

PROBLEMATIKA AUTOMATICKÉHO ŘÍZENÍ NÁDRŽÍ V POVODŇOVÝCH SITUACÍCH

KAREL NACHÁZEL

ČVUT, Fakulta stavební, Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Česká republika; mailto: milecova@fsv.cvut.cz

Studie uvádí do problematiky operativního řízení nádrží v povodňových situacích a zkoumá možnosti využití počítačů pro automatizaci rozhodovacího procesu. Vychází z moderní teorie řízení dynamických systémů a popisuje základní typy regulátorů. Současně jsou analyzovány meze jejich využití v extrémních situacích. V aplikační části se řeší dopady protipovodňových opatření na transformaci 100-letých syntetických povodňových vln v profilu přehrady Lipno na horní Vltavě a posuzuje se možnost zvětšení jejího ochranného prostoru.

KLÍČOVÁ SLOVA: syntetická povodňová vlna, moderní teorie řízení, dynamické systémy, regulátor, regulační odtoku, ochranný účinek nádrže, automatické řízení, extrémní situace, neurčitost.

Karel Nacházel: PROBLEMS OF RESERVOIRS AUTOMATIC CONTROL IN FLOOD SITUATIONS.
J. Hydrol. Hydromech., 57, 2009, 2; 26 Refs., 6 Figs., 3 Tabs.

The study introduces problems of the reservoirs operative control in the course of flood situations and investigates possibilities of computer use for the automation of the decision-making process. The solution is based on the modern control theory of dynamic systems. It explains the basic types of application of the controllers in the control systems; at the same time, certain bounds of the exploitation automatic control in extreme hydrological situations are analysed. In the application part, the study presents the impacts of different flood protection measures on synthetic flood waves with a 100-year peak flow in the Lipno Reservoir on the upper Vltava River. The possibilities of the increase of the flood protection storage in the reservoir are also analysed here.

KEY WORDS: Synthetic Flood Wave, Modern Control Theory, Dynamic Systems, Controller, Run-off Regulation, Flood Protection Effect of the Reservoir, Automatic Control, Extreme Situation, Uncertainty.

1. Úvod

Vodohospodářská řešení nádrží patřila vždy k hlavním podkladům hydrotechnických projektů. Jejich vývoj lze tak sledovat už od konce 19. století. Regulace odtoku jako rozhodující část těchto projektů vycházela zprvu ze zjednodušujících předpokladů: nejdříve se využívaly numerické bilanční metody nebo grafické metody. Teprve začátkem druhé poloviny 20. století začínají pronikat do těchto řešení pravděpodobnostní přístupy a metody teorie náhodných procesů, od přelomu 60. a 70. let se pak studují systémové metody a matematické modely, které umožňují optimalizovat funkci nádrží. V 90. letech se ve vodním hospodářství objevují první pokusy s aplikacemi metod umělé inteligence.

Zajímavou historii má též problematika operativního řízení nádrží a vodohospodářských soustav. V dobách, kdy nebyly rozvinuty metodické postupy

teorie řízení, se problematika řízení nádrží chápala úzce jako úloha vodohospodářského řešení bez vazeb na řídící systém a bez optimalizace řízení. Současná teorie řízení pojímá tuto problematiku komplexně jako návrh řídícího systému, který má realizovat optimální řízení. Moderní koncepce v této teorii pokládají za cílovou fázi řízení automatizované systémy s počítačovou podporou.

Teorie řízení je dnes rozpracována do značné šířky a hloubky. Je náročná z matematického hlediska, aplikace vyžadují značné znalosti a zkušenosti. Využívá se v mnoha technických oborech při navrhování průmyslových regulátorů v řídících systémech. Smyslem regulace je udržovat sledované veličiny na předem stanovených hodnotách a při jejich vychýlení vrátit systém do ustáleného stavu. Jestliže tuto činnost vykonává člověk, mluvíme o ruční regulaci. Zajišťuje-li ji přístroj nebo nějaké

technické zařízení, mluvíme o automatické regulaci.

Moderní metody řízení pochopitelně lákají k aplikaci i na operativní řízení nádrží a vodohospodářských soustav v reálném čase. Zde je však tento úkol ze známých důvodů značně obtížný a v některých otázkách nedořešený. Uvedeme jen ty nejpodstatnější: stochastičnost vstupů, nelinearita soustav a jejich dynamika, neurčitost při řízení a nejistá predikce. Jejich zvládání zejména v extrémních situacích a při současně naplněné (nebo vyprázdněné) nádrži patří nepochybně k silným motivacím řešení.

Přes tyto obtíže lze však i ve vodním hospodářství zaznamenat úspěchy při zavádění automatizovaných systémů řízení do praxe. Dostupné prameny uvádějí např. využívání automatizovaných systémů řízení ve vodárenství, čistírenství, popř. i integraci těchto systémů (*Kašparec, Hladký, 2008*). V energetice je známa automatická a pohotová regulace výkonu a frekvence v elektrizační soustavě prostřednictvím špičkových vodních elektráren s akumulačními nádržemi nebo přečerpávacích vodních elektráren. Příkladem může být vodní elektrárna Štěchovice na Vltavě, kde je řídicí systém navržen jako mikropočítacový distribuovaný systém s plnou automatizací provozu soustrojí včetně řízení pomocných pohonů a spolupráce s regulátory turbín (*Kolektiv*). Mnoho práce se u nás vykonalо též při zdokonalování informačních systémů včetně přenosu dat z povodí pro potřeby dispečerského řízení vodních děl.

Nejnáročnější je zřejmě druhá stránka řízení nádrží – samotné rozhodovací procesy na podkladě souboru získaných informací a možnosti jejich algoritmizace. Výzkum moderních technologií řízení v reálném čase se tu zřetelně opožďuje, což se odraží i ve zpracovaných manipulačních rádech vodních děl a v jejich normě s nezměněnou koncepcí¹⁾.

Význam operativního řízení manipulací na nádržích se dnes zvětšuje s narůstajícím působením geofyzikálních a antropogenních faktorů v povodích včetně klimatické změny. Mění se hydrologic-

ké podmínky, které vyvolávají nový aktuální problém nehomogeneity a nestacionarity v časových řadách. Tím se podstatně komplikuje zpracování hydrologických dat, příprava matematických modelů, predikce, odhad vlivu změny klimatu na variabilitu a extremitu povodní a na využití vodních zdrojů. V souvislosti s tím je náročné i zpracování strategie výstavby dalších zdrojů vody se zásobní i ochrannou funkcí. Problematika se stala předmětem zájmu celosvětové odborné veřejnosti (*Hladný, Barták, 2000*).

V metodické části studie uvádíme hlavní typy regulátorů, jejich algoritmy a možnosti využití při řízení odtoku z nádrží za povodňových situací. Poškutili jsme se přitom identifikovat ty fáze povodňových situací, kdy lze řízení odtoku algoritmizovat a naopak fáze, kdy nastává prakticky neovladatelný stav a algoritmizace selhává. V aplikační části jsme pak vybrali nejzajímavější výsledky několika případových studií regulace, kde jsme zkoumali dopady různých protipovodňových opatření na ochranný účinek nádrže.

Dosažené výsledky výzkumu ukazují na úskalí matematického popisu regulace odtoku a automatického řízení. Studii je proto třeba považovat spíše za vstup do této problematiky, v jejímž řešení bude účelné pokračovat.

2. Dosavadní řešení problematiky

Teoretické zázemí pro řešení automatické regulace v mnoha technických oborech nabízí moderní teorie řízení dynamických systémů, která se dnes zařazuje do širšího rámce kybernetiky. Automatická regulace má však delší historii svého vývoje. Její počátky vedou až do poloviny 18. století, kdy bylo zkonstruováno samočinné napájení kotle, a koncem 18. století pak byl sestrojen samočinný regulátor parního stroje (James Watt). Vývoj této teorie a její základy zachycují četné spisy, např. *Kotek, Vysoký, Zdráhal, 1990; Havlena, Štecha, 1996; Havlena, 2001; Hyniová, 2006; Šulc, 1999* a d. Jejich stručný přehled jsme uvedli v našich předchozích studiích a zde ho už nebudeme opakovat (*Fošumpaur, Nacházel, Patera, 2002; Fošumpaur, Holeček, Nacházel, 2007 a, b; Nacházel, 2008 a, b*).

Hlavním úkolem teorie automatického řízení je zpravidla analýza a syntéza řídicích systémů. Jestliže v analýze systému automatického řízení lze zvládnout matematický popis systému relativně snáze popisem dílčích subsystémů, pak syntéza je obtížnější v tom, že obvykle známe jen regulovanou soustavu, optimalizační kritérium, technická

¹⁾Odvětvová technická norma vodního hospodářství TNV 75 2910 Manipulační rády vodohospodářských děl na vodních tocích (červen 1997).

Koncepční otázky zpracování manipulačních rádů vodních děl řešil koncem 80. let VÚV Praha a doporučil do budoucna rozdělit manipulační rád na dvě hlavní složky, z nichž první by zajišťovala jen legislativní formu vazby mezi vodním hospodářstvím a odběrateli a druhá by obsahovala samotný projekt operativního řízení s cílem automatického řízení pomocí počítače (*Zeman a kol., 1990 b*).

omezení návrhu a poruchové veličiny vstupující do systému. Úkolem je tu navrhnut strukturu a parametry regulačního obvodu tak, aby byly splněny požadavky na stabilitu, přesnost a průběh regulačního pochodu. Jednou z cest, kterou lze tento úkol zvládnout, je zvolit místo náročného exaktního řešení metodu simulace a postupně (po variantách) se přibližovat k optimu. Simulace řídicích systémů na číslicovém počítači byly u nás popsány už před více než 30 roky (*Nevřiva*, 1975).

