VLIV DÉLKY ČASOVÉHO KROKU VÝPOČTU NA PŘESNOST ŘÍZENÉHO ODTOKU VODY Z NÁDRŽE ZA POVODŇOVÉ SITUACE S VYUŽITÍM FUZZY REGULACE

Lubomír Jaroš

Článek se zabývá řízením odtoku vody z nádrže za povodňových situací a analýzou získaných řešení při simulaci odtoku vody z nádrže s využitím fuzzy regulátoru jako řídícího subjektu. Byl sestaven matematický a numerický model nádrže, který byl programován v prostředí Matlab 6.5. Pro řešení základní rovnice nádrže byla zvolena numerická metoda Runge-Kutta 4. řádu. Dále byly provedeny dvě varianty řízení odtoku vody z nádrže, a to s konstantním řídícím odtokem 50,0 m^3s^{-1} a s proměnným řídícím odtokem vody z nádrže. Pro každou z těchto dvou variant byly zvoleny různé délky časového kroku výpočtu a výsledky byly analyzovány. Byl tím ověřen předpoklad citlivosti numerické metody na zvolenou délku časového kroku řešení.

Klíčová slova: řízený odtok, fuzzy regulátor, Matlab, povodňová situace, Runge-Kutta 4. řádu, nádrž

Accuracy of a Solution on Length of Time Step for Control Discharge of Water from Reservoir during a Flood Passage Using a Fuzzy Regulation: *The main content of this contribution is controlling of water discharge from the reservoir during flood passage and solution analysis from simulation of water discharge from reservoir using the fuzzy regulator as control subject. The mathematic and the numerical model were built up. This model was written in the Matlab 6.5. The Runge-Kutta method of the 4^{th} order was chosen for solution. Two simulations were solved: with constant value of water discharge (50,0 m^3s^{-1}) and with variable water discharge from the reservoir. The various length of time steps were chosen for these simulations and results were discussed. The sensitivity of the numerical method to length of time step was demonstrated.*

Key words: control, operational, fuzzy regulator, Matlab, flood, Runge-Kutta 4^{th} order, reservoir

---

ÚVOD

Stejně jako v řadě evropských zemí, které byly v průběhu devadesátých let postiženy rozsáhlými povodněmi, vyvolaly katastrofální povodně v roce 1997 a 2002 pozitivní obrat ve vnímání významu povodňové ochrany v České republice. Tento posun byl navíc umocněn značným rozsahem finančních prostředků, které bylo nutno vynaložit, především z veřejných rozpočtů, k odstranění škod způsobených povodněmi. Účinné řízení odtoku vody nádrží výrazně přispívá k ochraně území pod nádrží před povodňovými průtoky. Ochrana před povodněmi není nikdy absolutní. Lze však částečně snížit povodňové kulminační průtoky a příznivěji ovlivnit časový průběh povodní. Proto je snaha přistoupit k takovým opatřením, kterými bychom byly schopni snížit negativní účinky povodní na co nejnižší únosnou mez. Tato opatření můžeme rozdělit do dvou hlavních celků:

1. Strukturální opatření.

Mezi strukturální opatření můžeme zařadit takovou činnost, jejíž výsledný efekt vede ke snížení hydrogramu povodně, jako například snížení rychlosti odtoku vody z povodí (změna typu pokryvu, realizace zasakovacích pásů, svodných příkopů a jejich napojení na suché nádrže), výstavba poldrů, řízená inundace atd. Tyto opatření jsou převážně velmi finančně nákladné.

2. Nestrukturální opatření.

Jedná se o varovné protipovodňové systémy a efektivní operativní řízení odtoku vody z nádrží. Jedná se především o operativní řízení odtoku vody z povodí jednou a více nádržemi. Cílem je snaha o snížení kulminačních průtoků hydrogramu povodňové vlny na přijatelnou úroveň. Realizace těchto opatření jsou podstatně méně finančně náročné, neboť se jedná o zdokonalení chování již existující systémů.

Příspěvek se zabývá stanovením řízeného odtoku vody z nádrže pomocí fuzzy regulace pro předepsaný průběh řídící veličiny za povodňové situace a stanovením intervalů odchylek pro zvolenou délku časového kroku výpočtu. Jedná se o řízení in-line, bez přímé účasti člověka na řízení.

