí*. Praha: Matfyzpress, 1996. 392 s. ISBN 80-85863-18-9.
- [45] The MathWorks *Matlab: The Language of Technical Computing*. Natick, 1984-2010.
- [46] TNV 75 2910. *Manipulační řády vodních děl na vodních tocích*, Praha: HYDROPROJEKT a. s., Odvětvové normalizační středisko, leden 2004. 17 s.
- [47] TOMAN, M.; MIKULECKÝ, P. *Expertní systémy a jejich perspektiva ve vodním hospodářství*. *Vodní hospodářství*, 2000. no. 4. 72-74 s. ISSN 1211-0760.
- [48] TOMAN, M.; SEDLÁČEK, Z. *Expertní systém a jeho aplikace při řízení složité vodohospodářské soustavy. Prezentace expertního systému pro dispečerské řízení elektráren vodohospodářské soustavy Povodí Odry*. In Workshop 96, Praha: Fakulta stavební ČVUT, Interní grant č. 2027, 1997.
- [49] TOMAN, M.; SEDLÁČEK, Z. *Vývoj expertního systému pro řízení složitých vodohospodářských soustav*. Workshop 95, Praha: Fakulta stavební ČVUT, Interní grant č. 1032, 1996.
- [50] VALDES, B., J.; MARCO, B., J. *Managing Reservoirs for Flood Control*. In: U.S.-Italy Research Workshop on the Hydrometeorology, Impacts and Management of Extreme Floods. Italy, Perugia, 1995. p. 13.
- [51] VAVŘÍN, P.; ZELINA, F. *Automatické řízení počítačem*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977. 223 s.
- [52] VYSOKÝ, P. *Fuzzy řízení*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, únor 1996. 131 s. ISBN 80-01-01429-8.
- [53] WANG, Q., J. *The Genetic Algorithm and its Application to Calibrating Conceptual Rainfall-Runoff Models*. *Water Resources Research*, vol. 27. no. 9. 1991. p. 2467-2471, DOI:10.1029/91WR01305.
- [54] ZADEH, L., A. *Fuzzy Sets*. *Information and Control*. 1965. vol. 8. 338-353 s.
- [55] ZEMAN, V. a kol. *Řízení provozu vodohospodářských soustav*. Závěrečná zpráva resortního výzkumu č. 89, Praha: VÚV TGM, 1994. 105 s. a přílohy.
- [56] ZEMAN, V. a kol. *Teorie řízení vodohospodářských soustav*. Závěrečná zpráva státního plánu základního výzkumu II-5-7/1, sv. 1, Praha: VÚV TGM, 1990a. 76 s. a přílohy.
- [57] ZEMAN, V. a kol. *Teorie řízení vodohospodářských soustav*. Závěrečná zpráva státního plánu základního výzkumu II-5-7/1, sv. 2, Praha: VÚV TGM, 1990b. 108 s. a přílohy.