Automatizace zahrnuje nejen automatickou regulaci jednotlivých strojů a zařízení, ale i automatizaci řízení technologických procesů a závodů. Označení „automatizovaný systém řízení“ (ASŘ) se používá pro racionálně organizovaný systém řízení, v němž jsou algoritmizovatelné procesy (informační, rozhodovací, řídící, regulační, kontrolní) automatizovány v důsledně systémovém pojetí pomocí počítače (*Kotek, Vysoký, Zdráhal*, 1990).

V našem domácím vodohospodářském výzkumu se věnovala velká pozornost automatické regulaci ve vztahu k výstavbě vodohospodářských dispečinků už od přelomu 60. a 70. let minulého století. Tyto úkoly se řešily zprvu v rámci plánu technického rozvoje, jejichž výsledky byly shrnuty později (*Valenta, Gabriel*, 2002), od poloviny 70. let pak v tehdejším státním plánu základního výzkumu (*Gabriel*, 1985; *Zeman a kol.*, 1990). V 90. letech se tato problematika přenesla z části do grantových projektů, ve kterých se kromě toho začaly studovat některé nové vývojové směry (např. fuzzy řízení dynamických systémů, metody umělé inteligence aj.). Problémy řízení rozsáhlých soustav za povodní s aplikacemi zejména na Dyjsko-svrateckou vodohospodářskou soustavu nebo na operativní řízení v povodí Odry s využitím modelu HYDROG se řešily v rámci výzkumných projektů VaV a dalších úkolů (*Drbal a kol.*, 1998; *Drbal*, 1999; *Drbal, Starý*, 1998) a d.

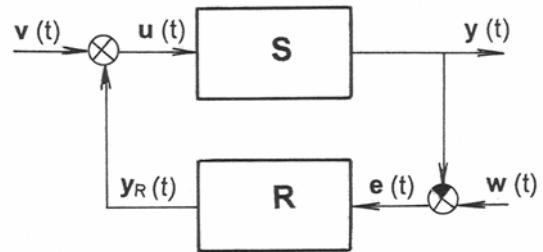
Uvedené výzkumné práce přinesly v řadě otázek původní výsledky a ukázaly také žádoucí směry jejich dalšího rozvoje se zřetelem k potřebám dispečerského řízení vodních děl. Přesto je zavádění metod automatického řízení spojeno stále s překážkami, které brání prohloubit rozhodovací procesy v praxi a přiblížit se současné úrovni poznání. Pro širší aplikace těchto metod bude třeba v blízké budoucnosti zabezpečit především hydrologický výzkum geneze povodňových situací ve větších povodích, odvodit nejvhodnější metodické postupy jejich simulace a predikce a pro potřeby řízení s počítačovou podporou řešit další otázky, které uvádíme v diskusi.

Zaměření našeho výzkumu jsme uvedli v úvodu studie. Vychází ze současného stavu řešení této problematiky ve vodním hospodářství a z nedořešených úkolů.

3. Metody operativního řízení a základní typy regulátorů

V řídicí technice se rozlišují otevřené a uzavřené regulační obvody. Otevřený regulační obvod pracuje bez zpětné vazby, výsledek řízení proto není zpětně kontrolován a je správný pouze tehdy, kdy se nemění vnější podmínky.

Uzavřený regulační obvod má naopak zápornou zpětnou vazbu, která kontroluje průběh řízeného procesu (schéma na obr. 1). Charakteristickou veličinou řízeného procesu je regulovaná veličina $y(t)$. Její okamžitá hodnota je neustále porovnávána regulátorem s žádanou hodnotou $w(t)$ a vyhodnocována je regulační odchylka $e(t) = w(t) - y(t)$. Cílem řízení je vyrovnávat vychýlené hodnoty $y(t)$ technickými prostředky automatizace do ustálené hodnoty.



Obr.1. Základní blokové schéma regulačního obvodu.

Fig. 1. Basic block scheme of a control circuit; S – controlled system, R – controller, $y(t)$ – regulated variable, $w(t)$ – requested value of regulated variable, $e(t)$ – regulation error, $e(t) = w(t) - y(t)$, $y_R(t)$ – actuated variable, $u(t)$ – regulating variable (control input), $v(t)$ – random disturbances.

Nejdůležitější funkci v regulačním obvodu má regulátor. Lze si ho představit jako soubor propojených technických prostředků a zařízení pro řízení daného procesu. Zahrnuje tyto členy:

Měřicí člen – snímá prostřednictvím čidla skutečnou hodnotu regulované veličiny $y(t)$.

Porovnávací člen – porovnává skutečnou a požadovanou hodnotu regulované veličiny $w(t)$.

Ústřední člen regulátoru – zpracovává výstup porovnávacího člena $e(t) = w(t) - y(t)$ vhodným algoritmem tak, aby proběhl požadovaný regulační pochod.

Akční člen – zpracovává výstup ústředního členu regulátoru na akční zásah $y_R(t)$ prostřednictvím regulačního orgánu, kterému je pohonom dodávána energie.

V naší předchozí studii (Nacházel, 2008 a, b) jsme uvedli, že návrh regulátoru nemusí být ve vodním hospodářství jednoduchou úlohou, protože na řízený systém působí často náhodné veličiny, regulace probíhá v neurčitých podmínkách a regulátor by měl proto zvládnout nejen návrhové (nominační) podmínky, ale též reálné podmínky provozu v blízkém okolí, tedy nějakou množinu náhodných situací.

Regulační obvody se liší podle druhu regulované veličiny (např. regulace tlaku, teploty, průtoku aj.), podle druhu regulace (na konstantní hodnotu, regulace programová, vlečná), podle použitých technických prostředků (pneumatické, elektrické, hydraulické, kombinované), podle druhu signálů (analogové, číslicové) nebo podle počtu regulovaných veličin (jednoparametrové, víceparametrové) apod.

Základní úlohou při algoritmizaci řízení je odvození akční veličiny $y_R(t)$, která je funkcí regulační odchylky $e(t)$. Vstupem regulátoru je tu tedy regulační odchylka $e(t)$, výstupem akční veličina $y_R(t)$. Podle charakteru matematické operace s odchylkou $e(t)$ se rozlišují tyto spojité regulátory:

– Proporcionální regulátory (tzv. regulátory P): regulační odchylka $e(t)$ se násobí proporcionální konstantou r_0 (tzv. zesílením) podle vztahu

$$y_R(t) = r_0 e(t). \quad (1)$$

Konstanta r_0 je bezrozměrná. Regulátor v tomto případě reaguje pouze na velikost odchylky $e(t)$. Význam konstanty r_0 je dobře vidět v tab. 1, kde je zachycen průběh přenosu $G_p(s) = r_0$ a přechodové charakteristiky.²⁾

²⁾Laplaceova transformace funkce $f(t)$ se definuje výrazem

$$F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^\infty f(t) e^{-st} dt, \text{ kde } s \text{ je komplexní}$$

proměnná. Z věty o linearitě této transformace plyne

$L\{r_0 \cdot f(t)\} = r_0 \cdot F(s)$. Přenos $G_p(s)$ se pak obecně definuje jako podíl Laplaceova obrazu výstupní veličiny a Laplaceova obrazu vstupní veličiny. V našem případě platí

$$G_p(s) = \frac{r_0 \cdot F(s)}{F(s)} = r_0. \text{ Konstanta } r_0 \text{ u regulátoru P je tedy}$$

současně přenosem.

Obdobně lze odvodit rovnice pro ostatní regulátory. Pro regulátor D vyjdeme z věty o obrazu derivace, podle níž platí

$$L\left\{r_1 \cdot \frac{de(t)}{dt}\right\} = r_1 s \cdot F(s). \quad \text{Z toho už snadno dostaneme}$$

– Integrační regulátory (regulátory I): regulační odchylka $e(t)$ se integruje v čase podle vztahu

$$y_R(t) = \frac{r_0}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau = r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Regulátor v tomto případě reaguje na trvání odchylky $e(t)$. Konstanta T_i má rozměr [s], r_{-1} má rozměr [s^{-1}] a označuje integrační konstantu regulátoru.

– Derivační regulátory (regulátory D): reagují na rychlosti změny regulační odchylky podle vztahu

$$y_R(t) = r_1 \frac{de(t)}{dt} = r_0 T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3)$$

kde r_1 označuje derivační konstantu [s], konstanta $T_d = \frac{r_1}{r_0}$ se nazývá derivační časová konstanta [s].