METODA

Matematický model toku vody nádrží

Základním podkladem pro řešení i provozování nádrží jsou údaje o přítoku vody do nádrže Q(t) a odtoku vody z nádrže O(t), které jsou funkcí času. Obě funkce jsou natolik složité, (zejména Q(t)), že je problematické je analyticky popsat. Pro jejich interpretaci volíme tabelární nebo grafické zpracování, kde mohou nabývat diskrétních nebo spojitých hodnot závislých na čase. Okamžitý vztah mezi Q(t), O(t) a V(t) popisuje základní rovnice nádrže

$$Q(t) - O(V(t)) = \frac{dV}{dt}. \qquad (1)$$

Numerický model toku vody nádrží

Pro numerický model byla zvolena metoda Runge-Kutta 4. řádu, která poměrně vysokou přesností, při hledání funkce $y(x)$ na intervalu $\langle a,b \rangle$, která je řešením obyčejné diferenciální rovnice prvního řádu

$$y' = f(x, y) \qquad (2)$$

s počáteční podmínkou $y(a) = c$. Hodnota proměnné x udává zpravidla buďto časový okamžik anebo prostorovou souřadnici a diferenciální rovnice vyjadřuje fyzikální zákon, podle kterého se studovaný proces řídí (Dalík, 1997).

V našem případě budeme touto numerickou metodou řešit základní rovnici nádrže, kde hledané řešení bude představovat průběh funkce $H(V(t))$. Základní rovnici nádrže můžeme přepsat tedy do tvaru

$$V'(t) = \frac{dV(t)}{dt} = Q(t) - O(H(V(t)), u), \qquad (3)$$

kde u je otevření spodních výpustí a je na časovém úseku dt konstantní. Rovnici (3) můžeme psát obecně ve tvaru

$$\frac{dV(t)}{dt} = f(t, H(V(t))), \qquad (4)$$

kde $f(t, H(V(t)))$ je konečně diferencovatelná. Označme v dalším textu $V(t)$ symbolem V_0 (objem vody v nádrži na začátku zvoleného časového intervalu) a $V(t + \Delta t)$ symbolem V_1 (objem vody v nádrži na konci zvoleného časového intervalu). Dále je uvedeno řešení základní rovnice nádrže metodou Runge-Kutta 4. řádu pro diferenciální rovnici 1. řádu (Starý, 1990)

$$V_1 - V_0 = \frac{K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4}{6}, \qquad (5)$$

kde

$$\begin{aligned} K_1 &= \Delta t \cdot f(t, H(V(t))) \\ K_2 &= \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, H\left(V(t) + \frac{K_1}{2}\right)\right) \\ K_3 &= \Delta t \cdot f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, H\left(V(t) + \frac{K_2}{2}\right)\right) \\ K_4 &= \Delta t \cdot f(t + \Delta t, H(V(t) + K_3)) \end{aligned} \qquad (6)$$

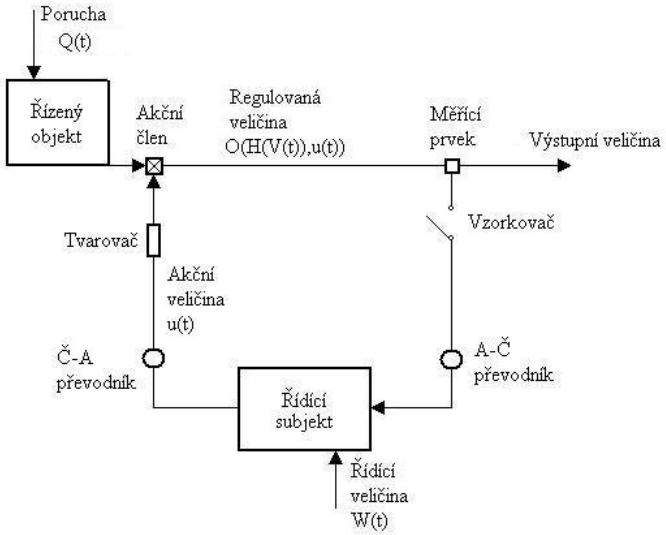
Užití metody Runge-Kutta 4. řádu pro aproximaci je zatíženo chybou $\theta(\Delta t^5)$. Proto má široké užití.

Regulační obvod

Schéma regulačního obvodu použitého pro řízení odtoku vody z nádrže je znázorněno na obr. 1. Úkolem regulátoru je udržovat hodnotu řízené veličiny $O(t)$ na předepsané hodnotě řídící veličiny $W(t)$. Jejich rozdíl vytváří regulační odchylku (Nacházel, Starý, Zezulák, 2004)

$$e(t) = W(t) - O(t), \qquad (7)$$

Z níž se určuje v regulátoru hodnota akčního zásahu $u(t)$ v čase t.



Obr. 1 Schéma regulačního obvodu.

Fig. 1 The control system figure.

Dynamické chování celého regulačního obvodu, kterým regulátor reaguje na změnu regulační odchylky, nazýváme regulačním pochodem. Obecně ho lze tedy vyjádřit příslušnými diferenciálními rovnicemi popisujícími vztah regulované veličiny a řídící veličiny nebo regulované veličiny a poruchy. Tyto vlastnosti závisejí na dynamických vlastnostech jednotlivých členů regulačního obvodu. Stabilita je jednou ze základních podmínek regulačního obvodu. Regulační obvod je stabilní, když při vzniku regulační odchylky dosáhne regulovaná (řízená) veličina v relativně krátkém čase hodnoty předepsané veličinou řídící. Regulační obvod musí být ve všech případech stabilní. Pro posouzení této stability byla odvozena řada kritérií, např. Hurwitzovo, Routh-Schuzovo, Nyquistovo a další.

