OPERATIVNÍ STOCHASTICKÁ PŘEDPOVĚĎ PRŮTOKŮ PŘI POVODNÍCH

Lucie Březková[1, 2], Miloš Starý[1], Petr Doležal[1]

Abstrakt

Deterministická předpověď průtoků počítaná srážko-odtokovými modely je dnes běžnou součástí hydrologické předpovědní služby v rámci České republiky. Předpověď průtoků slouží během povodní jako podklad při rozhodovacím procesu o realizaci některých protipovodňových opatřeních, jakými jsou například mimořádné manipulace na vodních nádržích.

Příčinou srážku nad povodím lze považovat za náhodnou veličinu, deterministická předpověď průtoků vycházející z jednoho scénáře předpovídaných srážek je proto značným zjednodušením reality. Při tvorbě předpovědi průtoků je třeba postihnout nejistotu vstupních meteorologických veličin, která má podle zkušeností z praxe zpravidla největší podíl na nepřesnosti výsledné předpovědi průtoků při nástupu povodňové vlny.

Příspěvek se zabývá vyjádřením nejistoty předpovědi průtoků v závislosti na nejistotě vstupních meteorologických veličin do hydrologického modelu pomocí metody Monte Carlo, kdy je stochastickým generátorem vytvořen soubor náhodných polí meteorologických veličin (např. srážek) podle předem stanovených parametrů a požadavků. Na základě takové množiny vstupních dat je opakovaně provedena simulace srážko-odtokového procesu. Výsledný soubor scénářů vývoje průtoků je statisticky vyhodnocen. V rámci navrhovaného postupu byl kladen důraz na rychlost výpočtu a možnost operativního využití popsané metody v praxi.

Klíčová slova: stochastické předpovědi průtoků, Monte Carlo, hydrologický model

1. Úvod

Deterministická předpověď odtoku vody z povodí velikosti řádově stovek až tisíců čtverečních kilometrů pomocí srážko-odtokových modelů je dnes v rámci České republiky nedílnou součástí operativní hydrologické služby. Český hydrometeorologický ústav denně vydává hydrologické prognózy délky 48 h pro více než 100 stanic. Základním podkladem pro výpočet hydrologické předpovědi je předpověď srážek (teplot), kterou stanovuje na základě synoptické situace meteorolog. Často je určující meteorologickou předpovědí výstup z numerického předpovědního modelu ALADIN (ALADIN International Team,1997).

Deterministická předpověď průtoků založená na jednom scénáři předpovězených srážek je značným zjednodušením skutečné situace. V prvé řadě nijak nepostihuje neurčitosti, které je nutno nejen při tvorbě – a také při následné interpretaci předpovědi průtoků brát v úvahu. Tato skutečnost má zásadní význam v praxi, kdy je třeba při povodňové situaci činit na základě prognózy průtoků závažná rozhodnutí (např. o stavbě protipovodňových opatření, evakuaci obyvatel aj.).

K tvorbě stochastické hydrologické předpovědi lze přistupovat různým zjednodušeným způsobem. Pro krátkodobou předpověď průtoků délky 48 h lze např. použít více scénářů z různých meteorologických modelů (ALADIN, COSMO, ECMWF aj.). Nedostatek této metody spočívá jednak v nedostatečném počtu scénářů, které by byly operativně přístupné hydrologickým službám, dále pak v neschopnosti postihnout časoprostorovou neurčitost předpovídané veličiny (tzv. problém měřítek, např. 51 scénářů z modelu ECMWF má prostorový krok cca 50x50 km), která hraje v podmínkách ČR značnou roli, neboť povodně vznikají převážně v důsledku intenzivní srážkové činnosti či tání sněhové pokrývky přímo na našem území.

2. Metoda

2.1 Nejistoty při tvorbě hydrologických předpovědí

Při tvorbě operativní hydrologické předpovědi pomocí srážko-odtokového modelu je třeba si uvědomovat, že tvorba předpovědi průtoků probíhá za značně neurčitých podmínek, kterými jsou:

1. *Volba hydrologického modelu* – tzn. použití hydrologických a hydraulických rovnic, parametrizace a koncepčních modelů, které vždy realitu zjednodušují. Tato zjednodušení vyjadřují kromě jiného naši neznalost detailních přírodních podmínek (např. typ půdy, členitost terénu aj.). Především jsou však nutná pro použitelnost hydrologického modelu v reálném čase, kdy je rychlost výpočtu jedním ze směrodatných ukazatelů.
2. *Nejistota vstupních měřených a předpovídaných veličin* daná jednak nejistotou měřených a předpovídaných hodnot, dále zjednodušením vstupní veličiny pro potřeby hydrologického modelování v prostoru, příp. v čase (uvažují se plošně, v případě srážek i časově zprůměrované hodnoty).

