

ŘÍZENÍ NÁDRŽÍ A VODOHOSPODÁŘSKÝCH SOUSTAV V PROSTŘEDÍ MATLAB

Pavel Fošumpaur

ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky

Příspěvek pojednává o využití MATLAB pro optimalizaci strategického a operativního řízení vodních nádrží. Obsahem aplikace je příprava stochastického hydrologického podkladu, optimalizace stochastického simulačního modelu metodami nelineárního programování a povodňové řízení nádrže.

1. Úvod

Řízení nádrží a vodohospodářských soustav patří mezi klíčové problémy naší vodohospodářské praxe. Úloha je zpravidla formalizována pomocí tradičních systémových přístupů [3] a v poslední době také za využití moderních metod umělé inteligence [2] a informačních technologií. Řízení nádrží lze rozdělit na dva základní přístupy, z nichž každý sleduje jiný cíl, což ovlivňuje i jeho následnou definici. Jedná se o strategické a operativní řízení nádrží.

2. Strategické řízení nádrží

Strategické řízení nádrží a vodohospodářských soustav odpovídá na otázku optimálního využití vodních zdrojů v dlouhodobém časovém kontextu ve fázi návrhu (projektu). Do této oblasti patří především nalezení dostatečné kapacity nádrží, aby byly schopny uspokojit všechny odběratele vody s požadovanou spolehlivostí. U již vybudovaných nádrží a jejich soustav se často hledá nejlepší způsob jejich využití, což vede na optimalizaci parametrů manipulací s těmito nádržemi. Strategické řízení má tedy za úkol optimalizovat kvantitativní provoz nádrží z dlouhodobého hlediska a řeší se zpravidla s měsíčním časovým krokem.

Strategické řízení nádrží je dnes již zpravidla řešeno v podmínkách stochastické neurčitosti za využití moderních pravděpodobnostních metod. Hledané řízení je pak získáno optimalizací stochastického simulačního modelu. Nejprve je třeba vyjít z dostupného hydrologického podkladu, který je zpravidla reprezentován časovými řadami průměrných měsíčních průtoků v profilech zadaných nádrží. V současné době máme však k dispozici zřídka více než 50 let pozorování. Situaci navíc značně komplikuje nutnost homogenity a reprezentativnosti vstupního hydrologického podkladu, což žádá např. vyloučit roky s potenciálním ovlivněním lidskou činností. Deterministické řešení nádrží v těchto naměřených (reálných) průtokových řadách je však značně nespolehlivé, protože za celé např. 50-leté období se můžou vyskytnout pouze jedna či dvě sucha, která jsou pro návrh objemu nádrže rozhodující. Z uvedeného důvodu dáváme přednost stochastickému řešení, kdy jsou generovány dlouhé syntetické průtokové řady, např. 500 až 1000 let dlouhé a v nich je teprve řešena zásobní funkce nádrží.

Pro generování syntetických průtokových řad je často používán lineární autoregresní model AR ve tvaru:

$$Q_t = Q_{t-1} \cdot a_1 + Q_{t-2} \cdot a_2 + \dots + Q_{t-k} \cdot a_k + e_t \quad (1)$$

kde Q_t je průtok v kroku t , a_k jsou koeficienty lineární regrese a e_t je náhodná odchylka s normálním rozdělením $N(0, \sigma^2)$. Koeficienty $a_1 \dots a_k$ lze snadno určit řešením soustavy lineárních *Yule-Walkerových* rovnic :

$$\begin{pmatrix} r(0) & r(1) & \dots & r(k-1) \\ r(1) & r(0) & \dots & r(k-2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r(k-1) & r(k-2) & \dots & r(0) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r(1) \\ r(2) \\ \vdots \\ r(k) \end{pmatrix} \quad (2)$$

kde členy $r(0)$ až $r(k)$ jsou autokorelační koeficienty průtokové řady Q . Pro řešení koeficientů a byla sestavena funkce, která využívá již předdefinovanou funkci CORRCOEF a výhody maticových operací v prostředí

MATLAB. Pro generování náhodné odchylky byla použita funkce RANDN. Při generování řad průměrných měsíčních průtoků je třeba řešit systém dvanácti rovnic typu (1) a řady transformovat na některé asymetrické rozložení pravděpodobnosti např. logaritmicko-normální.