- Nevýhodou regulátorů P a PD je, že v ustáleném stavu je poloha regulačního orgánu přímo úměrná regulační odchylce, takže tyto regulátory ji nemohou zcela odstranit (zanechávají tzv. trvalou regulační odchylku). Z tohoto hlediska jsou vhodnější regulátory PID, které pracují bez trvalé regulační odchylky. Návrh optimálního regulátoru a jeho funkci se proto doporučuje ověřit nejdříve na simulačních modelech.
- Kombinované regulátory (regulátory PI, PD, PID) pracují s kombinovanými funkcemi. Např. regulátor PID se všemi třemi uvedenými operacemi lze popsat rovnicí

$$G_D(s) = \frac{r_1 s \cdot F(s)}{F(s)} = r_1 s. \text{ Přechodová charakteristika pro tento}$$

regulátor se vztahuje k jednotkovému (Diracovu) impulsu, pro který platí $\delta(t) = 0$ pro $t \neq 0$, $\delta(t) \rightarrow \infty$ pro $t = 0$, avšak

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1.$$

Pro regulátor I můžeme použít větu o Laplaceově transformaci

$$\text{integrálu ve tvaru } L\left\{\int_0^t f(\tau) d\tau\right\} = \frac{1}{s} F(s).$$

Z toho plyne $L\left\{r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau\right\} = r_{-1} \cdot \frac{1}{s} F(s)$ a pro přenos pak

$$\text{vztah } G_I(s) = \frac{r_{-1} \cdot \frac{1}{s} F(s)}{F(s)} = \frac{r_{-1}}{s}.$$

$$\begin{aligned} y_R(t) &= r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_i \frac{de(t)}{dt} = \\ &= r_0 \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

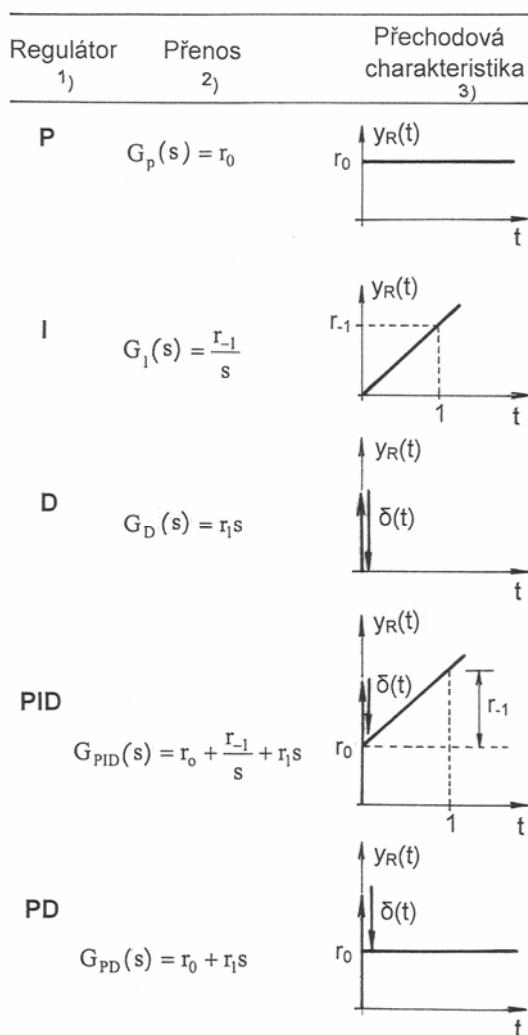
a přenos tohoto regulátoru pak vztahem

$$\begin{aligned} G_R(s) &= \frac{Y_R(s)}{E(s)} = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_i s = \\ &= r_0 \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

Regulátor PID je vhodný pro náročné aplikace, může se dobře uplatnit při regulaci rychlých dějů.

T a b u l k a 1. Přenosy a přechodové charakteristiky ideálních regulátorů.

T a b l e 1. Transfer functions of a system and change-over characteristics in time of ideal controllers; 1 – controller, 2 – transfer function, 3 – change – over characteristics in time.



Přenosy a přechodové charakteristiky pro pět variant regulátorů jsou přehledně zachyceny v tab. 1.

Kromě spojitéch regulátorů se v praxi využívají též nespojité regulátory, které pracují jen s několika polohami regulačního orgánu. Nejjednodušší jsou dvoupolohové regulátory, kde akční veličina má pouze dvě hodnoty 0 a 1, kterým odpovídají dvě polohy regulačního orgánu – zavřeno a otevřeno.

Typ regulátoru se volí především podle požadavků daného technologického procesu. Jedním hlediskem je však i cena regulátoru. Nastavování parametrů regulátoru (tj. zesílení a časových konstant) je přitom dosti náročná úloha vzhledem k tomu, že dynamické chování regulátoru se musí přizpůsobit vlastnostem soustavy tak, aby regulace byla stabilní. Řešení této úlohy lze usnadnit samočinným nastavováním konstant regulátoru (tzv. autotuning). Podrobnosti lze nalézt ve speciální literatuře, např. Švec, Kotek a kol., 1969; Hyniová, 2006; Švec, 1999 a d.

Vráťme se nyní k proporcionálnímu regulátoru a pokusíme se o jeho aplikaci na řízení odtoku z nádrže za povodňové situace. Na tomto nejjednodušším regulátoru ukážeme jeho výhody i nevýhody, což nám usnadní úvahu o možnosti aplikace jiných regulátorů.

Schéma povodňové vlny je na obr. 2, kde jsou vyznačeny charakteristické časové okamžiky t_1, t_2, \dots, t_5 , ve kterých rozhodujeme o dalším postupu řízení. Okamžik t_1 znamená začátek předvypouštění z nádrže (budeme řešit později), v okamžiku t_2 překročí přítok P do nádrže neškodný odtok $O_{neš}$, v okamžiku t_3 se naplní předvypouštěná část zásobního prostoru, v okamžiku t_4 se naplní celý ochranný prostor A_R a začíná neovladatelný přepad, v okamžiku t_5 se sníží přítok na úroveň neškodného odtoku a rozhodujeme o rychlosti vyprázdnění ochranného prostoru.

V souladu s předchozím výkladem bylo naším cílem odvodit akční veličinu $y_R(t)$ a následně pro potřeby řízení pak celkovou řídící veličinu $u(t)$. Tyto vztahy zapíšeme obvyklými rovnicemi

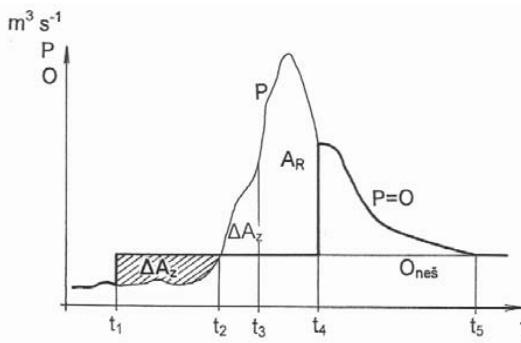
$$y_R(t) = r_0 e(t), \quad (6)$$

$$u(t) = y_R(t) + v(t), \quad (7)$$

kde $v(t)$ – náhodný přítok do nádrže, odchylka $e(t) = w(t) - y(t)$,

$w(t)$ – v našem případě požadovaný odtok z nádrže.

Za kritérium rozhodování lze zvolit např. co největší stabilitu odtoku, kterou lze dosáhnout minimizací rozptylu odchylky $e(t)$. Při řízení manipulací v reálných podmínkách bude třeba upravovat odtok z nádrže nejen podle vývoje přítoků do nádrže, ale i podle aktuální situace v povodí. I z tohoto hlediska je výhodné rozhodovat podle předem připraveného modelu.



Obr. 2. Schéma povodňové vlny a její fáze při transformaci nádrží.

Fig. 2. Scheme of a flood wave and its phases in the course of a flood routing.

Protože začátek předvypouštění t_1 nelze stanovit exaktně, je nezbytné ho odhadnout na podkladě hydrometeorologické předpovědi, aktuální situace v povodí a stavu nádrže. Pro usnadnění naší modelové abstrakce dále pozměníme význam odchylky $e(t)$ tak, že místo jejího obvyklého chápání jako rozdílu mezi požadovanou a skutečnou hodnotou výstupu (v teorii řízení) ji budeme pokládat za rozdíl mezi okamžitou hodnotou odtoku a přítoku do nádrže (v teorii nádrží). Tímto rozdílem se pak prázdní (nebo plný) nádrž. Za předpokladu $P(t) \leq O(t) \leq O_{\text{neš}}$ platí

$$e(t) = O(t) - P(t) \quad (8)$$

a akční veličinu $y_R(t)$ můžeme za zjednodušujícího předpokladu $r_o = 1$ vyjádřit ve tvaru

$$y_R(t) = r_o(O(t) - P(t)) = O(t) - P(t). \quad (9)$$

Pokud bychom zvolili $r_o > 1$, zásobní prostor nádrže se bude prázdnit rychleji.

Pro řídicí veličinu $u(t)$ pak logicky platí

$$\begin{aligned} u(t) &= y_R(t) + v(t) = \\ &= O(t) - P(t) + P(t) = O(t). \end{aligned} \quad (10)$$

Za dobu $t_2 - t_1$ se zásobní prostor A_Z povyprázdní o prostor ΔA_Z , kterým se zvětší ochranný pros-

tor o přírůstek $\Delta A_R = \Delta A_Z$ pro zachycení nástupu povodňové vlny. Můžeme ho snadno dostat z rovnice

$$\Delta A_Z = O(t)(t_2 - t_1) - \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (11)$$

nebo při diskrétním vyjádření

$$\Delta A_Z = O(t)(t_2 - t_1) - \sum_{i=1}^n P_i \Delta t_i, \quad (12)$$

kde $P_i \Delta t_i$ – elementární objemy přítoku za časový interval Δt_i , P_i – střední hodnoty přítoku v těchto intervalech, n – jejich počet.

Manipulace v intervalu (t_2, t_3) :

Při nástupu povodňové vlny ($P > O_{\text{neš}}$) se nejdříve plní povyprázdněný zásobní prostor ΔA_Z , pro který platí jednoduchý vztah

$$u(t) = O_{\text{neš}}. \quad (13)$$

Neškodný odtok v průběhu povodně však nemusí být konstantní.

Manipulace v intervalu (t_3, t_4) :

V tomto intervalu vzniká pro rozhodování nejsložitější situace, protože v podmínkách neurčitosti neznáme budoucí přítok do nádrže a nedovedeme proto spolehlivě odhadnout nejvhodnější odtok $O(t)$. Záleží tu nejen na hydrometeorologické předpovědi, ale též na formulaci kritéria optimálnosti v dané situaci (tím může být nejen obvyklé minimum čtverců odchylek od $O_{\text{neš}}$, ale např. co největší oddalení kulminace, nejkratší doba překročení $O_{\text{neš}}$ apod.).

