

# PLÁNOVÁNÍ ZAVLAŽOVÁNÍ A SIMULACE ZAVLAŽOVACÍHO SYSTÉMU

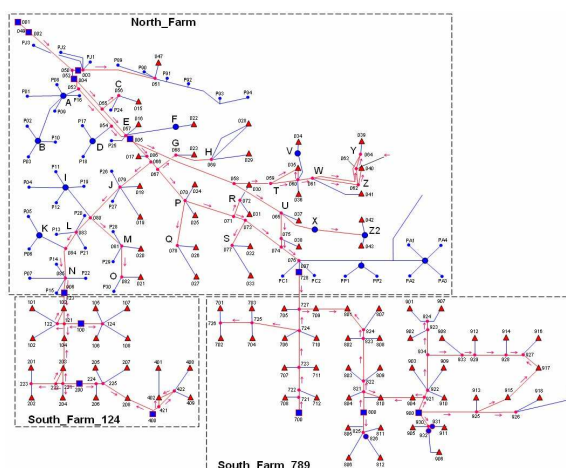
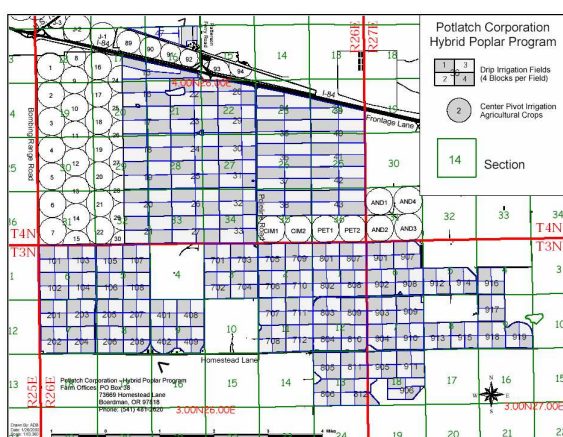
J. Královec<sup>\*+</sup>, P. Horáček<sup>\*+</sup>, K. Stryczek<sup>+</sup>

<sup>\*</sup>ProTyS, a.s., <sup>+</sup>Rockwell Automation

## Abstrakt

Projekt automatického návrhu zavlažovacích plánů a simulace zavlažovacího systému byl vypracován firmou Rockwell Automation pro společnost Potlatch, která vlastní a provozuje jednu z největších zavlažovaných farem pro intenzivní produkci dřeva na světě. Cílem projektu bylo vytvoření programu pro automatickou tvorbu hydraulicky vyvážených cyklických plánů zavlažování a simulačního modelu zavlažovací soustavy.

## 1 Zavlažování topolové plantáže



Obr. 1: Plán topolové farmy (vlevo) a schéma zavlažovací sítě (vpravo).

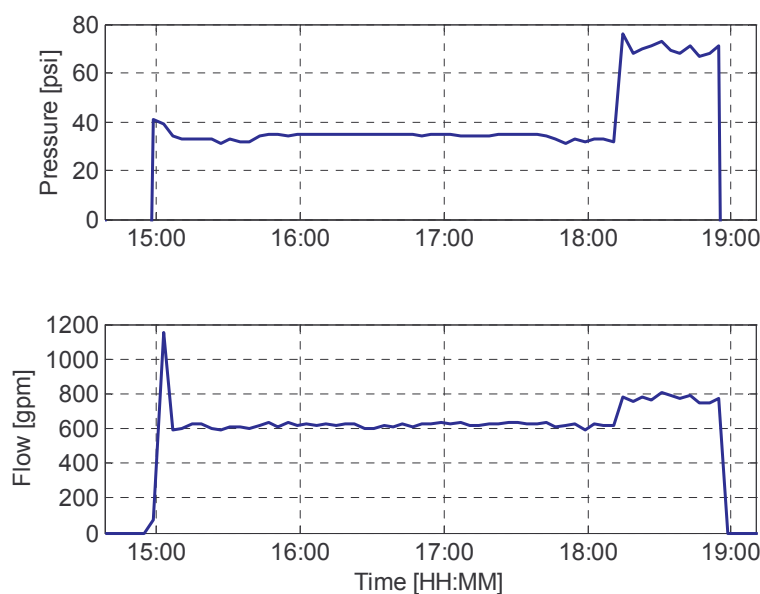
Společnost Potlatch vlastní a provozuje jednu z největších farem pro intenzivní produkci dřeva na světě. Na farmě se pěstují hybridní topoly s jedenáctiletým životním cyklem. Farma se rozkládá na ploše cca 70 km<sup>2</sup> původně pouštního území u řeky Columbia v americkém státu Oregon. Topolová plantáž je rozdělena na 92 polí a je zavlažována pomocí topologicky složitěho systému kapkové závlahy napájeného osmi čerpacími stanicemi o 66 čerpadlech. Plán farmy a schéma zavlažovací sítě jsou na Obr. 1. Každé z polí je rozděleno na čtyři bloky. Distribuce vody do těchto bloků je realizována rozdělovačem potrubí umístěným ve středu pole (viz Obr. 2) a řízena samostatným lokálním automatem pro každé pole. Na Obr. 1 jsou rozdělovače potrubí znázorněny červenými trojúhelníčky.