Řešení nádrží vychází ze základní diferenciální rovnice:

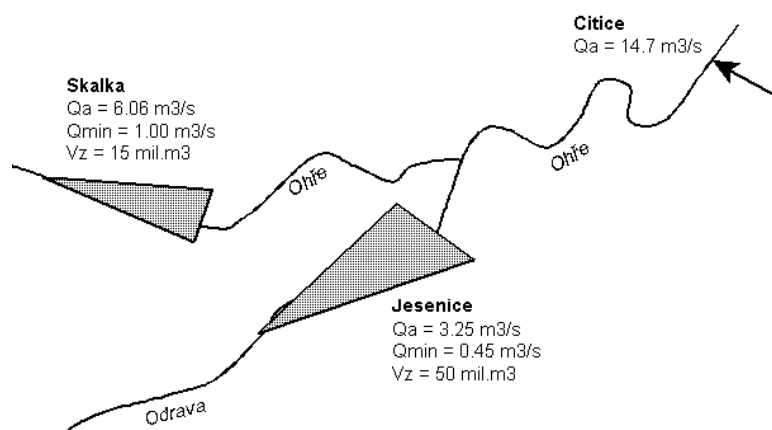
$$\frac{\partial V}{\partial t} = Q(t) - O(t) \quad (3)$$

která vyjadřuje změnu objemu nádrže V podle okamžitého rozdílu přítoku Q a odtoku O v čase t . Při strategickém řízení je však zpravidla krok řízení stejný jako krok použitých časových řad (1 měsíc) a rovnici (3) lze tudíž přepsat do diskrétního tvaru:

$$V_k = V_{k-1} + (P_k - O_k) \quad (4)$$

kdy objem nádrže je počítán postupně bilanční metodou v každém kroku řešení podle daného přítoku a odtoku z nádrže.

Následující příklad popisuje řešení optimálního strategického řízení soustavy nádrží Skalka – Jesenice s kompenzací do odběrného profilu Citice na Ohři (obr.1), řešeného v rámci projektu rekultivace Podkrušnohorské uhelné pánve [5]. Projekt předpokládá postupné zatápění zbytkových uhelných jam vodou. Jedna z variant počítá s dotacemi vody z Ohře, což vede ke zvýšení nároků na stávající vodohospodářskou soustavu a k nutnosti přešetření její optimální funkce.



Obr.1 Schéma soustavy Jesenice - Skalka s kompenzací do profilu Citice

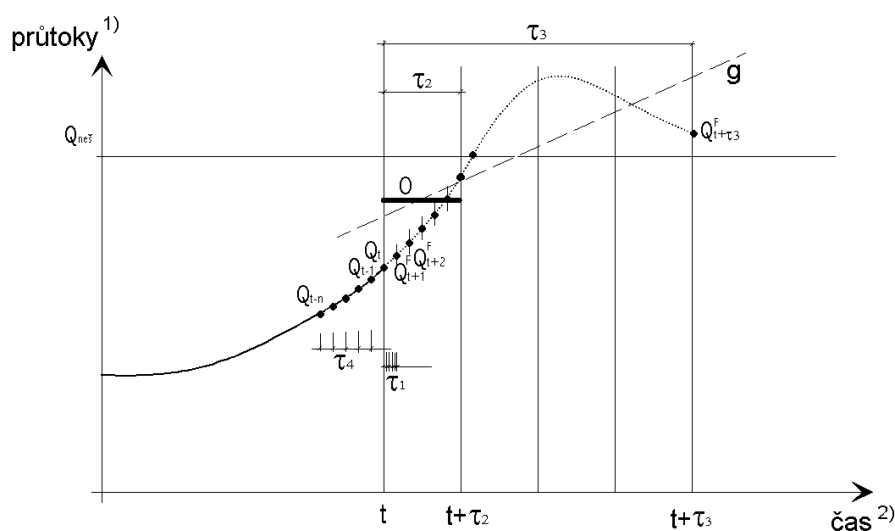
Kritériem optimality je maximální nalepšení Q_n v profilu Citice. Schematizace VH řešení předpokládá zabezpečení Q_n nejprve přítokem z mezipovodí a poté kompenzací z obou nádrží. Neznámou je poměr k v jakém se budou nádrže podílet na zabezpečení dotace přítoku z mezipovodí do celkového nalepšení Q_n . Řešení je provedeno v syntetických 500-letých řadách průměrných měsíčních průtoků a musí splňovat podmínku dodržení zabezpečení dodávky vody a minimálních průtoků pod nádržemi. Volme např. zabezpečení podle trvání $P_i = 99.5\%$. Problém optimalizace společně s omezujícími podmínkami je tudíž formalizován takto :