Jestliže budeme co nejvíce oddalovat překročení $O_{\text{neš}}$ (tato varianta je zvolena na obr. 2), bude se relativně rychleji plnit ochranný prostor a pro manipulaci v intervalu (t_3, t_4) bude opět platit jednoduchý vztah

$$u(t) = O_{\text{neš}}. \quad (14)$$

Manipulace v intervalu (t_4, t_5) :

V okamžiku t_4 vzniká prakticky neovladatelný stav, kdy je celý ochranný prostor A_R naplněn, odtok nelze dále regulovat a celý přítok do nádrže je nezbytné vypouštět pod hráz. V tomto okamžiku nelze přítok do nádrže snížit a zmenšit tak odchylku od požadovaného výstupu, jak předpokládá teorie řízení. Situaci lze však řešit aspoň částečně (s výjimkou katastrofálních povodňových vln) včasným vypouštěním neškodného odtoku už od počátku nástupu povodně nebo předvypouštěním zásobního prostoru před nástupem povodně.

Je zřejmé, že pro orientační odhad ochranného účinku nádrže má podstatný význam vzájemný vztah objemu povodňové vlny W_{PV} (nad danou hodnotou průtoku) a součtu ochranného objemu V_r a aktuálního povyprázdněného zásobního prostoru ΔA_Z na počátku povodně, a to zámerným předvypuštěním nebo přirozeným povyprázdněním v důsledku nadlepšování nízkých průtoků. Tento vztah můžeme vyjádřit ve tvaru

$$k_{ovl} = \frac{W_{PV}}{V_r + \Delta A_Z}. \quad (15)$$

Koeficient k_{ovl} vyjadřuje míru ovladatelnosti povodňové vlny nádrží. Tato ovladatelnost je současně podmínkou případné algoritmizace řízení. Za kritickou lze považovat hodnotu koeficientu $k_{ovl} = 1$. Při $k_{ovl} \leq 1$ lze předpokládat, že povodeň se podaří ochranným prostorem a popř. i uvolněnou částí zásobního prostoru zvládnout. Naopak při $k_{ovl} > 1$ dojde po naplnění ochranného prostoru k překročení neškodného odtoku.

Naznačená formalizace řízení za povodňové situace je jednoduchá, vychází z elementárních a logických pravidel, která se běžně aplikují v manipulačních rázech vodních děl. Obtíže při rozhodování o manipulacích jsou způsobeny, jak jsme již uvedli, neznalostí budoucího průběhu povodně a někdy i aktuální situace v rozsáhlém povodí. Využití počítače jako podpory rozhodovacího procesu je tu proto otázkou, kterou je třeba posuzovat individuálně podle aktuálních podmínek dané soustavy. Nejjednodušší je zřejmě zpracování informace jen jako podkladu pro rozhodování dispečera bez přímé vazby počítače na řízenou soustavu. Nevýhoda je tu v tom, že při velkém objemu informace a na rozsáhlých vodohospodářských soustavách mohou vzniknout problémy se včasním zpracováním všech dat. Přímé řízení za počítačové podpory (tzv. on-line řízení) je z tohoto hlediska výhodnější. Vlastnosti systému je však vhodné ověřit nejdříve ve zkušebním off-line režimu (zejména při zavádění nových metod do řízení), kdy řídící systém pouze doporučuje dispečerovi akční zásahy mimo reálný čas (Kukal, 2008).

K nejobtížnějším úkolům při operativním řízení povodňového odtoku z nádrže patří predikce. Příčiny obtíží jsou známé. V literatuře se často doporučují pro predikci statistické metody. Jejich úspěšnost závisí na více faktorech, z nichž nejdůležitější je dosažitelnost a rozsah (délka) empirického pozorování, pravděpodobnostní vlastnosti náhodných

veličin a jejich spolupůsobení při vývoji povodňových situací. Nesnáze při jejich aplikaci si můžeme přiblížit aspoň krátce na vnitřním (stavovém) popisu řízeného systému. Vyjdeme z obvyklých rovnic

$$\dot{x}(t+1) = Ax(t) + Bu(t) + v(t), \quad (16)$$

$$y(t+1) = Cx(t) + Du(t) + e(t), \quad (17)$$

kde o maticích A, B, C, D se předpokládá, že jsou známé, $v(t)$ a $e(t)$ jsou nekorelované bílé šumy rovněž s předpokládanou známou kovarianční maticí. Veličina x znamená stavy systému, y výstupy, u je vstupní řídící veličina.

Náhodnou veličinu $v(t)$ na vstupu si můžeme představit jako povodňové přítoky. Jejich pravděpodobnostní vlastnosti však předem neznáme a proto nelze pro ně odvodit model. V reálné situaci neznáme ani ostatní součinitele (matice) v rov. (16) a (17).

Pro predikci náhodných veličin nabízí určité metodické postupy teorie filtrace časových řad. Podstatou těchto metod je (zjednodušeně řečeno) oddělení náhodných složek od dané náhodné posloupnosti. Tím lze dostat spolehlivější model posloupnosti pro predikci, která je pak zatížena šumem s minimálním rozptylem.³⁾

Ani tyto metodické postupy však nemusí vést v našem případě k cíli, protože predikce má největší význam na počátku povodně, kdy však paradoxně z jejího krátkého průběhu nelze statisticky usuzovat na její další vývoj. Místo statistické predikce je proto účelné volit jiné metodické postupy, založené na analýze příčinných faktorů vzniku extrémních srážkových situací (numerické předpovědní meteorologické modely) a na jejich spojení se srážkoodtokovými modely, popř. i v kombinaci s modely tvorby a tání sněhové pokryvky.

4. Případové studie řízení odtoku

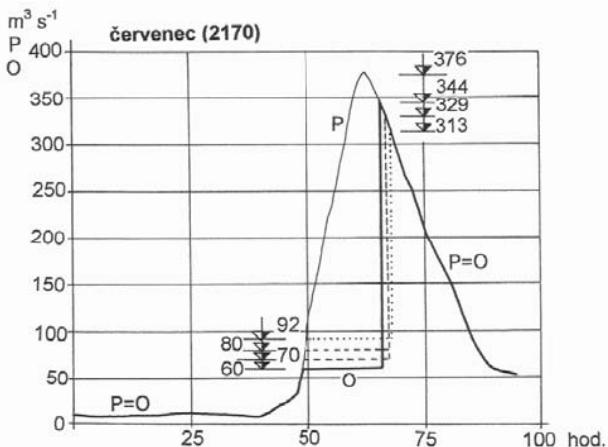
Při povodňovém řízení odtoku nádržemi vzniká podstatná otázka, zda nebezpečí vzniku velkých škod lze zmírnit vhodnými regulačními opatřeními. V praxi se často postupuje tak, že se předvypouští část zásobního prostoru ještě před nástupem povodňové vlny nebo se zvyšuje odtok před úplným naplněním ochranného prostoru. V našich případových studiích jsme zkoumali v několika variantách různé regulační zásahy do povodňového řízení a sledovali jsme přitom především jejich účinek na

³⁾ Podrobnější informaci o teorii filtrace a jejích aplikacích na hydrologické řady lze nalézt ve studii Nacházel, Patera, 1974.

transformaci povodňové vlny. Současně nás zajímaly možnosti algoritmizace v jednotlivých variantách řízení. Pro řešení jsme využili generované syntetické povodňové vlny na horní Vltavě v profilu přehrady Lipno, pro které jsme odvodili původní simulační model srážek a spojili ho se srážkoodtokovým modelem (*Fošumpaur, Holeček, Nacházel, 2007 a,b*).

Podle dřívějšího manipulačního řádu jsme zvolili proměnlivé velikosti ochranného prostoru: v letním období (V–XI) 12,056 mil. m^3 , v zimním období (XII–IV) 33,156 mil. m^3 . Manipulace byla v těchto variantách volena jednoduše tak, že neškodný odtok se začal vypouštět z nádrže až při jeho překročení přítokem a udržoval se do naplnění ochranného prostoru. Pak nastal přepad a neovladatelný stav. V závěru případových studií jsme ještě posuzovali ochranný účinek nádrže při ochranném prostoru podle současné platného manipulačního řádu.

Na obr. 3 jsme nejdříve řešili transformaci letní povodňové vlny se stoletou kulminací $376 m^3 s^{-1}$ z července (2170), a to při čtyřech různých neškodných odtocích.⁴⁾ Za nejnižší jsme zvolili podle manipulačního řádu neškodný odtok $60 m^3 s^{-1}$, který lze však zvýšit při nepříznivém vývoji hydrometeorologické situace až na $92 m^3 s^{-1}$.



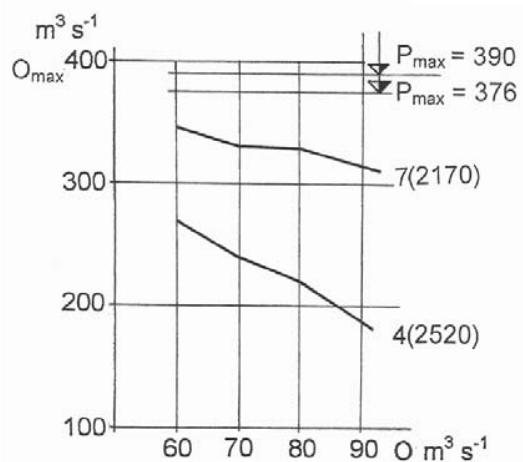
Obr. 3. Transformace povodňové vlny se stoletou kulminací při různých odtocích.