V další části se budeme zabývat nejistotou měřených a předpovídaných dat. Tuto nejistotu, zvláště nejistotu předpovídaných dat, nelze přesně kvantifikovat. Pro její vyjádření je možné použít alternativní metody, např. navrhovaný generátor náhodných polí popsaný dále.

2.2 Generátor náhodných polí

Měřená či předpovídaná veličina může být považována za náhodnou veličinu s normálním rozdělením. Protože k dispozici je zpravidla omezená množina měřených dat či předpovídaných scénářů, lze nejistotu takové veličiny vyjádřit pomocí rozšířené standardní nejistoty (±3σ) odhadnuté z rozsahu dostupných dat. (Pozn. Při určování parametru σ lze v případě měřených dat vycházet z historických měření.)

Uvažujme příčinnou srážku nad povodím měřenou v několika srážkoměrných stanicích. Intenzitu srážky měřenou v jedné srážkoměrné stanici lze považovat za náhodnou veličinu s určitým rozdělením. Protože srážka se mění v čase, lze hovořit o náhodném procesu. V rámci srážkoměrné sítě (pole) tvoří jednotlivé stanice s naměřenými údaji náhodné veličiny, které jsou vzájemně korelované (mluvíme o náhodném poli). Nejistotu srážky lze pak vyjádřit pomocí generátoru náhodných polí, který je definován určitými statistickými parametry.

Navrhovaný generátor vychází z těchto předpokladů:

1. Měřená a předpovídaná veličina (reprezentována náhodným vektorem) má normální rozdělení.
2. Nejistota měřené či předpovídané veličiny je vyjádřena pomocí rozšířené standardní nejistoty (±3σ).

Matematický model generátoru vychází z práce (Smith et al., 1979), modifikovaná verze byla použita pro řešení spolehlivosti sypaných hrází (Starý, 1983; Starý, 1985).

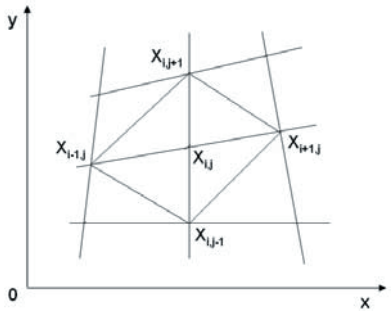
Matematický popis generátoru

Uvažujme rovinnou oblast Ω rozdělenou na trojúhelníky s vrcholy P_1, P_2,...P_n (viz Obr. 1). Podle autokorelační teorie lze psát rovnici:

$$X_{i,j} = a_{i-1,j} \cdot X_{i-1,j} + a_{i+1,j} \cdot X_{i+1,j} + a_{i,j-1} \cdot X_{i,j-1} + a_{i,j+1} \cdot X_{i,j+1} + \varepsilon_{i,j}\,, \qquad (1)$$

Kde značí:

$X_{i,j}$ hodnotu náhodné proměnné ve vrcholech $P_1...P_n$;
$\varepsilon_{i,j}$ normální náhodnou proměnnou;
$a_{i-1,j}$ to $a_{i,j+1}$ autoregresní parametry vyjadřující míru závislosti hodnoty $X_{i,j}$ na okolních hodnotách $X_{i-1,j}$ až $X_{i,j+1}$.



Obr. 1: Schéma oblasti Ω

Rovnici (1) lze psát pro celkový počet n vrcholů jako soustavu n lineárních rovnic:

$$\mathbf{X} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{X} + \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{2}$$

kde značí:
X generovaný vektor náhodné proměnné;
ε normální náhodný vektor;
W matici, která definuje lineární závislost X ve vrcholech $P_1,...P_n$; autoregresní parametry $a_{i,j}$ jsou členy matice W.