$$\begin{aligned} \max[Q_n(k)] &= \min[-Q_n(k)] \\ 0 &\leq k \leq 1 \\ Q_{\min}^{\text{Skalka}} &\geq 1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}, \quad Q_{\min}^{\text{Jesenice}} \geq 0.45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \\ P_i &\geq 99.5\% \end{aligned} \quad (5)$$

Optimalizace problému (5) byla provedena pomocí metody sekvenčního kvadratického programování SQP v prostředí MATLAB. Metoda SQP využívá principy nelineárního programování a quasi-Newtonovu gradientní metodu. Algoritmus dospěl po 24 iteracích k optimálnímu rozdělení kompenzačního odtoku mezi oběma nádržemi v poměru 23.6% z Jesenice a 76.4% ze Skalky za celkového nalepšení $Q_n = 5.91 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

3. Operativní řízení nádrží

Operativní řízení se také někdy nazývá řízení v reálném čase a je spojeno převážně s úlohami povodňového řízení nádrží, příp. řízení nádrží v obdobích hydrologického sucha. Řešení těchto extrémních situací vychází ze základních parametrů nádrží získaných ze strategického řízení a je optimalizováno operativními manipulačními zásahy v reálném čase, kdy časová diskretizace řešení je v řádu hodin až desítek minut. Následující příklad uvádí povodňové řízení nádrže Pastviny na Divoké Orlici. Pro operativní řízení nádrže byl využit rozhodovací model [1], který pro rozhodnutí o velikosti vypouštěného odtoku z nádrže v každém kroku řízení za povodně využívá informace o předchozích stavech systému (dynamika), aktuálním stavu a prognózy přítoků do nádrže v nejbližším čase. Schéma modelu je na obr.2.



Obr. 2 Základní schéma rozhodovacího modelu řízení za povodně

Základní rovnice nádrže (3) je řešena v prostředí MATLAB pomocí vestavěného řešitele obyčejných diferenciálních rovnic (ODE solver). Maximální chyba integračního kroku je nastavena na relativní hodnotu 0.1% a na absolutní hodnotu 10^{-6} , což odpovídá výpočetnímu kroku podle obr.2 $\tau_1=1\div 2$ min. Rozhodovací algoritmus pracuje s krokem řízení (control step) τ_2 . Na začátku tohoto kroku je vyhodnocena situace pomocí všech vstupních proměnných a následně je nastavena hodnota odtoku z nádrže O , která zůstává po celý zbytek kroku řízení τ_2 konstantní. Na obr.2 je označen počátek aktuálního kroku řízení jako t . V případě pastvinské nádrže jsme volili $\tau_2=6$ hod, což dobře odpovídá lokálním podmínkám. Řídicí algoritmus používá hydrologickou prognózu přítoku do nádrže, délka předstihu této prognózy je ve schématu na obr.2 vyznačena jako τ_3 . V našem případě jsme volili s ohledem na rozsah a tvar povodí nad hrází předstih předpovědi $\tau_3 = 24$ hod. V obr.2 je symbolem τ_4 označen krok dat, který je v našem případě dán hydrologickými a meteorologickými záznamy a je roven $\tau_4 = 1$ hod.