Podmínka stability regulačního obvodu je podmínkou nutnou, ne však postačující. Podstatné je chování obvodu v přechodovém ději, který se obvykle oceňuje podle průběhu regulované veličiny při jednotkové skokové změně veličiny vstupní, např. poruchové. Je to jeden z nejméně příznivých jevů, které musí obvod zvládnout. Kvalitu regulačního jevu proto oceňujeme podle přechodové charakteristiky a oceňujeme ji dobou odezvy, za kterou je dosaženo předepsané odchylky (v procentech ustálené veličiny, např. 5%, 2%, 1%) a charakterem přechodového děje, jenž může být buď aperiodický, nebo kmitavý. Požadavky na kvalitu regulačního pochodu mohou být různé a protichůdné. Pak je nutné volit určitý kompromis.

Do regulovaného procesu je třeba zasahovat tak, aby se regulační odchylka neustále udržovala na své minimální, popř. nulové, hodnotě. Proto jsou důležité vztahy mezi akční veličinou a aktuální hodnotou odchylky. Podle nich se zpravidla rozlišují tři základní typy regulátorů (Kubík, Kotek, Strejc, Štěcha, 1982), (Nacházel, Starý, Zezulák, 2004):

- proporcionální regulátor (P), derivační regulátor (D), integrační regulátor (I).

Další typy pak získáme jejich kombinací:

- proporcionálně-derivační (PD), proporcionálně-integrační (PI), proporcionálně-integračně-derivační (PID).

V aplikaci byl použit proporcionálně-integrační regulátor (PI), který se zpravidla popisuje rovnicí

$$\Delta u_k = K_P \Delta e_k + K_I e_k , \qquad (8)$$

kde K_P je proporcionální konstanta, K_I je integrační konstanta a k představuje chronologickou posloupnost sledovaného období, kde $k = 1,2,..,n$.

Výsledný akční zásah v diskrétním kroku k lze zapsat ve tvaru

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k . \qquad (9)$$

Popisující rovnice (8) proporcionálně-integrační regulátor (PI) byla nahrazena pravidly obsaženými v bázi pravidel ve tvaru

$$IF \quad e = \langle hodnota \rangle \quad AND \quad \Delta e = \langle hodnota \rangle \quad THEN \quad \Delta u = \langle hodnota \rangle \qquad (10)$$

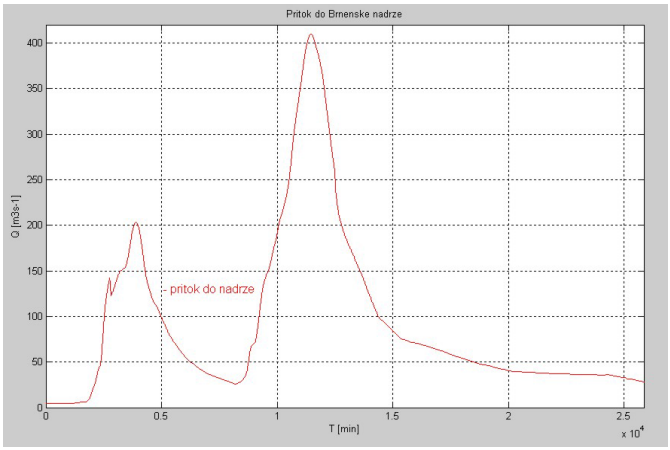
kde značí: e - regulační odchylku mezi řídicím a řízeným odtokem, Δe- změnu regulační odchylky, Δu - změnu akčního zásahu (např. změna otevření spodních výpustí). Nově určené změny akčního zásahu jsou tedy dány součtem akčního zásahu v předchozím časovém kroku a změny Δu. Je použit fuzzy inferenční systém Mamdani. Defuzzifikace je prováděna metodou středu plochy.

APLIKACE

Numerický model

Řešení využívá teorie fuzzy regulace pro řízení provozu nádrže za průchodu povodně. Na samostatné nádrži byl ve vývojovém prostředí Matlab 6.5 naprogramován numerický model průchodu povodňové vlny nádrží. Model využívá fuzzy regulátor. Ten je schopen (při zadaném spojitém časovém průběhu veličiny řídící a spojitě se měnícím stavu nádrže) po zadaných časových krocích postupně určovat hodnoty změny veličiny akční, kterou představuje změnu nastavení spodních výpustí.