Rovnici (2) lze transformovat na následující vztah (viz Starý, 1985):

$$\mathbf{X} = \mu_X + \mathbf{W} \cdot \mathbf{X} + \alpha \cdot \boldsymbol{\varepsilon}, \tag{3}$$

Kde značí α faktor, který zajišťuje požadovanou hodnotu σ[X].

Rovnice (3) může být řešena následovně:

1. Náhodný vektor je generován z normalizovaného normálního rozdělení N(0,1).
2. Podle rovnice (3) dostaneme pak autokorelovaný vektor X s rozdělením $N(\mu_X,\sigma^2_X)$.

Generátor vytvoří autokorelovaný vektor X pro každý časový krok. Vstupní data (časové řady srážek) pro hydrologický model však nejsou korelované pouze v prostoru, ale i v čase. To je možné zajistit např. tím, že se pro všechny časové okamžiky použije stejný náhodný vektor ε, nebo bude tento náhodný vektor v čase měněn jen s malou povolenou odchylkou. Časová korelace vektoru X je pak přibližně zajištěna časově korelovanou řadou středních hodnot μ_X.

Rovnici (1) můžeme psát pro každou stanici *i* v následujícím tvaru:

$$X_i = a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + ... + a_k \cdot X_k + \varepsilon_{i,j}, \tag{4}$$

Kde značí *k* počet okolních bodů vztažených k bodu *i*.

Pokud máme k dispozici dostatečně dlouhou řadu pozorování ve stanicích, lze autoregresivní parametry a_1 až a_k z rovnice (4) určit pomocí *Yule-Walkerových* rovnic:

$$\begin{pmatrix} 1 & r(1) & ... & r(k-2) & r(k-1) \\ r(1) & 1 & r(1) & ... & r(k-2) \\ ... & ... & ... & ... & ... \\ r(k-2) & ... & r(1) & 1 & r(1) \\ r(k-1) & r(k-2) & ... & r(1) & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ ... \\ a_{k-1} \\ a_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r(1) \\ r(2) \\ ... \\ r(k-1) \\ r(k) \end{pmatrix} \tag{5}$$

kde značí:

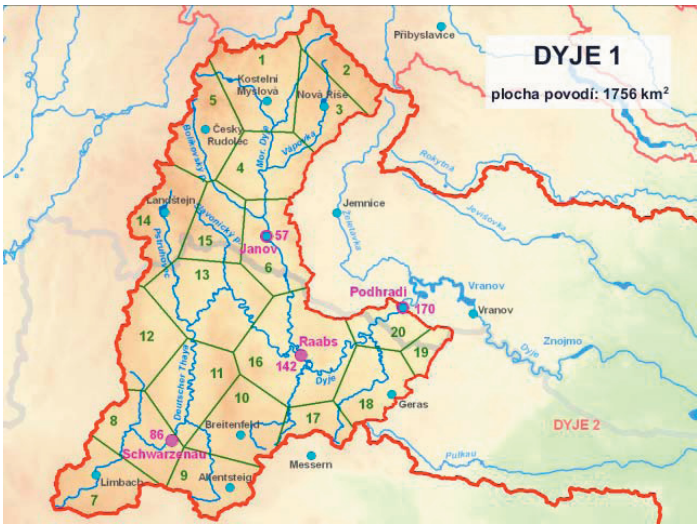
r(1) korelační koeficient stanice *i* a okolní stanice 1,

r(k-1) korelační koeficient stanice *i* a okolní stanice *(k-1)*, atd.

Tímto způsobem získáme *i*-tý řádek matice W. Pokud použijeme rovnici (5) pro výpočet autoregresních parametrů všech srážkoměrných stanic, dostaneme celou matici W. Autoregresní parametry se rovnají nule v případě, že mezi stanicemi není žádná korelace.

Matice W je různá pro různé typy meteorologických situací. V případě stratiformních srážek budou i vzdálenější stanice spolu vzájemně korelovat více, než v případě konvektivních situací. Na základě historických dat mohou být vypočítány různé typy korelačních matic, které se pak použijí pro generování náhodných polí na základě předpovídaného typu situace.

Navrhovaný generátor byl naprogramován v prostředí Delphi. Byl testován na horní části povodí Dyje po profil Podhradí (viz Obr. 2), kde je od roku 2003 v operativním provozu předpovědní hydrologický model HYDROG.



