OPERATIVNÍ ŘÍZENÍ ODTOKU VODY Z POVODÍ ZA POVODŇOVÝCH SITUACÍ

Miloš Starý, Petr Doležal, Helena Králová

V příspěvku jsou uvedeny dílčí výsledky aplikace řídícího algoritmu, založeného na adaptivním principu řízení odtoku vody z povodí, za průchodu povodně. Řídící algoritmus je založen na kombinaci nelineární optimalizace (určení řídícího průtoku) a fuzzy-regulace (určení dílčích řízených odtoků vody z jednotlivých nádrží soustavy). Výpočet byl proveden pro Dyjsko-svrateckou soustavu nádrží pro nádrže Brno, Dalešice, Mohelno, Vranov a Znojmo. Testovanou povodňovou situací je povodeň ze srpna 2002. Minimalizovaným kriteriem optimalizace je součet čtverců odchylek ve vybraných profilech (pod všemi nádržemi a celkový kulminační přítok vody do soustavy Novomlýnských nádrží) nad zadanými hodnotami průtoků. Úloha je zprogramována v prostředí MATLAB.

Klíčová slova: operativní řízení, fuzzy-regulátor, optimalizace

Operativní řízení odtoku vody z povodí za povodňových situací. *The contribution deals with partial results of controlling algorithm application, based on adaptive principle of river basin runoff control during the flood passage. The controlling algorithm is based on combination of non-linear optimization (determination of controlling flow) and fuzzy – regulation (determination of partial controlled water runoff from single reservoirs of the system). The calculation was made for the Dyje – Svratka reservoirs system for Brno, Dalešice, Mohleno, Vranov and Zojmo reservopirs. The tested situation was flood in August 2002. Minimized optimization criterion is square deviation sum in selected profiles (under every reservoir and total culmination inflow into the Nové Mlýny reservoirs system) above given flow values. The task is programmed in MATLAB environment.*

Key words: operative control,fuzzy-regulator, optimization

ÚVOD

Provoz vodních nádrží se v současnosti řídí manipulačními řády, které zpravidla vzcházejí z předem daných návrhových povodňových vln. V reálném provozu se však průběhy povodní mohou značně lišit a mohou být i nepříznivější, než se předpokládá v manipulačním řádu. Řízení proto závisí hlavně na znalostech a zkušenostech dispečera, jeho intuici, spolehlivosti a předstihu předpovědi, spolupráci předpovědní služby s dispečinkem a dalších faktorech, které je třeba průběžně a souhrnně vyhodnocovat a podle toho rozhodovat. Tyto problémy se mohou vyskytovat jak u jednotlivých nádrží, tak u nádrží spolupracujících v rámci vodohospodářské soustavy. Operativním řízením odtoku z jedné nebo několika nadrží pomocí řídících algoritmů je možno zvýšit kvalitu řízení a dosáhnout podstatného snížení extrémních odtoků vody z povodí.

Kromě klasických optimalizačních přístupů ke konstrukci řídícího algoritmu se nabízí možnost využít některou z metod umělé inteligence (UI), které se v teorii řízení dynamických systémů dostávají do popředí pozornosti, např. fuzzy-regulátory. Vždy je však zásadním problémem stanovení průběhu řídicích veličin v návaznosti na měnícím se stavu řízeného systému a případných dalších vstupních veličinách. To platí zejména u povodí s nádržemi, které představují dynamické systémy pracující s výrazným zpožděním. Řídicí průtoky u jednotlivých nádrží je třeba v procesu řízení postupně měnit v závislosti na časově a prostorově se měnících srážkách nad povodím, průtocích vody v říční síti a plnění jednotlivých nádrží.