Obr. 2: Rozdělovač potrubí.

Množství vody pro zavlažování stanovují operátoři pro jednotlivá pole na základě stáří stromů, vlhkosti půdy, předpovědi počasí a jiných hledisek. Množství vody pro jednotlivá pole spolu s dalšími doplňujícími požadavky je vyjádřeno tzv. *obecným rozvrhem zavlažování*. Při zavlažování je dále třeba dodržet řadu omezujících podmínek daných zejména požadavky na zajištění dostatečné závlahy každého z polí, na hydraulickou stabilitu jednotlivých zón zavlažovací soustavy i soustavy jako celku, na zajištění čistoty a průchodnosti zavlažovacího potrubí apod. Příklady takových omezení jsou maximální povolený počet současně zavlažovaných bloků jednoho pole, minimální nutná prodleva mezi začátky zavlažování dvou bloků, minimální prodleva mezi koncem zavlažovacího cyklu a začátkem nového cyklu v jednom bloku atd. Bloky mohou být zavlažovány denně, každý druhý den nebo každý třetí den.

Součástí obecného plánu bývá také tzv. *proplach*, který představuje zvláštní režim zavlažování, kdy se pro požadovaný blok na určitou dobu změnou požadované hodnoty zvýší tlak vody za účelem pročištění zavlažovací trubky. Následkem toho dojde také ke zvýšení průtoku. Proplach je ilustrován na Obr. 3, kde je znázorněn tlak a průtok při zavlažovacím cyklu, na jehož konci byl proveden proplach. Proplach byl spuštěn zvýšením požadované hodnoty tlaku z 35 psi na 70 psi a projevil se nárůstem průtoku z 600 gpm na téměř 800 gpm<sup>1</sup>. S režimem proplachu je též spojena řada omezujících podmínek provozu, např. požadavek, že během proplachu nesmí být zavlažován žádný jiný blok příslušného pole.



Obr. 3: Naměřený průtok pro jeden blok s proplachem na konci zavlažovacího cyklu.

Na základě obecného rozvrhu se vytváří *specifický rozvrh*, který již obsahuje konkrétní časový plán závlah (tedy okamžiky otevření a zavření uzavíracích ventilů pro jednotlivá pole) a zároveň respektuje všechna požadovaná omezení.

Plán zavlažování se cyklicky opakuje s šestidenní periodou, dokud není nahrazen plánem novým, a měl by způsobovat co nejmenší kolísání průtoku na jednotlivých čerpacích stanicích, které dodávají vodu pro zavlažovací soustavu.

Specifické rozvrhy původně vytvářeli operátoři na základě shody obecných rozvrhů s jistými vzorovými řešeními. Tvorba specifického rozvrhu trvala až několik dnů a kromě této časové náročnosti byly navíc výsledné rozvrhy hydraulicky nevyvážené a dokonce ani často nesplňovaly všechny omezující podmínky.