Fig. 3. Flood routing with the 100-year's peak flow at different outflow.

Výsledky řešení těchto čtyř variant ukazují, že příliš velká opatrnost při rozhodování o začátku vypouštění neškodného odtoku a nevyužití možnos-

ti jeho zvýšení nemusí vést k výraznému snížení kulminace. V daném případě se kulminace $376 m^3 s^{-1}$ snížila jen o $32–63 m^3 s^{-1}$, tedy asi o 9–17 %.

Obdobně jsme řešili ve čtyřech variantách transformaci zimní povodňové vlny s kulminací $390 m^3 s^{-1}$ z dubna (2520). Pro tuto vlnu jsme vynesli na obr. 4 výsledky řešení a připojili jsme k nim pro porovnání výsledky předchozího řešení. V tomto případě se v důsledku většího ochranného prostoru v zimním období kulminace snížila o $120–209 m^3 s^{-1}$, tj. asi o 31–54 %.



Obr. 4. Vztah mezi transformovaným, maximálním a neškodným odtokem při povodňových vlnách se stoletými kulminacemi.

Fig. 4. Relation between transformed, maximal and harmless outflow at the flood waves with the 100-year's peak flows.

Je zřejmé, že řízení s případnou podporou počítače se může uplatnit jen v první části průběhu povodňové situace, kdy se plní ochranný prostor a odtok z nádrže lze ovládat podle aktuálního stavu. Po naplnění ochranného prostoru však takové řízení ztrácí praktický smysl.

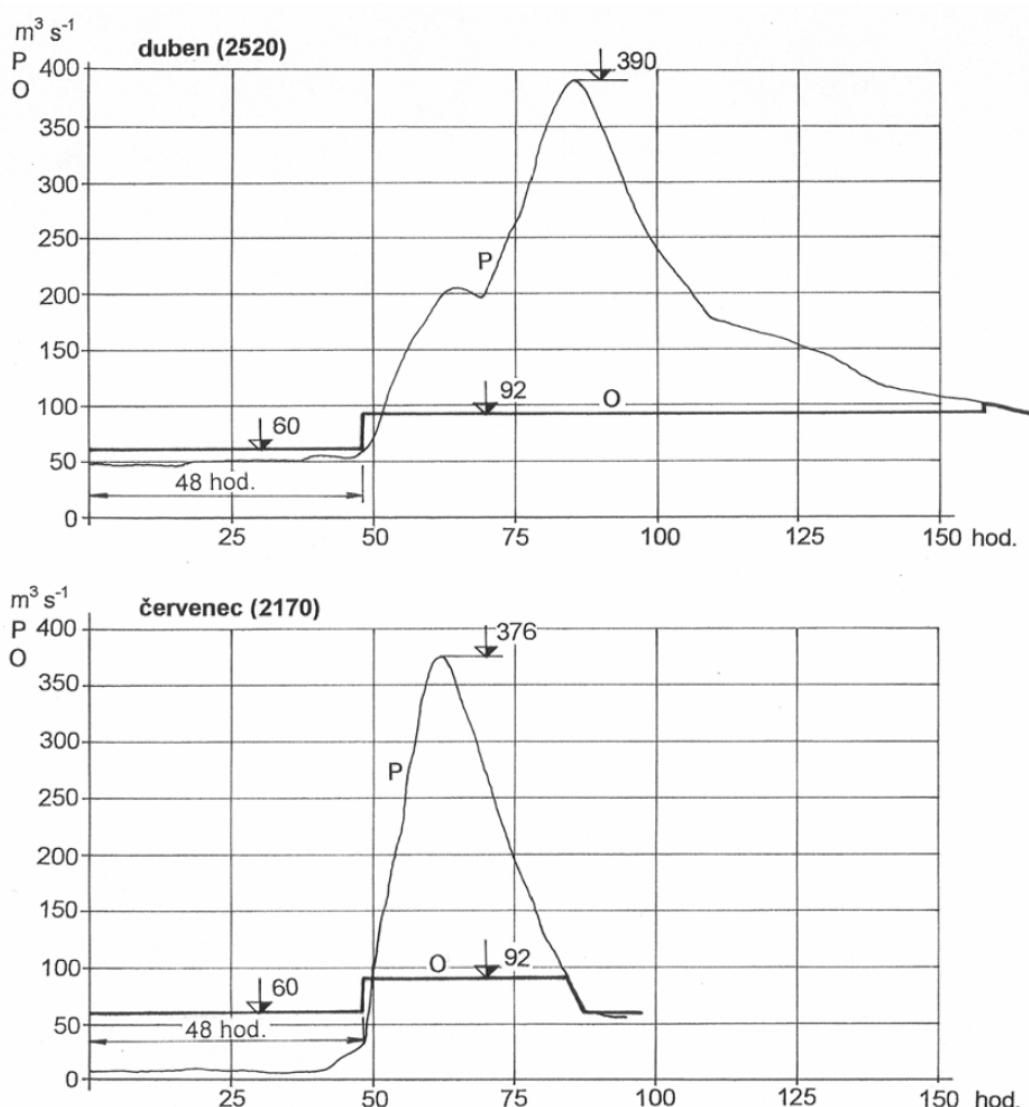
Na obr. 5 jsme záměrně vzali tytéž dvě vlny a zkoumali jsme účinek předvypouštění a regulace neškodného odtoku na transformaci vln. Protože začátek žádoucího předvypouštění nelze v podmínkách neurčitosti stanovit exaktními postupy, odhadli jsme ho jako dobu dvou dnů (48 hodin) před prvním překročením neškodného odtoku $60 m^3 s^{-1}$ přítokem do nádrže. Po uplynutí této doby jsme pak zvýšili odtok rovnou na přípustnou hodnotu $92 m^3 s^{-1}$ (hltnost dvou turbín). Dostali jsme zajímavé výsledky. Ukázalo se, že obě opatření jsou natolik účinná, že kulminace se snížily u obou povodní až na zvýšený neškodný odtok $92 m^3 s^{-1}$ (u povodně z dubna (2520) až na zcela zanedbatelné překročení $O_{neš}$ na konci sestupné části).

⁴⁾ Roky s výskytem povodně se číslují podle pořadí v syntetické řadě, s reálnými roky nesouvisejí. Uvádějí se proto v závorce.

Analýza těchto případů však vyvolává přinejmenším dvě hlubší otázky. První: podle jakého kritéria rozhodnout o začátku předvypouštění, zejména pak u letních přívalových povodní, kdy se před jejich nástupem nemusí vyskytovat výrazně zvýšené přítoky do nádrže, které by nasvědčovaly vývoji extrémní povodňové situace. To dobře ukazuje obr. 5 (dole), kde zvýšené přítoky se objevily až před samotným začátkem vzestupné větve povodně a případné předvypouštění tu nemusí být už účinné. Opačná situace vznikla u zimní povodně z dubna (2520), která se vyvíjela z dlouhodobě zvýšených přítoků do nádrže a předvypouštění tu proto nepřineslo výrazný efekt. Přesto se podařilo její regulaci úspěšně zvládnout účinkem téměř troj-

násobně většího ochranného prostoru v tomto ročním období.

Druhá principiální otázka: jestliže v podmínkách stochastické neurčitosti je odhad začátku předvypouštění obtížný a nejistý, pak tuto neurčitost lze podstatně snížit zvětšením ochranného prostoru nádrže (hlavně v letním období). Při povodni v červenci (2170) se podařilo uvolnit předvypouštěním 8,698 mil. m^3 zásobního prostoru, tj. 72,1 % dosud vymezeného ochranného prostoru 12,056 mil. m^3 . Pro zachycení povodňové vlny tak bylo k dispozici celkem 20,754 mil. m^3 a kulminace byla snížena až na odtok $92 m^3 s^{-1}$ oběma turbínami elektrárny.



Obr. 5. Transformace povodňových vln se stoletými kulminacemi při regulaci neškodného odtoku z nádrže a při předvypouštění.
Fig. 5. Flood routing with the 100-year's peak flows during the regulation of harmless outflow and timely predischarge from the reservoir.

Tyto výsledky analýzy jsou zajímavé a kvantitativně potvrzují provozní zkušenosti, podle nichž lze získat předvypouštěním a regulací odtoku hlavně na počátku povodně dosti značné snížení kulminačních průtoků. Pokusili jsme se proto tyto výsledky rozšířit na další syntetické povodňové vlny a získat tak jistý intervalový odhad transformovaných kulminačí, které lze očekávat v reálných podmínkách.

Výsledky řešení jsme shrnuli v tab. 2. Pro snazší porovnání s předchozími studiemi jsme ponechali číslování syntetických povodňových vln a také hodnoty snížených kulminací bez předvypouštění a řešených za původního předpokladu ponechání neškodného odtoku $60 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ v průběhu celé povodně. Při 7 vlnách v letním období se podařilo během 48 hodin předvypustit $4,313\text{--}9,475 \text{ mil. m}^3$ zásobního prostoru a kulminace snížit na $92\text{--}237 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. Při 5 vlnách v zimním období se pak podařilo předvypustit až $7,294 \text{ mil. m}^3$ (z toho ve dvou případech nebylo třeba předvypouštět, protože zvětšený zimní ochranný prostor zvládnl transformaci vlny až na $O_{\text{nes}} = 60 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$). Kulminace v ostatních třech případech byly sníženy na $92\text{--}125 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. Význam předvypouštění je z toho zcela zřejmý.