METODA

Nazývejme, pro zjednodušení výkladu v dalším textu, všechny vstupní veličiny, včetně průběhů srážek minulých, předpovídaných průběhů srážek budoucích a případných dalších informací nutných pro stanovení řídicích průtoků, prostorem vstupů řešení. U složitých vícerozměrných systémů, které představuje povodí s více nádržemi a značným počtem srážkoměrných stanic, je prostor reálných vstupů řešení značně rozsáhlý a často pro subjektivní zásahy do řešení nepřehledný. Proto se nabízí

možnost určovat řídicí veličiny (resp. přímo polohy uzávěrů - akční veličiny) klasickými optimalizačními algoritmy (při zvoleném kriteriu optimalizace, kterým mohou být např. hodnoty kulminačních průtoků ve vybraných profilech říční sítě, které následně minimalizujeme). Přitom řešené budoucí období, ve kterém analyzujeme stav systému, by nemělo být delší než délka předpovědi srážek ve srážkoměrných stanicích. Numerické experimenty prokázaly, že pokud tato relace neplatí, dojde k výraznému poklesu přesnosti řešení. Obdobný postup, ve kterém výsledkem optimalizace jsou přímo polohy regulačních uzávěrů na jednotlivých nádržích, je implementován od roku 1996 v programu HYDROG (Starý, 1991-2005).

Pro využití fuzzy-regulátoru, který byl z metod UI vybrán, byl zvolen postup, kdy relace mezi diskrétními body prostoru vstupů řešení a odpovídajícími řídicími veličinami (odtoky z nádrží) se neřeší předem (řídící plocha). Naopak, v každém rozhodovacím časovém bodě, ve kterém vznikne požadavek na změnu řídicí veličiny, se na základě aktuálního stavu systému a odhadu budoucích přítoků (předpovědi srážek) vypočítají hodnoty řídicích průtoků pomocí optimalizačního algoritmu. Zde je možno využít simulační model s optimalizovanou volbou parametrů, kterými jsou hledané řídící průtoky (transformátor). Součástí tohoto algoritmu je fuzzy-regulátor, který v závislosti na hodnotě řídícího průtoku v každém časovém kroku návazně určuje hodnoty veličiny řízené (řízeného odtoku) a všech dílčích odtoků vody z nádrže. Průběh akčního zásahu a řízených veličin se pak mění téměř spojitě (Starý, 2001).

Uvažujme pro jednoduchost, že budeme řídit tok vody říční sítí v dolní části rozsáhlého povodí s nádržemi. Neuvažujme srážky spadlé na mezipovodí a vliv změny podzemního odtoku. Řízený systém se pak skládá pouze z úseků toků a nádrží. Předpokládejme dále, že budoucí průběh přítoků do systému (okrajová podmínka řešení) v časovém úseku τ lze předpovědět srážkoodtokovým modelem, implementovaným na horní části povodí, tj. na zónu tvorby povodňových průtoků.

Aby bylo možno zkonstruovat řídící algoritmus, je nejprve třeba zvolit model, který umožní simulovat srážkoodtokový proces v uvažovaném schematizovaném mezipovodí. Pro konstrukci modelu byl použit postup aplikovaný již v programu HYDROG. Schematizace je provedena rozdělením na množinu úseků toků a nádrží. Z důvodu nezbytné rychlosti výpočtu je úloha proudění vody úseky toků a celou říční sítí řešena jako jednorozměrná. Na soutocích koryt toků je zachována pouze spojitost průtoků. Pro popis přenosových vlastností je použita kinematická vlnová aproximace (Stephenson, Meadows, 1986). Proudění vody úseky koryt toků je pak popsáno rovnicemi kontinuity např.podle Manninga.

Nádrže jsou v takto zjednodušeném systému jedinými nástroji, kterými je možno měnit průběh toku vody systémem. Jejich přenosové vlastnosti, které při daném plnění nádrže v čase t a přítoku vody do nádrže, jednoznačně určují okamžitou hodnotu odtoku vody z nádrže.

Pro numerické řešení rovnic popisujících tok vody říční sítí je použita jednokroková explicitní diferenční metoda. Pro numerické řešení rovnice popisující průtok vody nádrží je použita metoda Runge-Kutta 4. řádu (Starý, 1990). V říční síti se při spuštění operativního řízení předpokládá ustálené proudění.