SEZNAM PUBLIKOVANÝCH PRACÍ AUTORA

- [1] JAROŠ, L. *Studie návrhu rybiho přechodu na toku Loučka*. In.: JUNIORSTAV 2004, 6. oborová konference doktorského studia s mezinárodní účastí, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2004. 1 s. ISBN 80-214-2560-1.
- [2] JAROŠ, L. *Využití fuzzy regulátoru při řízení odtoku vody z izolované nádrže*. In.: Setkání kateder 2005, Praha: České vysoké učení technické v Praze. 2005. 9 s. ISBN 80-01-03326-0.
- [3] JAROŠ, L. *Water outflow control from a reservoir by fuzzy regulator during the flood passage*. In.: Slovak – U.K. young scientists workshop 2005, Bratislava: Slovenská akademie věd. 2005. 1 s.
- [4] JAROŠ, L. *Vliv délky časového kroku výpočtu na přesnost řízeného odtoku vody z nádrže za povodňové situace s využitím fuzzy regulace*. In.: Konferencia mladých odborníkov - hydrologov, vodohospodárov, meteorologov a klimatológov, Bratislava: SHMÚ, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava 37. 2005. 11 s. ISBN 80-88907-53-5.
- [5] JAROŠ, L. *Ochrana krajiny před povodňovými průtoky*. In.: Venkovská krajina 2005, 3. ročník mezinárodní mezioborové konference, Brno: Základní organizace Českého svazu ochránců přírody Veronica. 2005. 4 s. ISBN 80-239-4963-2.
- [6] JAROŠ, L. *Řízení odtoku z nádrže za průchodu povodně*. In.: JUNIORSTAV 2005, 7. oborová konference doktorského studia s mezinárodní účastí, Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2005. 6 s. ISBN 80-214-2830-9.
- [7] STARÝ, M.; JAROŠ, L. *Operativní řízení odtoku vody v dolních částech povodí za povodňových situací s využitím fuzzy-regulátorů*. Dílčí výstup projektu CIDEAS za rok 2005, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2006. 32 s.
- [8] JAROŠ, L.; STARÝ, M. *Vývoj regulátoru řízení odtoku vody z povodí za povodňové situace*. Dílčí výstup projektu CIDEAS za rok 2006, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2006. 23 s.
- [9] JAROŠ, L. *Stanovení odtoku vody z nádrže pomocí genetických algoritmů*. In.: JUNIORSTAV 2006, 8. oborová konference doktorského studia s mezinárodní účastí, Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2005. 6 s. ISBN 80-214-3111-3.
- [10] JAROŠ, L. *Aproximace fuzzy inferenčního systému regulátoru odtoku vody z nádrže neuronovou sítí*. In.: Konferencia mladých odborníkov 2006, Bratislava: SHMÚ, Jeséniova 17, 833 15 Bratislava 37. 2005. 7 s. ISBN 80-88907-56-X.
- [11] JAROŠ, L. *Vliv zadání parametrů fuzzy regulátoru na dosažené výsledky při řízení toku vody nádrží za povodňové situace*. In.: Venkovská krajina 2006, Brno: Základní organizace Českého svazu ochránců přírody Veronica. 2006. 4 s. ISBN 80-239-7166-2.
- [12] JAROŠ, L.; STARÝ, M. *Náhrada fuzzy-regulátoru neuro-regulátorem a aproximační maticí v algoritmech určených pro operativní řízení odtoku vody z povodí*. In.: Pravděpodobnost porušování konstrukcí 2006, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2006. 8 s. ISBN 80-214-3251-9.
- [13] STARÝ, M.; DOLEŽAL, P.; JAROŠ, L. *Algorithms for Operative Control of the Flood Passage*. In.: 23rd Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Belgrade: Republic Hydrometeorological Service of Serbia. 2006. 10 s. ISBN 86-80851-07-8.
- [14] JAROŠ, L.; STARÝ, M. *Using of Genetic Algorithms for Assessment of the Directing Discharge of Water from Reservoir*. In.: Junior Scientist Conference 2006, Vienna: Vienna University of Technology. 2006. 2 p. ISBN 3-902463-05-8.
- [15] STARÝ, M.; DOLEŽAL, P.; JAROŠ, L. *Operative Control of Outflows from System of Reservoirs during the Flood Passage and Use of Artificial Intelligence Methods*. In.: 3rd International Trade Fair and Congress for Flood Prevention, Consequences

- of Climatic Change and Disaster Management, Hamburg: KönigsDruck. 2006. 2 s. DE 811214125.
- [16] JAROŠ, L.; STARÝ, M. *Operativní řízení odtoku vody z povodí za povodňových situací v podmínkách neurčitosti*. In.: Rizika ve vodním hospodářství, Brno: Akademické nakladatelství CERM. 2007. 8 s. ISBN 978-80-86433-43-1.
- [17] JAROŠ, L.; TOMAŇOVÁ, R. *Výsledky prognózní činnosti státního podniku Povodí Odry v průběhu povodňové epizody ze září 2007*. In.: Vodní toky 2007, Hradec Králové: Povodí Labe, státní podnik. 2007. 6 s. ISBN 978-80-87154-03-8.
- [18] TUREČEK, B.; PAVLAS, L.; JAROŠ, L. *Vliv vodohospodářské soustavy povodí Odry na dodávku vody v průběhu hydrologického sucha 2007*. In.: XXXI. Přehradní dny 2008, Brno: Česká vědeckotechnická vodohospodářská společnost, Český přehradní výbor. 2008. 12 s. ISBN 978-80-02-02017-2.
- [19] STARÝ, M.; BŘEZKOVÁ, L.; JAROŠ, L.; DOLEŽAL, P. *Simulace, predikce a operativní řízení odtoku vody z povodí za povodňových situací v podmínkách neurčitosti*. In.: 70 roků SvF STU, Zborník príspevkov z medzinárodnej vedeckej konferencie, Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta. 2008. 15 s. ISBN 978-80-227-2979-6.