Zajímavá je též geneze jednotlivých případů. Uvedeme tu krátce jen tři charakteristické generované vlny, které dobře ukazují průběhy celé povodňové situace a možnosti jejího řízení. Situace v srpnu (1988) se vyvíjela z dlouhodobě zvýšených (nadprůměrných) přítoků do nádrže, takže předvypouštěním se získal jen malý prostor pro zachycení nástupu vlny. Pak nastal rychlý (přívalový) vzestup přítoků do nádrže, povodeň kulminovala za necelý den po překročení neškodného průtoku $60 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. Tato vlna tak byla v celé dvanáctici zkoumaných vln se stoletými kulminacemi nejnebezpečnější, kulminace se snížila jen na $237 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$.

Druhá nejnebezpečnější vlna ve vybraném souboru se vyskytla na konci zimy v roce (2118). Povodeň opět vznikla po výrazně zvýšených přítocích do nádrže před jejich vzestupnou větví, kdy předvypouštění $60 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ nemělo význam a v modelovém řešení jsme zvolili rovnou zvýšený odtok $92 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. V reálných podmínkách však lze rozhodnout o předvypouštění na podkladě odhadu sněhových zásob v povodí a v dostatečném předstihu. Tím lze zmenšit nebezpečí povodňových škod. Proti letním povodním je tu příznivější situace v tom, že v nádrži je v zimním období vymezen podstatně větší ochranný prostor.

Jako třetí charakteristický případ lze uvést letní povodeň z roku (2240). Předcházelo jí dlouhé ob-

dobí minimálních průtoků, které nenasvědčovaly vzniku povodně. V praxi tak může vzniknout otázka, na kterou jsme již upozornili, proč a kdy začít s předvypouštěním. V našem modelovém případě se podařilo předvypustit (v důsledku minimálních průtoků) poměrně značný objem $8,500 \text{ mil. m}^3$, který tak vydatně přispěl k zachycení přívalu a k snížení kulminace až na neškodný odtok $92 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. Tab. 2 však též ukazuje, že samotný letní ochranný prostor $12,056 \text{ mil. m}^3$ by tuto povodeň nezvládnul, kulminace by se snížila jen na $300 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. Tento příklad dobře ukazuje nebezpečí letních povodňových vln a nejistotu s předvypouštěním, kterou lze však řešit zvětšením ochranného prostoru.

Dopady předvypouštění na ochranný účinek nádrže lze samozřejmě studovat i na jiných N -letých povodňových vlnách. Na obr. 6 uvádíme jen jeden zajímavý příklad syntetické vlny s 50-letou kulminací. Vlna se v tomto případě vyvíjela ve dvou navazujících epizodách. V první epizodě se průtoky zvyšovaly pozvolna a blížily se neškodnému průtoku $90 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, v druhé (hlavní) epizodě však kulminace dosáhla $307 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. V daném případě lze získat největší ochranný účinek (a to i z hlediska stability odtoku) tak, že odtok $60 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ se předvypouští jen do přítoku rovného tomuto odtoku. Pak se odtok zvýší na $92 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, a tento odtok se udržuje až do konce průběhu vlny. Je zřejmé, že regulační možnosti se zvětšují se zmenšující se N -letostí povodňových vln.

Podle současně platného manipulačního řádu vodního díla Lipno (změna schválena 23. 11. 2005) byl vymezen v nádrži Lipno I ochranný prostor $33,156 \text{ mil. m}^3$ po celý rok a neškodný odtok se uvažuje $90 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$. Při překročení odtoku $60 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ z nádrže Lipno II se musí informovat povodňová komise. V naší studii jsme proto řešili ochranný účinek nádrže i pro upravenou velikost ochranného prostoru a porovnali ho s předchozími výsledky.

Výsledky v tab. 3 se liší od výsledků v tab. 2 větším ochranným účinkem v letním období, což je logické. Do řešení jsme přitom nezahrnuli zmenšení neškodného odtoku na $90 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, které má na plnění ochranného prostoru nepatrný vliv (při $2 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$ změna objemu o $0,173 \text{ mil. m}^3/\text{den}$).

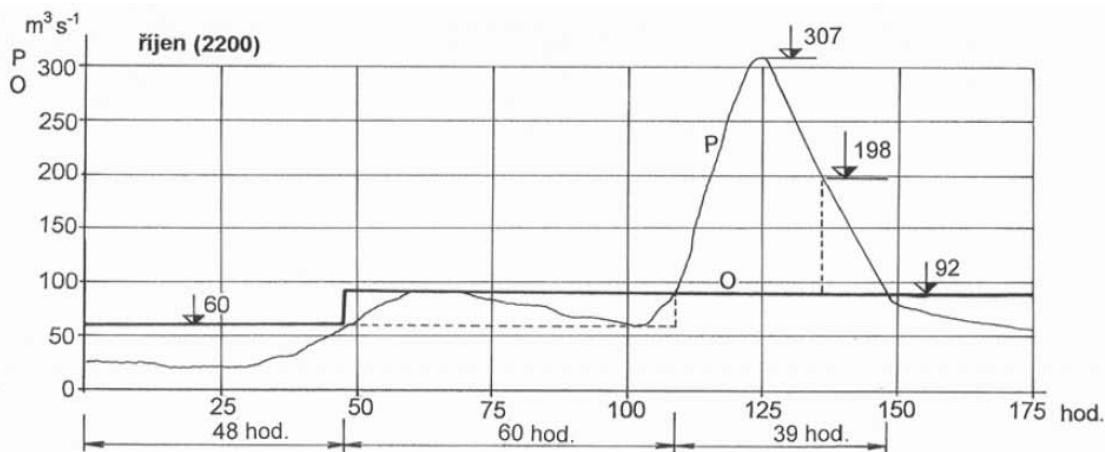
Při původní velikosti letního ochranného prostoru $12,056 \text{ mil. m}^3$ se nepodařilo podstatně snížit kulminační průtok bez předvypouštění ani v jedné ze sedmi zkoumaných vln. Pouze při předvypouštění bylo zvládnuto šest vln až na neškodný odtok. Značné riziko tu však plyne z nejistoty včasného zahájení předvypouštění, jak jsme již uvedli. Tuto

T a b u l k a 2. Ochranný účinek nádrže Lipno v syntetických povodňových vlnách se 100-letými kulminacemi při proměnlivém neškodném odtoku a předvypouštění zásobního prostoru.

Table 2. Flood protection effect of the Lipno reservoir in synthetic flood waves with the 100-year's peak flow at the variable harmless discharge and timely pre-discharge from the reservoir.

Pořadové číslo ¹⁾	Výskyt povodně ²⁾	P_{\max} [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]	O_{\max} [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] bez předvyp. ³⁾	O_{\max} [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] s předvyp. ⁴⁾	Ochranný prostor ⁵⁾ [mil. m^3]	Předvyp. zásobní prostor ⁶⁾ [mil. m^3]	Celkový ochranný prostor ⁷⁾ [mil. m^3]	Naplnění celk. ochr. prostoru ⁸⁾ [mil. m^3]
25	8/1988	367	342	237	12,056	4,313	16,369	16,369
26	6/1995	380	325	92	12,056	6,286	18,342	17,194
27	6/2028	394	343	92	12,056	8,834	20,890	18,925
28	3/2118	330	247	125	33,156	6,160	39,316	39,316
29	7/2170	376	329	92	12,056	8,698	20,754	18,169
30	7/2184	384	335	92	12,056	8,406	20,462	18,353
31	7/2196	386	335	92	12,056	9,475	21,531	17,917
32	7/2240	357	300	92	12,056	8,500	20,556	17,060
33	3/2303	361	60	60	33,156	0	33,156	26,604
34	2/2517	383	60	60	33,156	0	33,156	23,652
35	4/2520	390	181	98	33,156	7,294	40,450	40,450
36	12/2572	387	146	92	33,156	5,155	38,311	35,629

Legend: 1 – number, 2 – occurrence of the flood (first number means the months, the second number is the year – occurrence in the synthetic series), 3 – maximum outflow without timely pre-discharge from the reservoir, 4 – maximum outflow with timely pre-discharge from the reservoir, 5 – flood-control storage in the reservoir, 6 – timely pre-discharged volume from the useful storage, 7 – total flood-control storage in the reservoir (5+6), 8 – filling of the total flood-control storage in the reservoir.



Obr. 6. Transformace povodňové vlny s 50-letou kulminací při předvypouštění.
Fig. 6. Flood routing with the 50-year's peak flow at timely predischarge.

nejistotu lze podstatně zmírnit zvětšením ochranného prostoru, při kterém by už nebylo třeba počítat s předvypouštěním. Opatření v novém manipulačním řádu lze proto považovat za správné.

V tab. 3 tak zůstaly jen tři zimní vlny (č. 28, 35 a 36), z nichž byla uspokojivě zvládnuta jen jedna vlna (č. 36) při předvypouštění. Z toho plyne, že s předvypouštěním je účelné uvažovat jako s jedním manipulačním opatřením při mimorádně nepříznivých hydrometeorologických situacích.

5. Diskuse

Studie navazuje na výsledky našeho předchozího výzkumu a zkoumá možnosti regulace povodňových průtoků v nádržích za podpory výpočetní techniky. Vychází z moderní teorie řízení dynamických systémů, uvádí základní typy regulátorů a zkoumá omezující podmínky jejich využití.

Podstatnou otázkou z hlediska případné algoritmizovatelnosti rozhodovacího procesu v extrémních situacích je vztah objemu povodňové vlny a

T a b u l k a 3. Ochranný účinek nádrže Lipno v syntetických povodňových vlnách se 100-letými kulminacemi při proměnlivém neškodném odtoku, předvypouštění zásobního prostoru a konstantním ochranném prostoru.