Simulovat chování systému představuje řešit evoluční problém. Počátečními podmínkami řešení je průtok vody v říční síti a plnění nádrží v čase $t=0$. Okrajovou podmínkou je časový průběh přítoku vody do vstupních profilů systému.

Vlastní řešení problému je diskrétní simulací spojitého procesu. Procento otevření výpustí nádrže je v každém časovém kroku výpočtu Δt stanoveno pomocí fuzzy regulátoru. Časový průběh celkového a dílčích odtoků vody se tak mění podle aktuální hodnoty parametru - požadovaného řídícího odtoku vody z nádrže.

Je zřejmé, že odtok z nádrže v budoucím období τ závisí při daném časovém průběhu přítoku na počátečním naplnění nádrže, na hydraulických vlastnostech přelivu, na hydraulických vlastnostech spodních výpustí a na jejich otevření. Při uvedených podmínkách a při známé předpovědi přítoku vody do systému pak řízený odtok závisí pouze na poloze regulačních uzávěrů. Jejich polohy mohou být v budoucím období buď konstantní nebo se mohou v čase měnit. Příslušným nastavením uvedených poloh regulačních uzávěrů je tak možno každé nádrži a tím i celému systému (nádrže + říční síť) přiřadit požadované dynamické (přenosové) vlastnosti.

Systém považujme podle klasické teorie regulace za řízený systém regulačního obvodu se systémem řízení on-line. Přítok vody do systému považujme za poruchovou veličinu, požadovaný odtok z nádrží za veličiny řídicí, skutečné řízené odtoky z nádrží za veličiny řízené. Regulační uzávěry

na nádržích (přelivy, spodní výpusti apod.) považujme za akční prvky a jejich nastavitelné polohy pak za veličiny akční. Požadavek na jejich konkrétní nastavení je pak akčním zásahem. Cílem manipulací je co největší snížení kulminačních odtoků z nádrže, resp. snížení kulminačních odtoků v oddáleném profilu v toku pod nádrží. To vede k maximálnímu zploštění povodňové vlny. Kriteriem je součet čtverců odchylek kulminačních průtoků nad zadanými hodnotami průtoků ve vybraných řídících profilech říční sítě, které je minimalizováno.

Vlastní konstrukci řídícího algoritmu lze rozdělit na dvě dílčí úlohy. ***První úlohou*** je volba takového typu regulátoru, který bude schopen při zadaném požadovaném průběhu řídicí veličiny a spojitě se měnícím stavu nádrží v diskrétních časových krocích postupně určovat hodnoty změny veličiny akční (změna nastavení uzávěrů) při dostatečné stabilitě regulačního pochodu. Pro tento účel byla ověřena možnost užití fuzzy-regulace. Navržený fuzzy regulátor je typu PI (proporcionálně integrální). Popisující rovnice regulátoru je nahrazena pravidly obsaženými v bázi pravidel ve tvaru:

$$\textbf{if } e=\langle\text{hodnota}\rangle \textbf{ and } \Delta e=\langle\text{hodnota}\rangle \textbf{ then } \Delta u=\langle\text{hodnota}\rangle, \qquad (1)$$

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. V regulátoru je použit fuzzy inferenční systém Mamdani. Defuzzifikace je prováděna metodou středu plochy.

Druhou úlohou je nutnost určení požadované hodnoty řídicí veličiny $w(t)$ pro každou nádrž. Problém se pro budoucí (předpovídané) období τ řeší pomocí simulačního modelu s optimalizovanou volbou parametru. Parametry jsou hledané hodnoty řídicích odtoků u každé nádrže, které jsou pro jednoduchost považovány v řešeném budoucím období τ za konstantní. Pro nalezení optimální hodnoty parametrů byla zvolena jednoduchá mřížková (grid) metoda z oblasti nelineárního programování. Jako kriterium optimalizace byla použita hodnota kulminačního odtoku z nádrže, resp. ve vybraném profilu na toku pod nádrží, která byla minimalizována.