Na konci roku 2005 oslovila firma Potlatch společnost Rockwell Automation, aby vypracovala projekt, jehož součástí by byl program pro automatickou tvorbu specifických rozvrhů zavlažování a simulační model zavlažovací soustavy. Simulační model měl být používán pro účely simulace

<sup>1</sup> Tlak je měřen v jednotkách *psi*. Průtok je měřen v jednotkách *gpm* (galon za minutu).

provozu soustavy v různých režimech, testování plánů zavlažování a měl být navíc začleněn do informačního a řídicího systému farmy, kde by byl provozován paralelně s reálným systémem pro účely online diagnostiky. Výstupy projektu — především program pro tvorbu rozvrhů zavlažování — měly být k dispozici již pro nadcházející zavlažovací sezónu, přičemž zavlažovací sezóna začíná každoročně v dubnu.

Projekt byl zahájen na začátku roku 2006 a významně se na něm podílela česká firma ProTyS, a.s. jako kontraktor společnosti Rockwell Automation.

## 2 Automatické plánování zavlažování — AHBIS Program

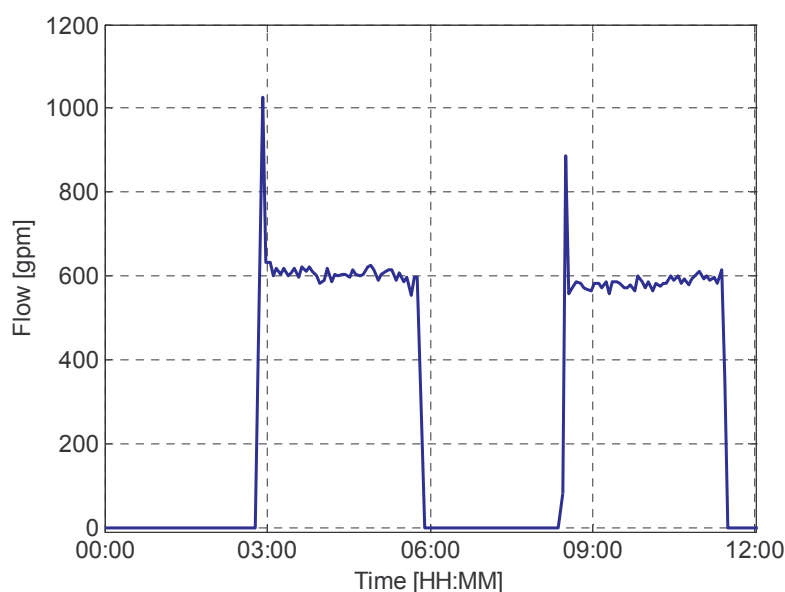
### 2.1 Formulace úlohy

Hledání plánů zavlažování pro danou soustavu a při daných cílech, podmínkách a omezeních představuje optimalizační úlohu cyklického plánování při omezujících podmínkách. Úlohy optimálního rozvrhování se běžně vyskytují zejména při plánování výrobních procesů a pro řešení těchto úloh existuje jak obsáhlá teorie (viz např. [1], [2], [3], [4]), tak komerční programové produkty.

Daná úloha plánování zavlažování se však v mnoha ohledech vymyká běžným formulacím plánovacích úloh, a proto by také použití standardních postupů řešení mohlo být značně problematické a výsledek nejistý. Z toho důvodu byl pro zadanou úlohu vyvinut speciální algoritmus plánování a kvůli snadné a rychlé implementaci byl naprogramován v systému MATLAB.

Zadanou úlohu plánování zavlažování jsme formulovali jako optimalizační úlohu s omezeními, přičemž kritérium kvality bylo stanoveno na základě požadavku „hydraulické vyváženosti“ zavlažování. Tento požadavek znamená, že v každé hydraulické zóně farmy má co nejméně kolísat celkový průtok vody; hydraulická zóna farmy je zpravidla napájena jednou čerpací stanicí. Na základě tohoto požadavku lze jako kritérium uvažovat *rozptyl celkového (nominálního) průtoku vody pro hydraulickou zónu*. Zavlažovací plán bude vytvářen tak, aby bylo toto kritérium minimální.

Při výpočtu nominálního průtoku je třeba brát v potaz jev, ke kterému dochází při otevření zavlažovacího ventilu. Když se blok nezavlažuje (zavlažovací ventil je uzavřen), je zavlažovací trubka prázdná, jelikož voda z ní při uzavřeném ventilu volně vykape. V okamžiku otevření ventilu působí vstupní tlak vody pouze proti tlaku vzduchu uvnitř trubky a tento tlakový spád způsobí výraznou špičku průtoku, která trvá několik minut, dokud se trubka nenaplní. Tento jev je ilustrován na Obr. 4, kde je zobrazen naměřený průtok pro jeden blok; na začátku zavlažovacích cyklů je průtok výrazně vyšší. Plánovací algoritmus musí tyto špičky průtoku zahrnout do výpočtu nominálního průtoku a jeho charakteristik (průměrného průtoku, rozptylu apod.).