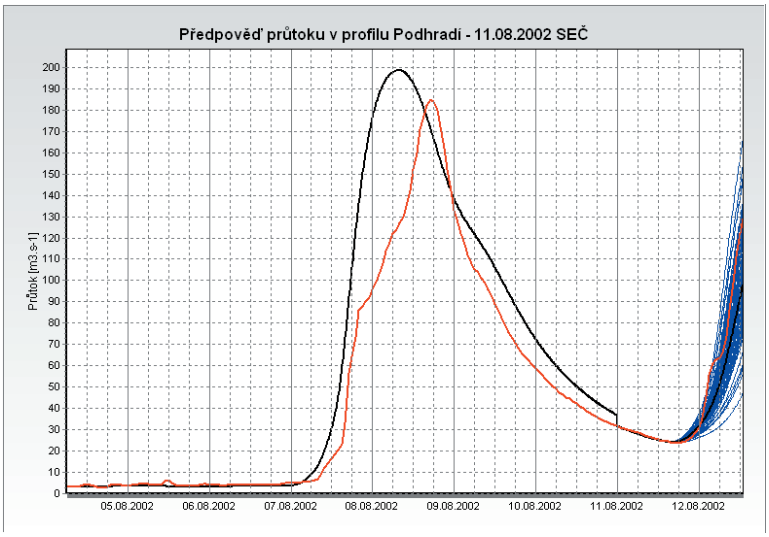
Obr. 2: Schéma povodí Dyje po profil Podhradí. Plocha povodí činí 1756 km^2.

3. Aplikace

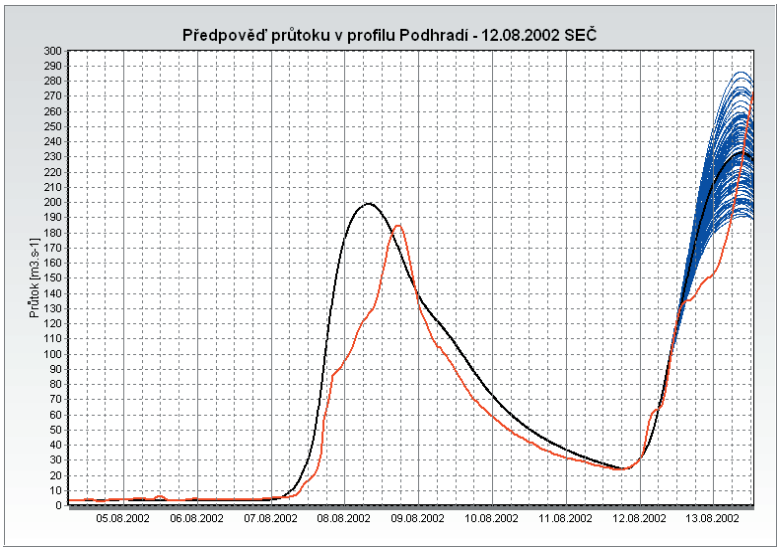
Pro potřeby hydrologického modelu je povodí Dyje rozděleno na 20 polygonů, pro které jsou vstupní meteorologické veličiny (např. srážky) uvažovány jako plošně konstantní. Pro testované povodí byla vypočítána na základě historických dat za období 2002-2009 (kvantitativních odhadů srážek získaných pro jednotlivé polygony kombinací radarového a srážkoměrného měření – viz Šálek et al., 2004) korelační matice W.

Pro testování generátoru byla použita data z povodně ze srpna 2002, kdy kulminační vrchol druhé povodňové vlny překročil v profilu Podhradí 50tiletý průtok. Jako vstupní předpověď srážek byla použita tehdy dostupná operativní předpověď srážek počítána modelem ALADIN, která byla upravena podle předpovědi srážek vydané meteorologem ve službě. Rozšířená standardní nejistota pak byla odvozena z předpovídaného rozpětí srážek.