Proces operativního řízení provozu systému za průchodu povodně vychází z požadavku na adaptaci dynamických vlastností systému v závislosti na měnícím se stavu systému a postupně se měnících předpovědích přítoků vody do systému. Je možno jej chápat jako sekvenci rozhodovacích časových bodů, vzájemně posunutých o časový krok $\Delta\tau$, v nichž se opakovaně upřesňuje předpověď budoucího přítoku do systému na období τ. Měřením (výpočtem při simulaci řízení) se vždy stanoví okamžité naplnění nádrží, z předchozího výpočtu se převezme příslušný průběh průtoků v říční síti a následně se optimalizací určí hodnoty řídících průtoků pro jednotlivé nádrže platné pro následující časový krok $\Delta\tau$.

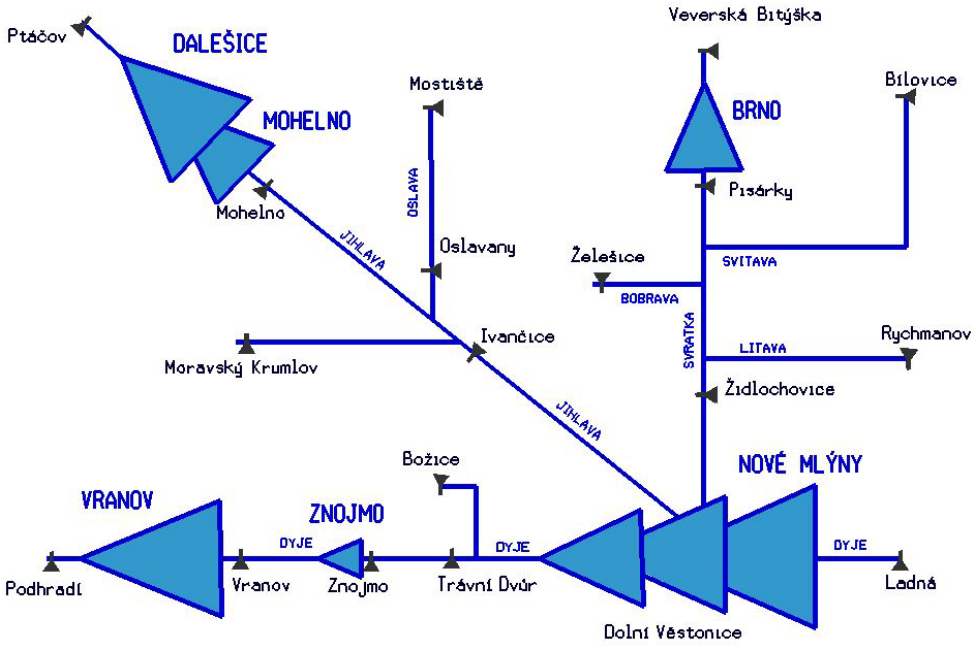
Popsaný řídící algoritmus byly zprogramován v prostředí MATLAB s využitím Fuzzy Logic Toolboxu pod názvem RIZS1. Program umožňuje simulovat operativní řízení odtoku v historickém období (předpovězené přítoky jsou nahrazeny skutečně naměřenými průběhy přítoků vody do systému). Tato verze umožňuje analyzovat vliv délky předpovědí přítoku vody do nádrže na dosažené efekty řízení apod. Vzhledem k tomu, že předpovědi přítoku vody do nádrže v reálném provozu nejsou přesné, je zřejmé určité nadhodnocení dosažených efektů

APLIKACE

Program RIZS1 je v současnosti testován při simulacích operativního řízení průtoků vody v dolní části povodí řeky Dyje. Na obr.1 je uvedena schematizace řešené soustavy. Systém je rozdělen na 44 úseků toků Svratka, Svitava, Litava, Jihlava, Oslava, Rokytná, Dyje a Jevišovka. Systém obsahuje celkem devět přítoků. Je řízen odtok z nádrží Vranov, Znojmo, Dalešice, Mohelno a Brno. Řídícími profily jsou profily těsně pod těmito nádržemi a fiktivní profil, ve kterém jsou sečteny okamžité přítoky do nádrží Nové Mlýny. Řešení je provedeno pro délku předpovědí přítoků vody do systému τ = 72 h. Pro testování byl zvolen časový interval mezi rozhodovacími časovými body $\Delta\tau$ = 12 h (opakovaný výpočet řídících veličin - adaptace).