Obr. 4: Špičky průtoku na začátku zavlažování.

Při návrhu plánovacího algoritmu bylo třeba splnit následující základní body:

1. Navrhnout zavlažovací plán podle zadání obecného rozvrhu, zejména dodržet počet zavlažovacích cyklů a trvání jednotlivých cyklů pro každý blok.
2. Naplánovat proplach pro bloky, kde je požadován.
3. Zajistit splnění všech omezujících podmínek týkajících se zavlažování i proplachu pro každé pole i každý blok.
4. Minimalizovat rozptyl nominálního průtoku pro celý šestidenní horizont řízení s důrazem na vyvážení průtoku na přelomu dvou dnů a také na přelomu šestého a prvního dne při opakování rozvrhu.
5. Zajistit plynulé navázání nového rozvrhu na starý a zajistit při této změně rozvrhů splnění všech podmínek a omezení. Požadavkem zákazníka byla též možnost „uzamknout“ některé cykly stákeho rozvrhu, použít je beze změny a ostatní cykly doplňovat tak, aby byl rozvrh hydraulicky vyvážený.

## 2.2 Algoritmy rozvrhování

Algoritmus automatického návrhu vyváženého zavlažování, který jsme vytvořili a implementovali, je založen na využití kombinatorického programování a simulační metody Monte Carlo. V principu lze algoritmus rozčlenit do následujících fází:

1. *Vytvoření minimálního rozvrhu* pro daný den. Minimální rozvrh je takový rozvrh, při jehož aplikaci by zavlažování trvalo nejkratší dobu z možných rozvrhů, které splňují všechny požadavky dané obecným rozvrhem a všechny omezující podmínky, a to pro režim zavlažování i proplachu.
2. *Optimalizace minimálního rozvrhu*. Optimalizace se provádí po jednotlivých polích.
3. *Přechod k fázi 1* pro následující den. Všechny zavlažovací cykly, které z aktuálního dne přesáhnou do následujícího, musí být uvažovány v následujícím dni.

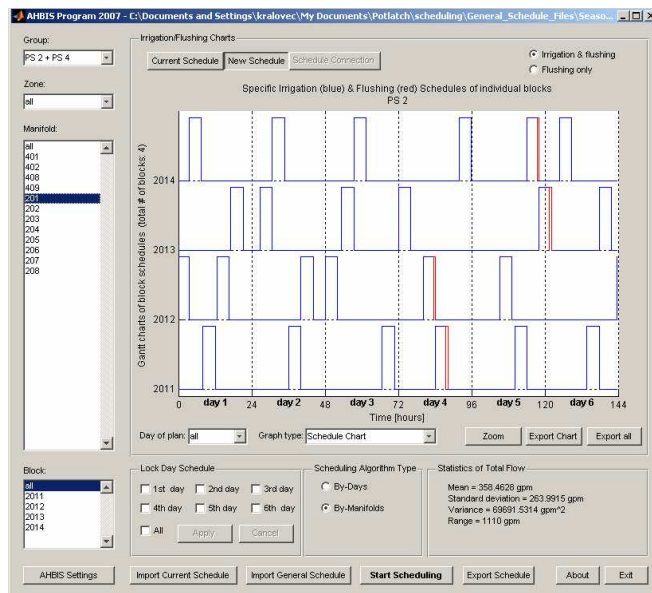
Optimalizace minimálního rozvrhu spočívá v postupné minimalizaci rozptylu celkového nominálního průtoku pro daný den. Pole je rozděleno do čtyř bloků a podle požadavků může být každý z bloků zavlažován v maximálně čtyřech cyklech. Na jedno pole tedy připadá nejvýše 16 zavlažovacích cyklů. Optimalizace rozvrhu se provádí vyhodnocením, který ze zavlažovacích cyklů by mohl být naplánován tak, aby nejvýznamněji přispěl k minimalizaci aktuální hodnoty rozptylu nominálního průtoku. Po naplánování vybraného cyklu se stejným způsobem vyhodnotí zbývající cykly až do vyčerpání všech cyklů. Optimalizace se tedy provádí jednodukově. Během optimalizace je navíc zajištěno, aby nedošlo k porušení žádné z omezujících podmínek, a to eliminací množiny možných časových okamžiků, na které lze zavlažovací cyklus naplánovat.