Modelovaná nádrž je fiktivní, podklady pro sestavení čáry zatopených ploch a čáry zatopených objemů byly převzaty z Brněnské nádrže (některé základní údaje Brněnské nádrže byly pozměněny, jedná se především o nahrazení hrazených přelivů pevnými přelivy, spodní výpusť se uvažuje pouze jedna a nebere se v potaz odtok vody přes elektrárnu). Vstupní veličinou je přítok vody do nádrže, který byl zadán hydrogramem. Hydrogram (viz obr. 2) je charakteristický dvěmi povodňovými vlnami.



Obr. 2 Hydrogram přítoku vody do namodelované nádrže.

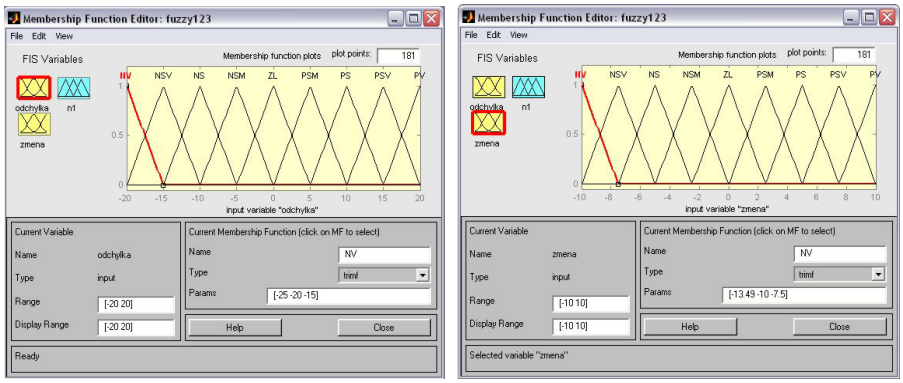
Fig. 2 Inflow hydrograph into the reservoir.

Délka časového kroku byla v počátečním stadiu výpočtu zvolena na hodnotu 1 minuta, a to především s ohledem na délku výpočtu. Později byly výsledky řešení obohaceny o získané výstupní hodnoty pro délky časových kroků 0,25; 0,5; 3,0; 5,0 a 10,0 minut.

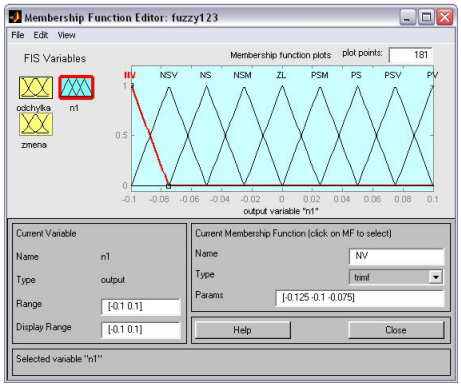
Na výstupu regulátoru (po provedení procesu fuzzifikace – inferenční mechanizmus – defuzzifikace) obdržíme pouze změnu akčního zásahu. Celkový akční zásah pak určíme jako $u_k = u_{k-1} + \Delta u_k$. Tento

vztah je realizován mimo fuzzy model, a to pomocí sumátoru, takže se v pravidlech neprojeví. Pro každou veličinu, ať už vstupní nebo výstupní, bylo zvoleno devět funkcí příslušnosti (viz obr. 3), ve kterých značí příslušný symbol odpovídající vágní ohodnocení: NV-záporná velká, NSV-záporná středně velká, NS-záporná střední, NSM-záporná středně malá, ZL-nulová, PSM-kladná středně malá, PS-kladná střední, PSV-kladná středně velká, PV-kladná velká. Z funkcí příslušnosti je sestavena matice, která se nazývá báze pravidel fuzzy regulátoru (viz tab. 1). První vodorovný řádek odpovídá vágnímu ohodnocení regulační odchylky, první sloupec odpovídá vágnímu ohodnocení změny regulační odchylky. Odpovídající kombinace příslušného řádku a sloupce odpovídá přiřazenému vágnímu ohodnocení změny otevření spodní výpusti.

a) b)



c)



Obr. 3 Funkce příslušnosti vstupních hodnot (viz. a) a b)) a výstupní hodnoty (viz. c)) fuzzy regulátoru.

Fig. 3 Membership functions of input quantities (viz. a) a b)) and output quantity(viz. c)) of the fuzzy regulator.