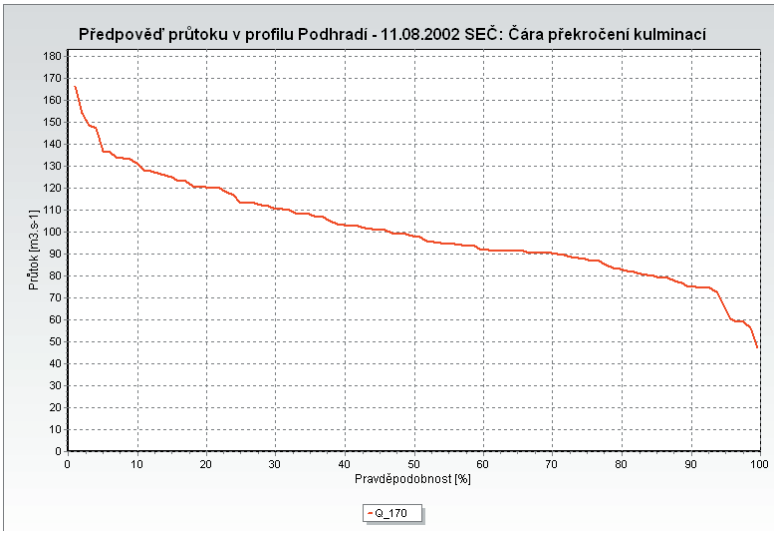
Na základě výše uvedeného byla generátorem vytvořena množina 100 scénářů srážek. Opakovanou hydrologickou simulací modelem HYDROG pak byla získána množina předpovídaných průtoků (viz Obr. 3 a 4). Z této množiny je pak možné vypočítat např. čáru překročení kulminačních průtoků za předpovídané období (viz Obr. 5) či čáru překročení předpovídaných objemů odtoku.



Obr. 3: Simulace operativní stochastické předpovědi průtoků. Rozšířená standardní nejistota činila 48 % z průměrné střední hodnoty předpovídané srážky.



Obr. 4: Simulace operativní stochastické předpovědi průtoků. Rozšířená standardní nejistota činila 40 % z průměrné střední hodnoty předpovídané srážky.



Obr. 5: Ukázka vyhodnocení stochastické předpovědi průtoků – čára překročení předpovídaných kulminačních průtoků.

4. Závěr

Navrhovaný generátor umožňuje podle zadaných parametrů výpočet stochastické předpovědi meteorologických veličin, na základě které je pak možné vypočítat s použitím hydrologického modelu stochastickou předpověď průtoků. Metoda je rychlá a v praxi snadno aplikovatelná.

Nepřesnosti v předpovědi průtoků jsou kromě jiného způsobeny z velké části nepřesnou předpovědí časového rozložení dané veličiny (srážky).

Přesto tato metoda umožňuje podat mnohem pravdivější odhad vývoje průtoků než současně používaný deterministický přístup zohledňující pouze jeden (nejpravděpodobnější) scénář předpovídaných meteorologických veličin.

Další práce bude zaměřena na výpočet stochastické předpovědi průtoků v případě tání sněhové pokrývky.

Poděkování

Práce byla vytvořena v rámci projektu 103/07/1620 Grantové agentury České republiky.

Literatura

[1] ALADIN INTERNATIONAL TEAM,1997. The ALADIN project: Mesoscale modelling seen as a basic tool for weather forecasting and atmospheric research. WMO Bulletin, 46, 317-324.

[2] SMITH, L. – FREEZE, R. A.,1979. Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain. Two-dimensional simulations. Water Resources Research, Vol 15, No 6, pp 1543-1559.

[3] STARÝ, M.,1983. Spolehlivost hlinitého těsnění sypaných zemních a kamenitých hrází. [Kandidátská disertační práce]. University of Technology, Brno.

[4] STARÝ, M., 1985. Autocorrelation theory application for the generation of random parameters in discreet points of a plane area. In: *Sborník VUT.* University of Technology, Brno, pp 800-805.

[5] STARÝ, M. – TUREČEK, B. Operative control and prediction of floods in the River Odra basin. In: *Flood Issues in Contemporary Water Management*. NATO Science Series, 2. Enviromental Security - Vol.71, Kluwer Academic Publishers, 2000, pp 229-236, ISBN 0-7923-6452-X

[6] ŠÁLEK, M. – NOVÁK, P. – SEO, D. J., 2004. Operational application of combined radar and raingauges precipitation estimation at the CHMI. ERAD 2004 proceedings, ERAD publication series, Vol. 2, pp 16-20.

Kontakty na autora

1 Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební, Veveří 95, 602 00 Brno, e-mail: stary.m@fce.vutbr.cz, dolezal.p@ fce.vutbr.cz

2 Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno, e-mail: lucie.brezkova@chmi.cz