Časová náročnost algoritmu závisí především na počtu cyklů v jednotlivých blocích a na volbě parametrů plánovacího algoritmu. Řádově trvá vytvoření rozvrhu zavlažování pro celou farmu několik minut až několik desítek minut.

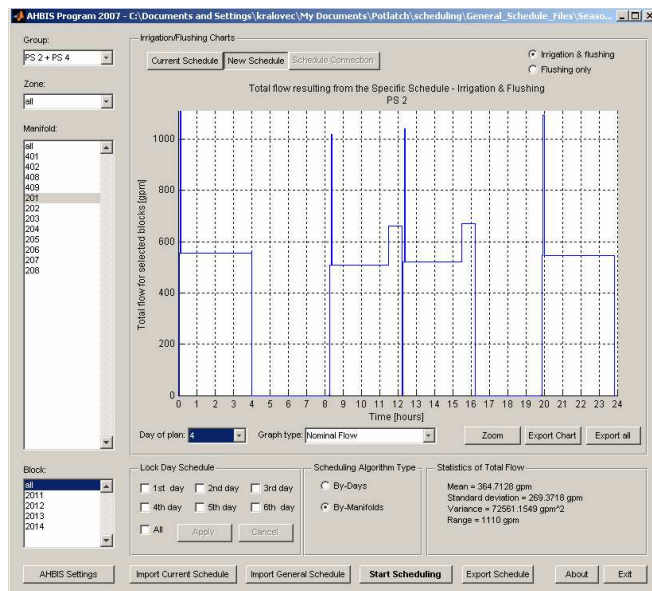
## 2.3 AHBIS Program

Algoritmus automatického návrhu vyváženého zavlažování jsme implementovali v systému MATLAB jako jádro aplikace *AHBIS Program* (Advanced Hydraulically Ballanced Irrigation Scheduling Program).

AHBIS Program se ovládá přes grafické uživatelské rozhraní a obsahuje řadu funkcí pro práci s vytvořenými zavlažovacími plány, zejména grafické funkce (zobrazení rozvrhu ve formě Ganttova diagramu, zobrazení nominálního průtoku nebo graf současně otevřených ventilů, a to pro libovolnou skupinu polí a libovolný den), export grafů, export rozvrhu ve formátu csv nebo xls, možnost uzamykání starých rozvrhů vybraných bloků, nástroj pro editaci struktury farmy, statistické vyhodnocení rozvrhu atd.



Obr. 5: Hlavní okno aplikace AHBIS Program s vyobrazením Ganttova diagramu pro zvolené pole.

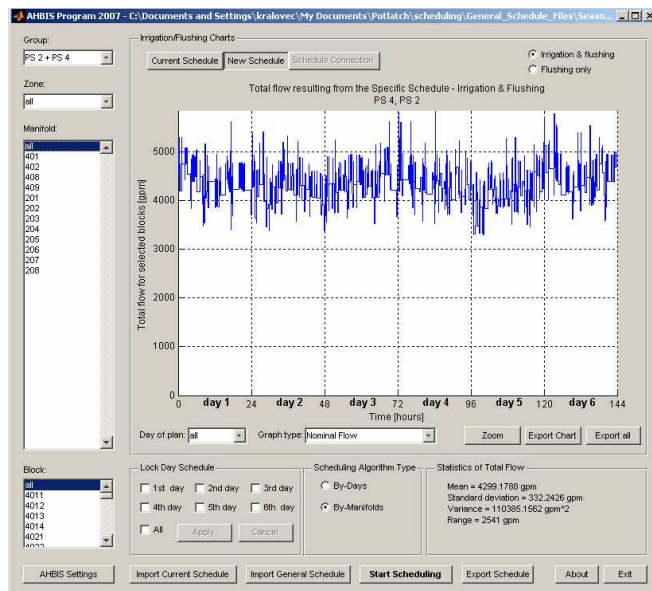


Obr. 6: Zobrazení nominálního průtoku pro dané zvolené pole a den.