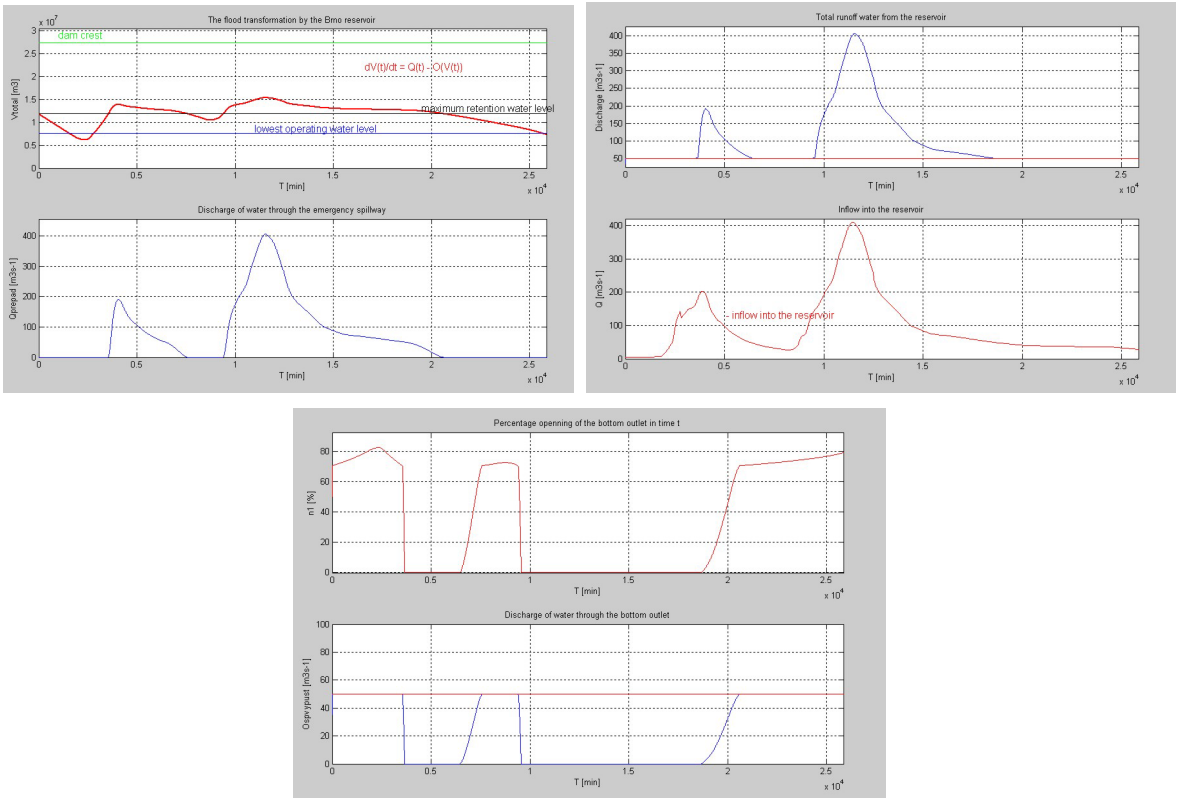
Tab. 1 Tabulka báze pravidel.

Tab. 1 The base rules table.

e\Δe	NV	NSV	NS	NSM	ZL	PSM	PS	PSV	PV
NV	PV	PV	PV	PV	PV	PSV	PS	PSM	ZL
NSV	PV	PV	PV	PV	PSV	PS	PSM	ZL	NSM
NS	PV	PV	PV	PSV	PS	PSM	ZL	NSM	NS
NSM	PV	PV	PSV	PS	PSM	ZL	NSM	NS	NSV
ZL	PV	PSV	PS	PSM	ZL	NSM	NS	NSV	NV
PSM	PSV	PS	PSM	ZL	NSM	NS	NSV	NV	NV
PS	PS	PSM	ZL	NSM	NS	NSV	NV	NV	NV
PSV	PSM	ZL	NSM	NS	NSV	NV	NV	NV	NV
PV	ZL	NSM	NS	NSV	NV	NV	NV	NV	NV