Ukázka dosažených výsledků simulace operativního řízení za povodňové situace ze srpna roku 2002 je uvedena na obr.2 až obr.4. Na obr.2 jsou zobrazeny celkové přítoky do nádrží Nové Mlýny. Červená čára udává naměřené skutečně dosažené hodnoty, kdy řízení bylo provedeno Povodím Moravy s.p., modrá čára zobrazuje výsledky, kterých bylo možno dosáhnout aplikací popsaného řídícího algoritmu.

Na obr.3 jsou pro přehlednost zobrazeny výsledky aplikace operativního řízení na nádrž Vranov. Jedná se o odtoky spodními výpustmi (sytě červená čára), odtok přes přeliv (šedá čára) a polohy hladiny v průběhu řízení odtoku (černá čára). Na obr. 4 je pak zobrazen celkový odtok z nádrže Vranov (slabě červená čára) a polohy hladiny v nádrži Vranov (černá čára).



Obr.1 Schéma systému

Fig.1 Scheme of the system

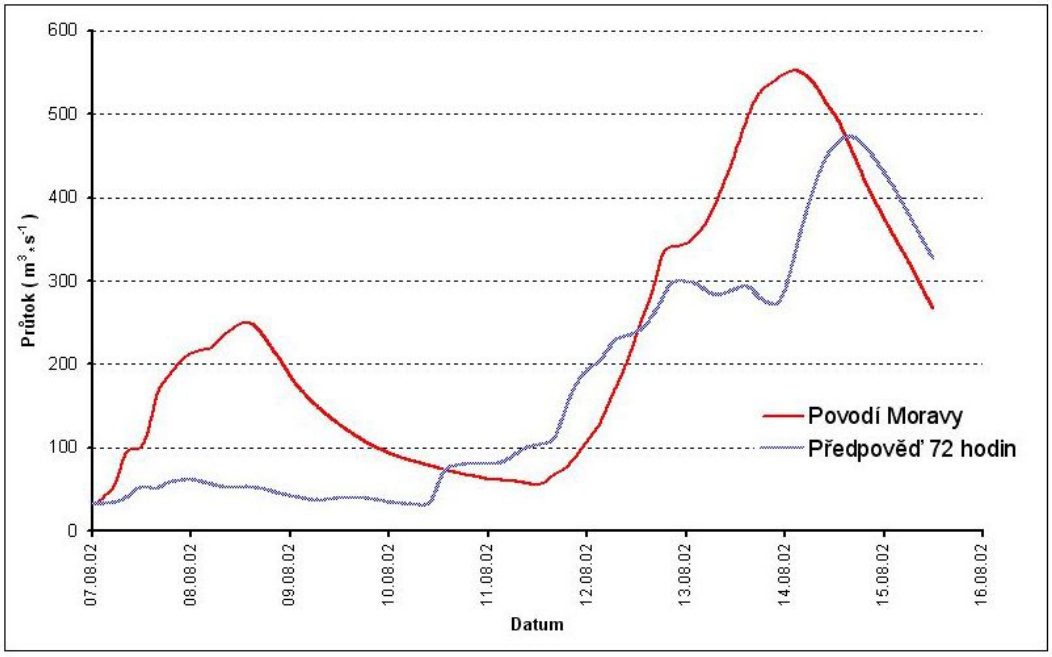
ZÁVĚR

Testovaná úloha prokázala pozitivní vliv operativního řízení na snížení kulminačních přítoků do nádrží Nové Mlýny. Z obr.3 je patrná snaha o předpouštění nádrží. Třídenní předpověď přítoků je však krátká, dochází k předčasnému naplnění retenčních prostorů ovladatelných a k následné transformaci zbývajících částí povodňových vln na přítocích do nádrží pomocí retenčních prostorů neovladatelných. Je zřejmé, že prodloužení předpovědí přítoků vody do systému na pět dnů (např. dva dny ALADIN a tři dny Reading) přispěje k výraznému snížení celkových kulminačních přítoků do nádrží Nové Mlýny.