Obr. 5 ukazuje hlavní okno aplikace AHBIS Program s Ganttovým diagramem rozvrhu pro zvolené pole. Standardní zavlažování je znázorněno modře, režim proplachu je znázorněn červeně. Obr. 6 ukazuje nominální průtok pro dané pole a zvolený den. V grafu jsou dobře patrné špičky průtoku na začátku zavlažovacích cyklů, jejichž příčinu jsme popsali v části 2.1. U druhého a třetího bloku je navíc patrné zvýšení průtoku na konci cyklu, kdy je plánován proplach. Na Obr. 7 je vyobrazen vyvážený nominální průtok pro celou hydraulickou zónu.

## 2.4 Zhodnocení výsledků

AHBIS Program byl dodán společnosti Potlatch a již dvě zavlažovací sezóny (2006 a 2007) sloužil jako standardní nástroj pro tvorbu zavlažovacích plánů pro topolovou farmu. Program znamenal z mnoha hledisek významný přínos, z nejdůležitějších to jsou významná časová úspora při tvorbě plánu z desítek hodin na desítky minut, zajištění splnění omezujících podmínek a tím zvýšení spolehlivosti soustavy, vyvážený průtok pro hydraulické zóny farmy a díky tomu úspora energie při čerpání a šetrnější provoz čerpadel.



Obr. 7: Celkový nominální průtok pro hydraulickou zónu.

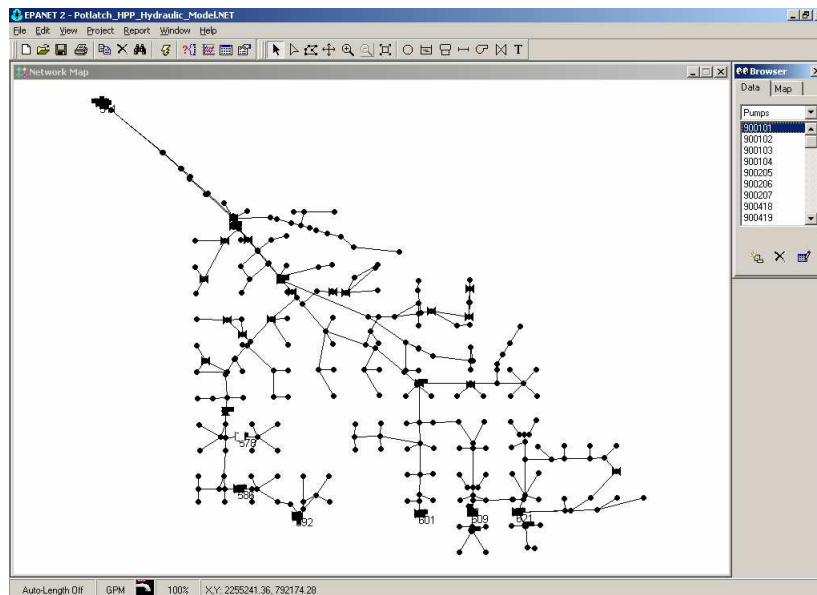
### 3 Simulační model zavlažovací soustavy — IrSim

#### 3.1 Nástroje pro simulaci vodovodních sítí

Většina programových nástrojů pro modelování a simulaci vodovodních rozvodných sítí je založena na iterativním numerickém řešení Bernoulliho rovnice a hodí se pro modelování stacionárních dějů a pomalých změn v soustavě. Nejznámějším a nejrozšířenějším nástrojem tohoto typu je volně dostupný program EPANET 2 (viz [4]). Výhodou těchto nástrojů je jejich rychlost, použitelnost pro velmi rozsáhlé vodovodní sítě a rozmanitost modelovaných prvků soustav. Nevýhodou naproti tomu je, že nemodelují dynamické děje v tlakových soustavách — dynamické chování modelu může být zapříčiněno pouze přítomností retenčních prvků (vodojemů, nádrží, rezervoárů atd.).