Realizované simulace řízení odtoku vody z nádrže

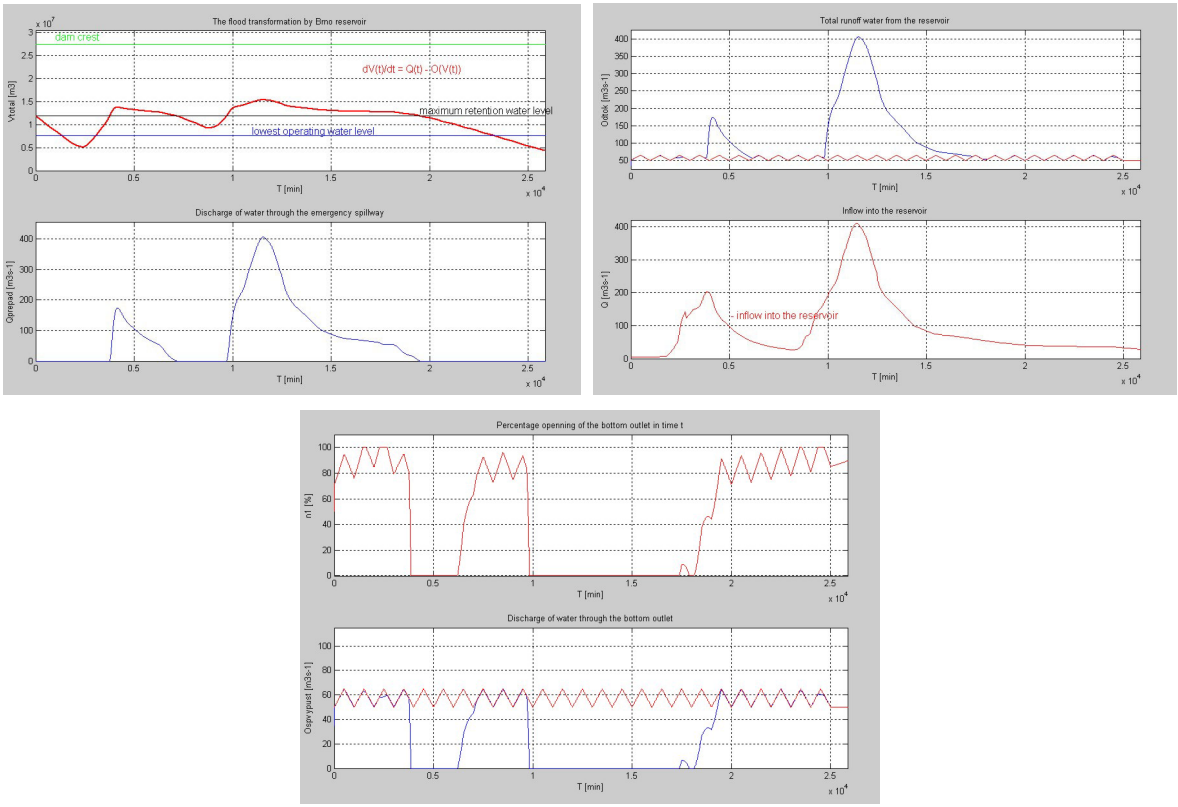
Na numerickém modelu byly doposud provedeny dvě simulace odtoku vody z namodelované nádrže. Byly zvoleny dva průběhy řízení odtoku vody z nádrže, a to v první variantě konstantní řízený odtok 50,0 m^3s^{-1} a v druhé variantě řízený odtok vody proměnný v čase t. Pro obě varianty byly provedeny výpočty s délkou časových kroků 0,25; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0 a 10,0 minut. Výsledky jsou graficky znázorněné na obr. 4 pro první variantu řešení s $\Delta t = 0{,}5$ minut a na obr. 5 pro druhou variantu řešení také s $\Delta t = 0{,}5$ minut.



Obr. 4 Grafické znázornění výsledků pro řízený odtok 50,0 m^3s^{-1}.

Fig. 4 Graphical outputs for controlling discharge 50,0 m^3s^{-1}.

Na obrázcích 4 a 5 je vždy jako první graficky znázorněna závislost stavu objemu v namodelované nádrži na čase t. Pod tímto grafem se nachází hydrogram přítoku vody do nádrže, který je zadán 432 záznamy okamžitých hodinových průtoků ze srpna 2002. Na dalším grafu je znázorněn celkový řízený odtok vody z nádrže, na kterém si můžeme povšimnout, že tam kde je to možné se nám fuzzy regulátor snaží dodržet námi požadovaný řízený odtok z nádrže, ať už jde o první nebo druhou variantu řešení. Jen v případech, kdy hladiny vody v nádrži dostoupí kóty bezpečnostního přelivu a začne přes přeliv přepadat určité množství vody, začne fuzzy regulátor uzavírat spodní výpustě. V případě, kdy přepadové množství přepadající přes přeliv je rovno nebo větší požadovanému odtoku z nádrže, nezbude fuzzy regulátoru nic jiného, než uzavřít spodní výpustě a nechat tyto povodňové průtoky přejít přes bezpečnostní přeliv. V momentě, kdy přepadové množství přepadající přes přeliv poklesne pod požadované odtokové množství, začne fuzzy regulátor opět pozvolna otevírat spodní výpustě a reagovat tak na spojitě se měnící stav hladiny vody v nádrži. Na posledních třech grafech je postupně znázorněn průběh manipulace fuzzy regulátoru se spodními výpustmi, výtokové množství spodní výpustí z nádrže a přepadové množství přepadající přes přeliv.