ŽIVOTOPIS AUTORA

Ing. Lubomír Jaroš

Narozen: 1.11.1979 v Novém Městě na Moravě,
okres Žďár nad Sázavou

Bydliště: Letní 480/1, 736 01 Havířov

Kontakt: ingjaros@email.cz

Vzdělání

- 1994-1998 - Gymnázium Vincence Makovského Nové Město na Moravě.
- 1998-2003 - *Magisterské studium* (Ing.), Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, obor Vodní hospodářství a vodní stavby.
Diplomová práce: Návrh studie rybiho přechodu na toku Loučka
Vedoucí diplomové práce: Ing. Rudolf Milerski, CSc.
- 2003-2006 - *Doktorské studium*, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny, obor Vodní hospodářství a vodní stavby.
Datum státní doktorské zkoušky: 13.5.2005
Disertační práce: Použití metod umělé inteligence při operativním řízení povodňových průtoků nádrží
Školitel: Prof. Ing. Miloš Starý, CSc.

Řešené projekty (odpovědný řešitel, resp. spoluřešitel)

- 2004-2006 - Použití metod umělé inteligence při operativním řízení povodňových průtoků nádržemi, GAČR 103/04/0352, spoluřešitel.
- 2004-2006 - CIDEAS - Centrum integrovaného navrhování progresivních stavebních konstrukcí, MŠMT, 1M6840770001, spoluřešitel.
- 2006-2006 - Řízení odtoku vody z nádrže za povodňových situací pomocí metod umělé inteligence, FRVŠ, 1921/2006, odpovědný řešitel.

Zaměstnání

- 2004-2006 - Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, CIDEAS – Centrum integrovaného navrhování progresivních konstrukcí.
- 2007 až dosud – Povodí Odry, státní podnik.

Jazykové znalosti

- angličtina: pokročilá

ABSTRACT

Operative control of water discharge from a reservoir enables efficient use of storage volumes of existing reservoirs in order to get maximum of their transformation effect. To arrange efficient reservoir control it is necessary to have information on the river basin above and below the reservoir, on the condition of the controlled reservoir itself and the expected future development of rainfall at the time and space. Quantities collection characterizing the condition and development of the river basin, or water management reservoir, is realized by means of monitoring network, the necessary quantities being transferred to the central controlling workplace – water management dispatching department. In a particular situation, this network can – to a certain extent – provide a feedback to the controlled water management reservoir, or systems.

The work first aimed at forming and debugging control algorithm of one reservoir in Matlab development environment for deterministically entered forecast of water inflow to the reservoir. Subsequently, within the framework of formed and debugged control algorithm, the possibility of substituting the part of controlling subject in the controlled reservoir control system was tested with the methods of artificial intelligence. Primarily, proportionally integral fuzzy regulator was used and it was gradually replaced by neuro-regulator (i.e. rehearsed feedforward artificial neural network) and approximative matrix (matrix of patterns of rehearsed feedforward artificial neural network). At individual regulators, optimum structure was searched by means of subjective optimization. Needs of machine time for solving individual tasks were monitored together with good results of controlled water discharge from the reservoir depending on the size of calculating solution step.

Determinist forecast of water inflow into reservoir is a simplifying basis for its control, though, in present-day practice, the only possible approach. For the usage of prognoses entered not deterministic, but stochastic would be necessary to employ a fan of possible courses of forecast inflows into the reservoir. In an effort to exploit the stated way of entered forecast inflows in the controlling algorithm of the reservoir the file of these flow hydrogram realizations was generated on the basis of hydrogram of real flood episode by means of Data Uncertainty Engine software. Partial fragments of these hydrograms in individual decision-making points of reservoir control represented the variability of forecast of inflow of water into the reservoir. The suitable selection criteria has been chosen, on whose basis was possible to select such hydrogram, which would correspond to the chosen probability of flow transcendence. The achieved results of reservoir control (maximum culminations of total discharge of water from the reservoir) were compared for deterministic and stochastic forecast of water inflow. The disadvantage of stochastic reservoir control simulation was too high demand on machine time for solving. Therefore alternative approach of stochastic solution of reservoir was solved subsequently; it was based on selecting one inflow realization from the file of prognosticated inflows of water into the reservoir (inflow forecast fan) on the basis of the previously tested selective criteria. This problem was solved variably; the task was to determine the optimal selection criterion based on the probability of exceeding the predicted inflows into the reservoir, or the probability of exceeding the predicted flows. Determined was the resulting loss of accuracy while solving the optimization task.