Table 3. Flood protection effect of the Lipno reservoir in synthetic flood waves with the 100-year's peak flow at the variable harmless discharge, timely pre-discharge from the reservoir and constant flood-control storage in the reservoir.

Pořadové číslo ¹⁾	Výskyt povodně ²⁾	P_{\max} [$m^3 s^{-1}$]	O_{\max} [$m^3 s^{-1}$] bez před-vyp. ³⁾	O_{\max} [$m^3 s^{-1}$] s před-vyp. ⁴⁾	Ochranný prostor ⁵⁾ [mil. m^3]	Předvyp. zásobní prostor ⁶⁾ [mil. m^3]	Celkový ochranný prostor ⁷⁾ [mil. m^3]	Naplnění celk. ochr. prostoru ⁸⁾ [mil. m^3]
25	8/1988	367	92	92	33,156	0	33,156	19,789
26	6/1995	380	92	92	33,156	0	33,156	17,194
27	6/2028	394	92	92	33,156	0	33,156	18,925
28	3/2118	330	247	125	33,156	6,160	39,316	39,316
29	7/2170	376	92	92	33,156	0	33,156	18,169
30	7/2184	384	92	92	33,156	0	33,156	18,353
31	7/2196	386	92	92	33,156	0	33,156	17,917
32	7/2240	357	92	92	33,156	0	33,156	17,060
33	3/2303	361	60	60	33,156	0	33,156	26,604
34	2/2517	383	60	60	33,156	0	33,156	23,652
35	4/2520	390	181	98	33,156	7,294	40,450	40,450
36	12/2572	387	146	92	33,156	5,155	38,311	35,629

Legend: 1 – number, 2 – occurrence of the flood (first number means the months, the second number is the year – occurrence in the synthetic series), 3 – maximum outflow without timely pre-discharge from the reservoir, 4 – maximum outflow with timely pre-discharge from the reservoir, 5 – flood-control storage in the reservoir, 6 – timely pre-discharged volume from the useful storage, 7 – total flood-control storage in the reservoir (5+6), 8 – filling of the total flood-control storage in the reservoir.

ochranného, popř. i povyprázdněného zásobního prostoru nádrže. Menší ochranný prostor se může rychle naplnit při střetu s velkou povodňovou vlnou. Pak nastává prakticky neovladatelný stav a pro manipulace v této fázi nelze předem odvodit algoritmus potřebný pro počítačové řízení. K regulaci za povodňových situací však může vydatně přispět využití zásobního prostoru nádrže. Tento účinek může být, jak známo, zvlášť významný u víceletých nádrží, kde se mohou vyskytnout souvislá několikaletá období povyprázdněného zásobního prostoru. Zmenšuje se tím doba neregulovatelnosti odtoku.

Ve studii jsme věnovali velkou pozornost stochastické neurčitosti při řízení povodňových situací. Na několika příkladech jsme ukázali charakteristické znaky těchto podmínek a především pak jejich dopady na řízení. Současná literatura i zkušenosti z praxe objasňují v této souvislosti význam predikce. Je zřejmé, že tu jde stále o neuzavřený okruh otázek pro další výzkum. Jiným účinným prostředkem ke zmenšení dopadů neurčitosti za extrémních situací je vymezení přiměřeně velkého ochranného prostoru nádrže. Pro vybranou nádrž Lipno na Vltavě jsme zkoumali na podkladě syntetických povodňových vln potřebné velikosti ochranného prostoru. Dostali jsme tak jejich intervalový odhad pro zimní i letní období, který lze podle potřeby snadno zpřesnit podle aktuálních podmínek manipulací (např. podle využití a spolehlivosti predikce, před-

vypouštění, velikosti neškodného odtoku, mezistátních aspektů zvýšení hladiny aj.).

Diskutovat lze o principiálním významu objektivizace, stabilizace a algoritmizace rozhodovacího procesu. Připomeňme si krátce jen jejich podstatu. Objektivizací rozhodovacího procesu se zpravidla rozumí nalezení optimálního rozhodnutí při současném uplatnění všech požadovaných kritérií. Obecně proto jde o vícekriteriální rozhodovací proces. Jeho náročnost se rychle zvětšuje při větším počtu kritérií, omezujících podmínek a při rozsáhlějším systému s mnoha vazbami mezi jeho prvky.

Nejednotné je dosud pojednat stability rozhodovacího procesu. V teorii řízení se stabilita chápe jako základní požadavek na jeho chování, při kterém se systém vrátí po vychýlení vlivem působení různých poruch nebo vlivem změny žádané hodnoty regulované veličiny do původního, popř. nového rovnovážného stavu. Opět tu může jít o náročné modelové řešení při rozsáhlém systému. V literatuře však najdeme i poněkud jiný výklad stability: máme-li řídit např. dvě podobné, ale časově odlehle situace, pak je jistě odůvodněný požadavek i na jejich podobné zvládání.

Algoritmizace rozhodovacího procesu je nepochybně základním krokem při přípravě softwaru pro řízení. Nejobtížnější a někdy i nereálná může být při katastrofálních povodňových vlnách, kdy může nastat neovladatelný stav. Katastrofální povodeň např. z roku 2002 s rozsáhlým územím pod-

vodou a velkými škodami mnohdy vyvolává sklívající obavu z povodní jako zcela neovladatelných a neředitelných jevů. Je však zřejmé, že při menších povodňových vlnách a různých protipovodňových opatřeních lze počítat s jejich řízením i s využitím simulačních modelů. Pro budoucí přípravu programového vybavení se tu přitom nabízí otázka: je možno při predikci povodňových vln na podkladě hydrometeorologických předpovědních modelů využít prvky inteligentního rozhodování odvozeného pro větší regiony?

Otzázkou do diskuse je další postup řešení. Jakkoliv studie přináší nové poznatky, problematika tenuení zdaleka uzavřena. Nedořešené jsou otázky v oblasti matematického modelování (srážkoodtokové modely v systému stanic v rozsáhlých povodích, simulační modely povodňových situací v těchto povodích), zmíněné problémy predikce povodňových vln a jejich vytváření v různých regionech spolupůsobením příčinných fyzikálních faktorů, optimalizační problémy řízení soustavy nádrží v extrémních podmírkách, technické problémy návrhu regulátorů pro řídicí systémy (nejvhodnější typy regulátorů, rozsah jejich funkce, stabilní a robustní regulace). Tyto otázky bude účelné řešit nejlépe individuálně pro jednotlivá vodní díla nebo vodohospodářské soustavy podle konkrétních podmínek jejich operativního řízení a skutečné potřeby.

6. Závěry

Výsledky studie lze shrnout do těchto závěrů:

1. Pro operativní řízení odtoku z nádrží za povodňových situací lze využít teorii automatického řízení dynamických systémů s jistými podstatnými omezeními. Tato teorie důsledně vychází ze vzájemných vazeb řízeného a řídicího systému a hledá na podkladě informace o řízeném systému a jeho okolí takové řízení, při kterém lze dosáhnout požadovaného cíle. Řídicí systém si pak lze představit jako fyzikální realizaci algoritmu řízení. Největším omezením při algoritmizaci řízení jsou stochastické podmínky neurčitosti, kdy předem neznáme budoucí vývoj hydrologické situace a nelze proto exaktně stanovit optimální manipulace. Jiným podstatným omezením je vzájemný vztah objemu povodňové vlny (nad jistým odtokem) a velikosti ochranného prostoru, popř. zvětšeného o povyprázdnený zásobní prostor na počátku povodňové vlny. Při střetu malého ochranného prostoru s velkým objemem povodňové vlny se může tento prostor rychle naplnit a

nastává prakticky neovladatelný stav, pro který nelze odvodit regulační algoritmus.

2. Stěžejní funkci v regulačním obvodu mají regulátory. V metodické části jsme uvedli jejich hlavní typy s matematickým popisem a pro proporcionalní regulátor jsme odvodili akční a řídicí veličiny při povodňovém řízení. Uvedená formalizace je jednoduchá a vychází z elementárních a logických manipulačních pravidel. Složitější může být řešení rozhodovacích pravidel pro rozsáhlejší vodohospodářské soustavy, náročnější podmínky v podpovodí a také návrh optimálního regulátoru z hlediska stability a robustnosti řízení.
3. V aplikační části jsme řešili ochranný účinek nádrže Lipno na horní Vltavě na podkladě souboru 12 vybraných syntetických povodňových vln se 100-letou kulminací. Dospěli jsme přitom k závěru, že pro ochranný účinek nádrže má podstatný význam včasné předvpouštění a zvýšení neškodného odtoku už v počáteční fázi povodně. Těmito opatřeními se podařilo snížit v daném případě kulminace u 9 vln (ze 12 zkoumaných vln) až na odtok $92 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, popř. na základní neškodný odtok $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (podle dřívějšího manipulačního řádu). Tím lze zmenšit škody v povodňových situacích a prodloužit dobu regulovatelnosti odtoku.

Současně s tím jsme prokázali podrobnou analýzou povodňových situací výhodu přiměřeného zvětšení ochranného prostoru nádrže Lipno, címž lze podstatně zmenšit neurčitost rozhodovacího procesu.

4. V problematice povodňového řízení odtoku nádržemi zůstává řada nedořešených úkolů, na které jsme ve studii upozornili. Ve výzkumu bude proto účelné pokračovat.

Poděkování. Studie byla zpracována za podpory grantového projektu GA ČR reg. č. 103/07/1620 „Predikční a simulační modely v teorii operativního řízení vodohospodářských soustav“.