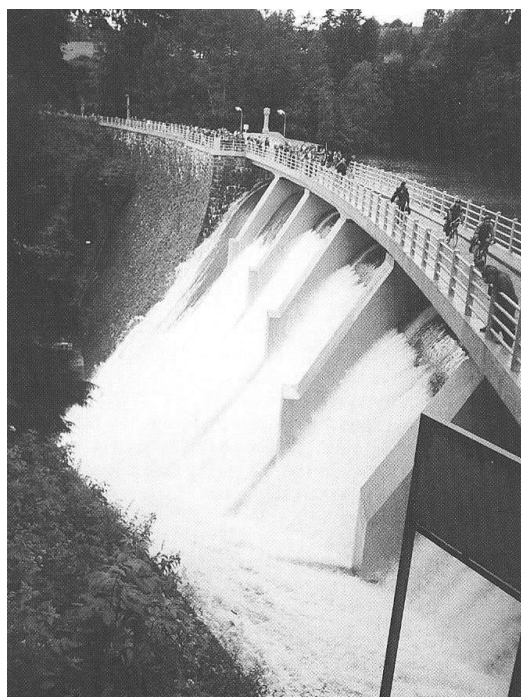
V tab.1 jsou uvedeny vstupní veličiny, které model používá. Na počátku každého kroku řízení jsou vyhodnoceny všechny vstupní parametry včetně prognózovaných přítoků do nádrže. Ty jsou vypočteny pomocí hydrologického modelu Aqualog [4], který rutinně používá Český hydrometeorologický ústav a který je v současnosti kalibrován pro většinu českých toků.

Tab.1 Vstupní veličiny.

Vstupní veličina	Popis	
Q_t	aktuální přítok	stavové veličiny
V_t	aktuální náplň nádrže	
$Q_{t-1}, Q_{t-2}, \dots, Q_{t-n}$	předchozí přítoky	dynamika
$Q_{t+1}^F, Q_{t+1}^F, \dots, Q_{t+\tau_3}^F$	předpovídané přítoky	předpověď
g	strmost předpovídaného hydrogramu	
$Q_{neš}$	neškodný odtok	konstanty
Q_{min}	minimální průtok	

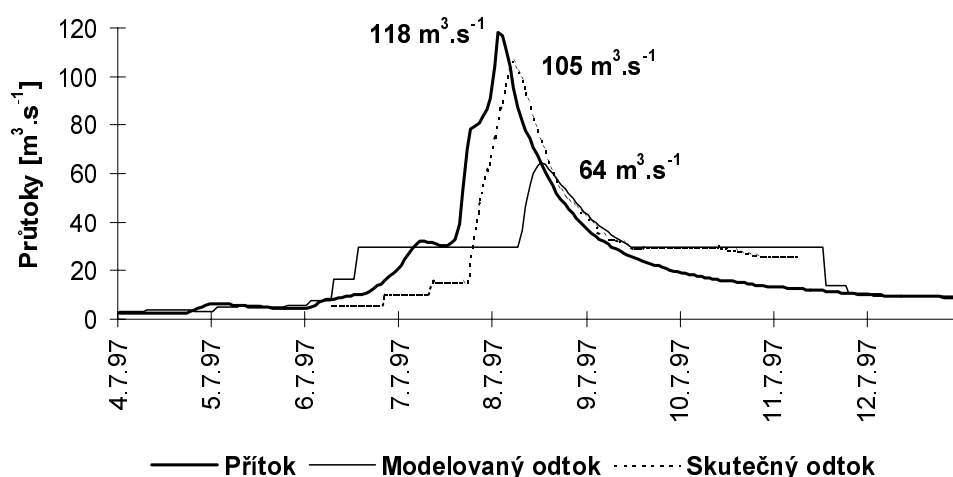
Kalibrace modelu byla provedena pro soubor šesti historických povodní z let 1938 až 2000, které představují dostatečně reprezentativní podklad pro řešení, protože obsahují nejenom malé povodně, ale i 100-letou povodeň z roku 2000. Rozhodovací model má strukturu sekvence podmíněných pravidel typu IF-THEN. Levá strana každého pravidla je tvořena podmínkou, jejíž splnění aktivuje spuštění akce na pravé straně pravidla. Akcí se zde rozumí konkrétní doporučení o velikosti vypouštěného odtoku z nádrže.