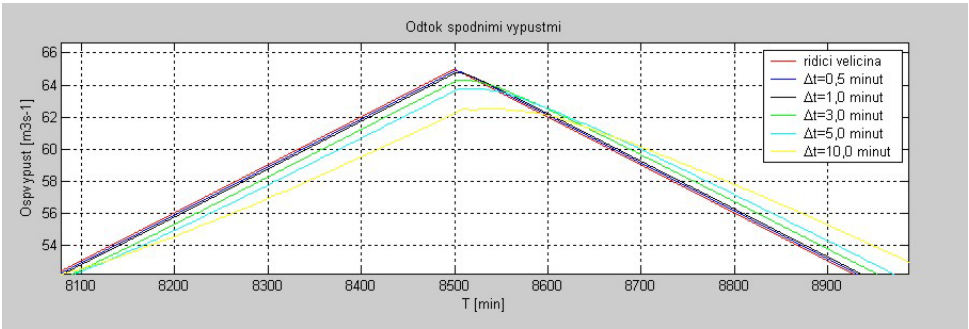


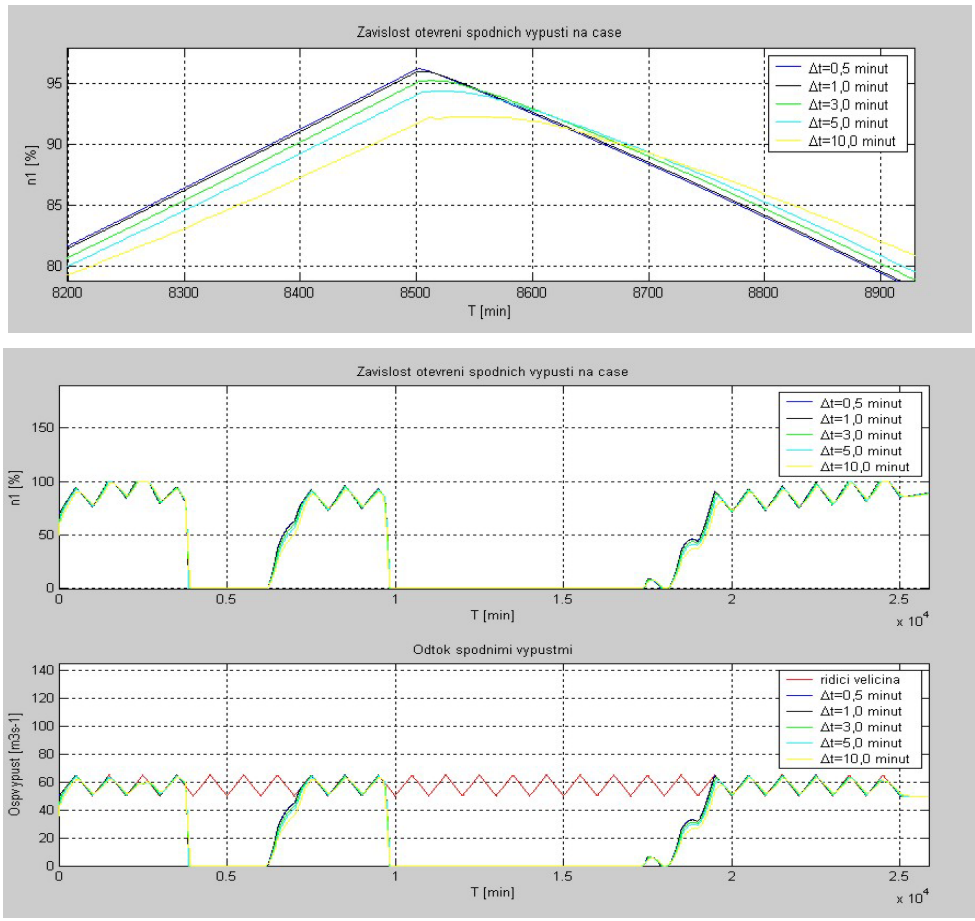
Obr. 5 Grafické znázornění výsledků pro řízený odtok měnící se v čase t

Fig. 5 Graphical outputs for controlling discharge variable in time t.

Vliv zvolené délky časového kroku výpočtu na přesnost řešení

Již v kapitole věnované popisu numerického modelu toku vody nádrží byla nastíněna problematika přesnosti výpočtu řešení zvolenou numerickou metodou na délce časového kroku výpočtu Δt. Na obr. 6. je na prvním obrázku znázorněna grafická závislost skutečného odtoku vody spodními výpustmi na čase t, při zvolené délce časového kroku výpočtu. Červená čára představuje předepsanou funkci odtok vody z nádrže. Ostatní čáry představují skutečný odtok v závislosti na délce časového kroku výpočtu Δt. Na následujícím obrázku je zobrazena grafická závislost procentuelního otevření spodní výpustě i na čase t, při zvolené délce časového kroku výpočtu. Celkový průběh jednotlivých výsledků řešení odtoku vody spodní výpustí a procentuelního otevření spodní výpustě na čase t je znázorněno na posledním obrázku. Z výsledků je patrné, že čím menší délka časového kroku výpočtu Δt, tím přesnější výsledky řešení. Je však potřeba podotknout, že však značně narůstá potřeba strojového času na samotný výpočet. Pro porovnání bylo řešení provedeno na dvou počítačových sestavách a byly do tab. 2 zaznamenávány hodnoty volených délek výpočtových kroků Δt a potřeba strojového času. Grafické znázornění je na obr. 7.