LITERATURA

- DRBAL K. a kol., 1998: Ekologické aspekty ochrany vodního bohatství. [Dílčí úkol 03 VaV/510/3/96 Řešení mimořádných situací pod vodohospodářskými díly.] VÚV TGM, Brno.
- DRBAL K., 1999: Operativní řízení povodňových průtoků v rámci Dyjsko-svratecké vodohospodářské soustavy. [Téze disertační práce.] VUT - fak. stavební, Brno, 16 s. a příl.
- DRBAL K., STARÝ M., 1998: Předpovědní modely a řízení manipulací při povodních. In: Sborník ze 7. symp. Vodohospodářské soustavy. Olomouc, ČVTS, s. 59–68.
- FOŠUMPAUR P., NACHÁZEL K., PATERA A., 2002: Rozhodovací model operativního řízení povodňového odtoku z nádrže. Vodohosp.Čas., 50, č. 1, s. 29–49.

- FOŠUMPAUR P., HOLEČEK M., NACHÁZEL K., 2007 (a): Řešení povodňového řízení odtoku z nádrží v syntetických povodňových vlnách. Část 1: Metodika řešení. *J. Hydrol. Hydromech.*, 55, č. 2, s. 98–107.
- FOŠUMPAUR P., HOLEČEK M., NACHÁZEL K., 2007 (b): Řešení povodňového řízení odtoku z nádrží v syntetických povodňových vlnách. Část 2: Výsledky řešení. *J. Hydrol. Hydromech.*, 55, č. 3, s. 156–167.
- GABRIEL P., 1985: Automatizované systémy dispečerského řízení vodohospodářských soustav. [Etapová zpráva dílčího úkolu SPZV II-5-6/7.] ČVUT-fak.stavební, Praha, 80 s. a příl.
- HAVLENA V., ŠTECHA J., 1996: Moderní teorie řízení. Vyadv. ČVUT, Praha, 291 s.
- HAVLENA V., 2001: Moderní teorie řízení. Doplňkové skriptum. Vyadv. ČVUT, Praha, 189 sliďů.
- HLADNÝ J., BARTÁK Z., 2000: Cestovní zpráva ze služební cesty na Island na mezin. symp. „Extremes of the extremes“, 15.–21. 7. 2000, ČHMÚ, Praha, 8 s.
- HYNIOVÁ K., 2006: Rídící technika. Vyadv. ČVUT, Praha, 151 s.
- KAŠPAREC J., HLADKÝ O., 2008: Integrace řízení stokových sítí a ČOV do centrálního dispečinku. *Vod. Hospodář.*, 58, č. 3, s. V-VI.
- KOLEKTIV: Přečerpávací vodní elektrárna Štěchovice. Historie a budoucnost. Vyadv. KUKLIK pro ČEZ Štěchovice.
- KOTEK Z., VYSOKÝ P., ZDRÁHAL Z., 1990: Kybernetika. SNTL, Praha, 376 s.
- KUKAL J., 2008: Zpracování signálů. *Čas. Automatizace*, 51, č. 4, s. 250–252.
- NACHÁZEL K., 2008 (a): Robustní metody v hydrologii a vodním hospodářství. Část 1: Metody výzkumu. *J. Hydrol. Hydromech.*, 56, č. 1, s. 3–13.
- NACHÁZEL K., 2008 (b): Robustní metody v hydrologii a vodním hospodářství. Část 2: Výsledky výzkumu. *J. Hydrol. Hydromech.*, 56, č. 2, s. 73–81.
- NACHÁZEL K., PATERA A., 1974: Filtrace hydrologických řad. *Vodohosp. Čas.*, 22, č. 6, s. 569–592.
- NEVRIVA P., 1975: Simulace řídících systémů na číslicovém počítači. SNTL, Praha, 136 s.
- SASTRY S., BODSON M., 1989: Adaptive Control, Stability, Convergence, and Robustness. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 377 p.
- ŠULC B., 1999: Teorie automatického řízení s počítačovou podporou. Vyadv. ČVUT, Praha, 154 s.
- ŠVEC J., KOTEK Z. a kol., 1969: Teorie automatického řízení. Tech. prův. sv. 38, SNTL, Praha, 464 s.
- TNV 75 2910, 1997: Manipulační řady vodohospodářských děl na vodních tocích. Odvětvová technická norma vodního hospodářství. MŽP, Praha, 15 s.
- VALENTA P., GABRIEL P., 2002: Matematický model pro operativní řízení labské kaskády. Metodická studie. Hydro-expert, Praha, 75 s.
- ZEMAN V. a kol., 1990 (a): Teorie řízení vodohospodářských soustav. [Záv. zpráva dílčího úkolu SPZV II-5-7/1, svazek 1.] VÚV, Praha, 76 s. a příl.
- ZEMAN V. a kol., 1990 (b): Teorie řízení vodohospodářských soustav. [Záv. zpráva dílčího úkolu SPZV II-5-7/1, svazek 2.] VÚV, Praha, 108 s. a příl.

PROBLEMS OF RESERVOIRS AUTOMATIC CONTROL IN FLOOD SITUATIONS

Karel Nacházel

The aim of this study was to investigate possibilities of the regulation algorithmization of flood discharges in the reservoirs to be utilized in computer-aided automatic decision-making processes. The study is based on the modern control theory of the dynamic systems and it presents the basic methodical approaches to the controllers design of the control systems. As the basic types, the following controllers are presented here: the proportional controller (P), the integral controller (I), the derivational controller (D), and, if need be, their combinations. The mathematical description of the controller functions is provided in Eqs. (1–5). The description of the flood wave control using the proportional controller is also derived.

The algorithmization of the decision-making process during extreme flood situations is a highly difficult task. The substantial bounds of the application of the modern control theory in the given case are above all the stochastic uncertainty conditions, the nonlinear water resources systems, and the uncertainty of prediction. Therefore, the researchers simulated the stochastic conditions by means of a set of synthetic flood waves, for which they derived a mathematical model based on Markov's chains simulating series of precipitation and precipitation-free days in connection with a deterministic rainfall-runoff model (see a previous study by Fošumpaur, Holeček, Nacházel, 2007). An advantage of the simulated courses of the flood waves is that in contrast to the deterministic approach with only one proposed flood wave, it is possible to solve the flood protection effect of the reservoirs in the whole set of waves with different parameters of the given N-year waves (e.g. the volume of the flood wave, its duration, etc.).

The transformation of the flood inflow into the Lipno reservoir on the Upper Vltava River was solved for a set of 12 synthetic 100-year waves. The different variants of each wave were solved with a predischarge from the reservoir before the coming of the flood and with an increased harmless discharge during the passage of the flood. These protection measures have proved to have a substantial impact on the flood protection effect of the reservoir. In some cases, it is possible to reduce the natural (noninfluenced) peak flow down to the harmless discharge (see Tab. 2).

The cardinal question from the perspective of the algorithmizability of the decision-making process in extreme situations is the relation between the flood parameters and the parameters of the flood-control storage, if need be, the predischarged useful storage. Smaller flood-control storage can be quickly filled up at the clash with a large flood wave. Then, the reservoir can get into a non-regulated state and it is impossible to derive the algorithm for the operations ahead of the time. The ope-

Received 16. September 2008

Scientific paper accepted 16. October 2008

rations during the flood situations depend particularly on a timely predischarge from the reservoir. A similar effect can be especially significant at the over-year reservoirs with a continuous period of dry years and partly empty useful storage. Therefore, in this case, the time with the non-regulated runoff is decreased.

This study also investigated the optimum flood-control storage. The solution was based on the synthetic flood waves. The researchers obtained the interval estimation of the value of this flood protection space for the winter and the summer period. This estimation is possible to refine according to actual conditions of operational rules. It appears the prediction uncertainty or the predischarge uncertainty can be decreased by means of the increased protection space in the reservoir.

A broad complex of questions in this field remains open for future research. For instance, an unsolved question is the simulation model of the flood waves for a set of stations in very big basins, the genesis of the flood waves in these basins, the optimal reservoirs control in uncertainty, technical problems of the controller design in uncertainty conditions, etc. Many problems in the theoretical field of systems stability and robustness are presented in the book *Sastry and Bodson, 1989*.

List of symbols

$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ – system matrixes (Eqs. (16), (17)),
 A_R – flood-control storage [mil. m³],

A_Z	– useful storage of the reservoir [mil. m ³],
D	– derivational controller,
I	– integral controller,
P	– proportional controller,
PD, PID	– combinations of the controllers,
$G_D(s)$	– transfer function of the derivational controller,
$G_P(s)$	– transfer function of the proportional controller,
$G_I(s)$	– transfer funktion of the integral controller,
$G_R(s)$	– transfer function of the controller combination,
$L\{ \}$	– Laplace's transformation,
O	– outflow from the reservoir [m ³ s ⁻¹],
O_{nes}	– harmless discharge [m ³ s ⁻¹],
P	– inflow into reservoir [m ³ s ⁻¹],
T_d	– derivational time constant of the derivational controller [s],
W_{PV}	– flood wave volume [mil. m ³],
δ	– Dirac's impulse,
$e(t)$	– regulation error,
r_o	– constant coefficient (value of the transfer function of the proportional controller),
r_1	– derivational constant of the derivational controller [s],
r_{-1}	– integral constant of the integral controller [s ⁻¹],
s	– complex variable,
t, τ	– time (generally),
Δt	– time interval (generally),
$u(t)$	– regulating variable (control input) [m ³ s ⁻¹],
$v(t)$	– random inflow into reservoir (random disturbances) [m ³ s ⁻¹],
$w(t)$	– requested value of the regulated variable,
$y(t)$	– regulated variable,
$y_R(t)$	– actuated variable.