Optimalizace řízení je provedena ve dvou nezávislých etapách, kdy v první fázi je optimalizováno řízení velkých povodní s vysokou dobou opakování. Zde je kritériem optimality minimalizace kulminačního odtoku z nádrže během povodně a maximalizace časového oddálení kulminace. Na obr. 3 je zobrazen přepad vody přes přelivy nádrže Pastviny za povodně z roku 1997.



Ve druhé etapě je optimalizováno řízení malých povodní ve snaze jejich včasné identifikace, což zabrání zbytečnému předvypouštění zásobního prostoru nádrže, které s sebou nese snížení spolehlivosti nádrže z hlediska jejich ostatních účelů (vodárenské využití nádrže). Situace byla řešena optimalizací parametru, který popisuje dobu plánovaného doplnění deficitu zásobního prostoru nádrže, jakmile pomine hrozba povodně podle hydrologické prognózy. Pro optimalizaci se využily dva způsoby, jednak se minimalizoval součet kvadrátů odchylek kót hladiny od kóty zásobního prostoru za současného omezení maximální změny vypouštěného množství a jednak se maximalizoval první autokorelační koeficient odtoků vody z nádrže při omezení celkového počtu po sobě následujících dnů s deficitem zásobního prostoru. Úloha byla řešena nelineárním programováním v prostředí MATLAB (algoritmus SQP). Výsledky řešení pro povodeň z roku 1997 jsou uvedeny na obr.4.

Obr. 3 Pastviny – přepad vody přes přelivy za povodně z roku 1997.



Obr.4 Porovnání řízení povodně rozhodovacím modelem se skutečným řízením z roku 1997.

Z obr.4 vyplývá, že rozhodovací model řízení nádrže umožnil podstatně větší redukci kulminace povodňové vlny v porovnání se skutečným řízením na nádrži v roce 1997. Zjištěný výsledek je dán především včasným předvypouštěním zásobního prostoru nádrže na základě prognózované povodně již od ranních hodin 6. července.

4. Závěr

Příspěvek ve stručnosti seznámil s problematikou řízení nádrží a vodohospodářských soustav v podmínkách stochastické neurčitosti a podal souhrn hlavních metodických postupů pro jejich řešení a optimalizaci. Použití programovacího prostředí MATLAB se jeví pro řešení úloh strategického a operativního řízení nádrží jako velice výhodné. Za tímto účelem byla sestrojena vlastní knihovna programů v podobě m-files. Výzkum prokázal význam operativních modelů pro řízení povodňových průtoků na nádržích a jejich výhody oproti empirickému řízení bez modelu, mezi které patří především objektivizace a stabilizace rozhodovacího procesu.

Literatura

- [1] Fošumpaur, P. - Nacházel, K. - Patera, A.: A decision making model for flood control operation, In: sborník příspěvků workshopu: Modern Techniques for dams - Financing, Construction, Operation, Risk assessment, 69. výroč.zasedání ICOLD, Dresden, 2001.
- [2] Nacházel, K.: Neurčitost ve vodním hospodářství, Vodohosp. čas., 47, 1999, č.1, s. 3-25.
- [3] Votruba, L. a kol.: Vodohospodářské soustavy, SNTL, Praha, 1979.
- [4] Zezulák, J. - Krejčí, J.: Návrh softwarové části hydrologického předpovědního systému. In: Sborník referátů Operativní hydrologie a řízení vodohospodářských soustav II. Praha: Centrum pro kontinuální vzdělávání ve vodním hospodářství 1999, C 1-8.
- [5] Výzkumný projekt VaV/510/2/98 MŽP ČR na téma - Vodohospodářské řešení rekultivace a revitalizace podkrušnohorské uhelné pánve, 1998.

Poděkování

Příspěvek byl zpracován s podporou grantů GA ČR reg. č. 103/99/1470 "Extrémní hydrologické jevy v povodích" a reg. č. 103/99/D031 "Aplikace umělé inteligence ve výzkumu extrémních hydrologických jevů".

Kontaktní adresa:

Dr. Ing. Pavel Fošumpaur, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra hydrotechniky
Tháškova 7, 166 29 Praha 6
E-mail: fosump@fsv.cvut.cz