Zvolený časový interval mezi rozhodovacími časovými body $\Delta\tau = 12$ h (opakovaný výpočet řídících veličin) považujeme za dlouhý. Závisí na možnostech vydávání opakovaných upřesněných hodnot předpovězených přítoků do systému. Výsledky aplikace řídícího algoritmu na méně složitá povodí prokázaly, že zkrácení tohoto intervalu má jednoznačně pozitivní vliv na dosažené efekty. Je proto možno očekávat, že zkrácení intervalu povede k lepšímu vyhlazení řízeného odtoku vody z nádrží, než je patrné z obr.3 a 4. Při použití reálných předpovědí přítoku vody do systému pak považujeme zkrácení tohoto intervalu za nezbytné.

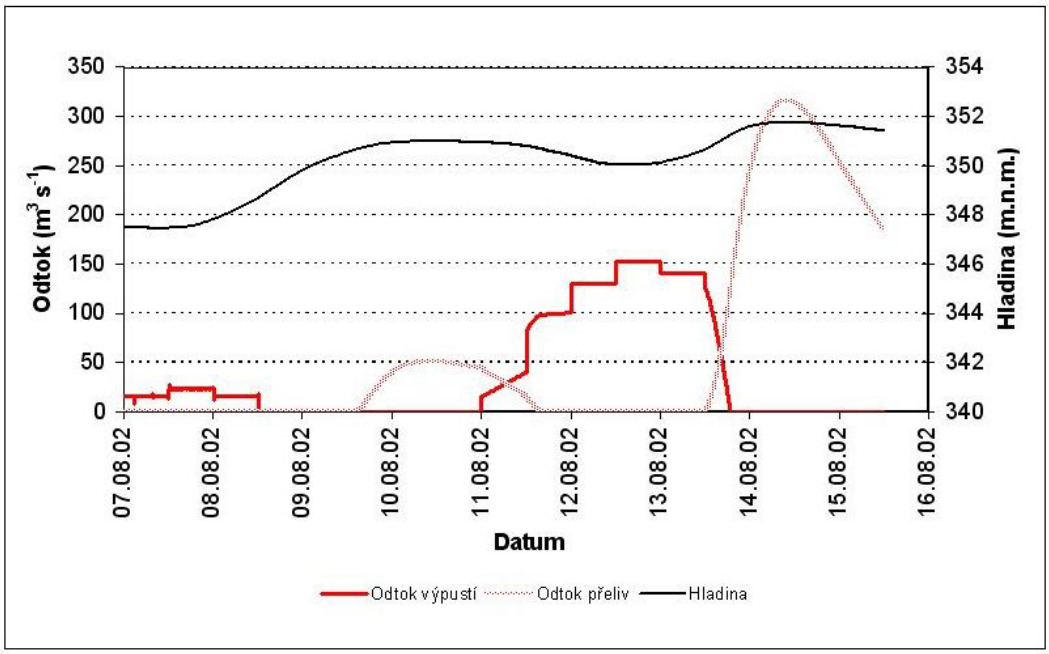
Dosažené výsledky jsou pouze prvním přiblížením v řešení dané problematiky. V současnosti je testován vliv prodloužení délky předpovědí na pět dnů. Prostředí MATLAB je z hlediska užití velice komfortní. Umožňuje do řídících algoritmů snadno implementovat metody umělé inteligence

(fuzzy-regulátory, neuro-regulátory). Sestavené programy jsou však pro vlastní užití pro operativní řízení v reálném čase pomalé. Využít je lze při řízení takto složitých systémů pouze na stupni spřaženosti s řízeným procesem off-line. Nebo je nutno mít k dispozici velmi výkonnou výpočetní techniku, výrazně přesahující možnosti běžného PC. Jiným řešením je, po ověření algoritmů, jejich přepis do jiného vývojového prostředí, resp. programovacího jazyka (např. Fortran, C++).