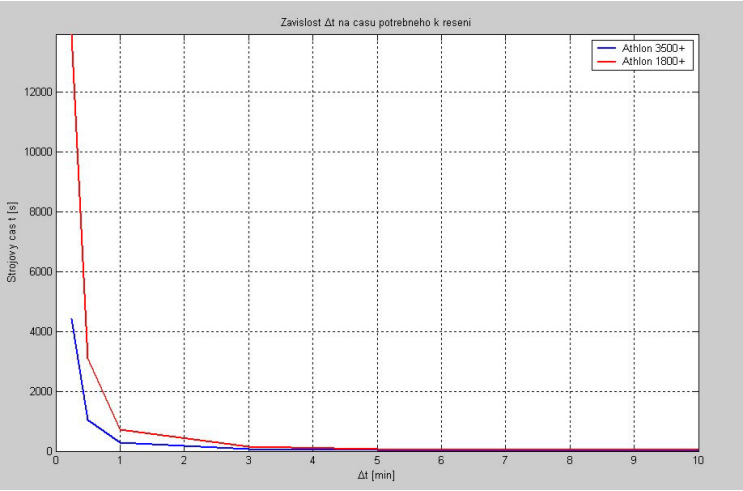
Obr. 6 Přesnost řešení na zvolené délce časového kroku Δt.

Fig. 6 Accuracy of the solution on the length of time step Δt.

Tab. 2 Potřeba strojového času.

Tab. 2 Computing time requirement.

Typ počítačové sestavy	Délka časového kroku Δt [min]	Strojový čas T [s]	Intervaly odchylek [m^3s^{-1}]
Procesor Athlon 1800+, 512 MB RAM	0.25	13941.3	<-0.06;0.02>
	0.5	3112.5	<-0.15;0.05>
	1.0	711.863	<-0.25;0.08>
	3.0	136.627	<-0.92;0.29>
	5.0	63.181	<-1.36;0.4>
	10.0	28.751	<-2.89;1.26>
Procesor Athlon 64 3500+, 1024 MB RAM	0.25	4425.8	<-0.06;0.02>
	0.5	1035.9	<-0.15;0.05>
	1.0	279.047	<-0.25;0.08>
	3.0	60.406	<-0.92;0.29>
	5.0	30.875	<-1.36;0.4>
	10.0	14.266	<-2.89;1.26>



Obr. 7 Graf potřeby strojového času na Δt.

Fig. 7 Graph of the computing time requirement depending on Δt.

ZÁVĚR

Činnost fuzzy regulátoru byla ověřena na dvou simulacích řízení odtoku vody z nádrže za povodňové situace. První simulace byla provedena pro konstantní řídící odtok vody z nádrže 50,0 m^3s^{-1} a druhá simulace pro proměnný řídící odtok vody z nádrže. Obě tyto varianty byly řešeny s délkami časových kroků 0,25; 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; a 10,0 minut a jejich grafické výstupy byly porovnány s předepsaným řídícím odtokem vody z nádrže a stanoveny intervaly odchylek řešení od předepsaného řídícího odtoku vody z nádrže. Výsledky jsou patrné z tab. 2. Simulace byly provedeny na dvou počítačových stanicích různého hardwarového vybavení pro stanovení časové náročnosti výpočtu. Ze získaných výsledků vyplývá jeho velká časová náročnost u délek časových kroků menších než jedna minuta. Jejich potřeba strojového času zde rychle vzrůstá.
V současné době je snaha fuzzy regulátor nahradit natrénovanou umělou neuronovou sítí, kde očekáváme menší časovou náročnost na výpočet, ale větší intervaly odchylek, což představuje větší nepřesnost řešení.

Tento výsledek byl získán za finančního přispění MŠMT, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Při řešení byly částečně využity teoretické výsledky dosažené v projektu GA ČR 103/04/0352 „Teorie operačního řízení vodohospodářských soustav za povodňových situací.“

Literatura

Dalík J.: Numerické metody. VUT v Brně, Akademické nakladatelství CERM, Brno 1997, 145 s., ISBN 80-214-0646-1

Kubík S., Kotek Z., Strejc V., Štěcha J.: Teorie automatického řízení. SNTL/ALFA, Praha/Bratislava, 1982

Nacházel K., Starý M., Zezulák J.: Využití metod umělé inteligence ve vodním hospodářství. Praha: Academia, 2004, 319 s., ISBN 80-200-0229-4

Starý M.: Nádrže a vodohospodářské soustavy. Brno: VUT FAST, 1990, 165 s., ISBN 80-214-0191-5

Autoři:

Ing. Lubomír Jaroš, Žižkova 17, 602 00 Brno, jaros.l@fce.vutbr.cz