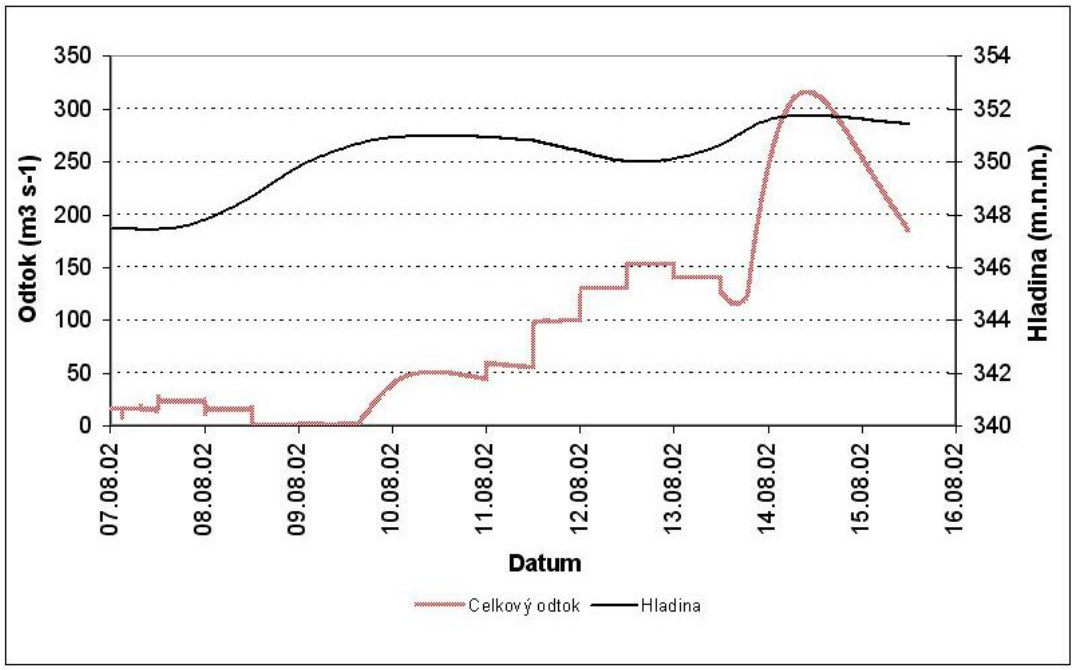
Obr.2 Řízený celkový přítok do nádrží Nové Mlýny

Fig.2 Total controlled inflow into the Nové Mlýny reservoirs



Obr.3 Průběhy dílčích řízených odtoků vody a polohy hladiny (nádrž Vranov)

Fig.3 Courses of the partial controlled outflows and water level position (Vranov reservoir)



Obr.4 Průběhy celkového řízeného odtoku vody a polohy hladiny (nádrž Vranov)

Fig.4 Courses of the total controlled outflow and water level position (Vranov reservoir)

Příspěvek byl zpracován v rámci řešení projektu GAČR: 103/04/0352.
Částečně byly využity výsledky získané za finančního přispění MŠMT, projekt 1M6840770001, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

Literatura

MATLAB, The Language of Technical Computing, The MathWorks, 1984-2005.

Starý, M.: HYDROG. Software pro simulaci a operativní řízení odtoku vody z povodí. Brno, 1991 - 2005.

Starý, M.: Operativní řízení odtoku vody z nádrže za průchodu povodně, MATLAB 2001, Praha, 2001, 6s.

Stephenson, D.- Meadows, M.E., 1986, Kinematic Hydrology and Modeling. Elsevier, Amsterdam – Oxford –New York – Tokyo, 287 p.

Autoři

Miloš Starý, Petr Doležal, Helena Králová, Žižkova 17, 602 00 Brno, stary.m@fce.vutbr.cz