Specifikem řešené zavlažovací soustavy však je, že žádné vodní nádrže neobsahuje. Chování soustavy je navíc silně ovlivněno otvíráním a zavíráním zavlažovacích ventilů, tedy nespojitými ději, které způsobují výrazné kolísání tlaků a průtoků. Společnost Potlatch nám poskytla k testování model zavlažovací sítě v systému EPANET 2 (viz Obr. 8). Testy ukázaly, že tento model je zcela nepoužitelný, jelikož výpočetní metoda v aplikaci EPANET 2 každou změnu stavu zavlažovacích ventilů propaguje skrze celou síť, a to v čase blízcím se nule (vodojemy, které by mohly tlakové rázy utlumit a zavést do modelu dynamiku, v zavlažovací síti nejsou). Tlaková změna na ventilu se tak neutlumená projeví až na čerpací stanici, která příslušnou část soustavy zásobuje, následkem čehož dochází k samočinnému vypínání čerpadel, odpojování částí sítě a v konečném důsledku k divergenci iteračního algoritmu.

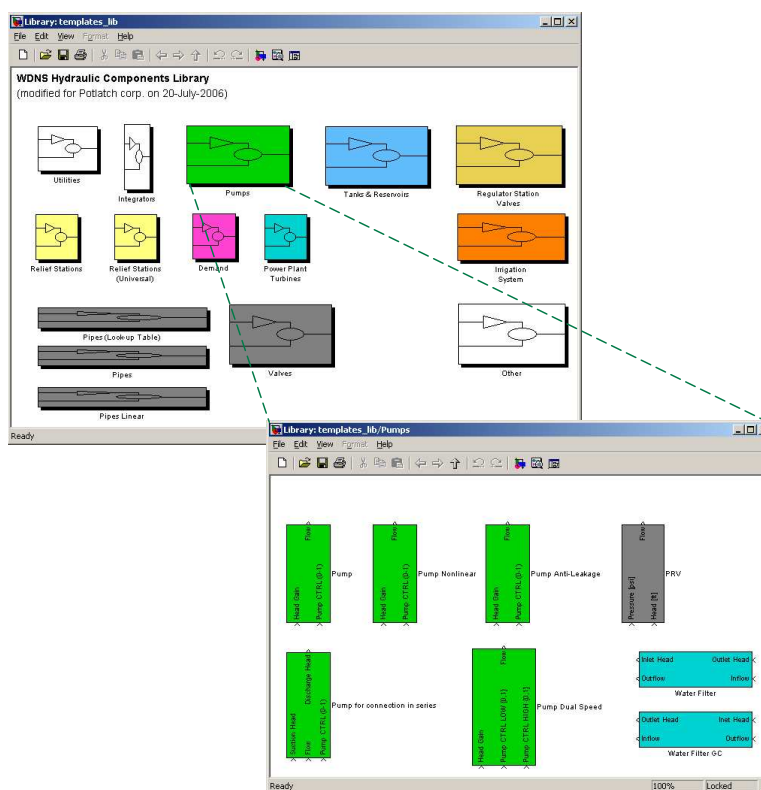
Proto bylo zapotřebí vytvořit simulační model, který by byl schopen s dostatečnou přesností a rychlostí modelovat jak stacionární stav, tak přechodové děje, způsobené především otvíráním a zavíráním zavlažovacích ventilů. Pozornost bylo třeba věnovat především modelu zavlažovací trubky, jenž by dokázal simulovat děj způsobující špičku průtoku na začátku zavlažovacího cyklu, který jsme popsali v předchozí sekci (viz Obr. 4). Simulační model měl navíc umožnit uživateli snadno aplikovat programové řízení zavlažování s použitím specifických rozvrhů generovaných aplikací AHBIS Program a online provoz propojením modelu s informačním systémem farmy.



Obr. 8: Simulační model zavlažovací soustavy v systému EPANET 2.

### 3.2 IrSim

**WDNS library — knihovna pro modelování vodovodních sítí.** Simulační model zavlažovací soustavy jsme vytvořili v systému Simulink. Model vychází z metody výkonových grafů („bond graphs“). Jednotlivé prvky systému (čerpadla, rozvodné potrubí, zavlažovací trubky, ventily atd.) jsou modelovány s využitím knihovnických bloků knihovny *Water Distribution Network Simulator (WDNS) library* (viz Obr. 9), kterou jsme vyvinuli v rámci dřívějších projektů a pro účel tohoto projektu jsme ji rozšířili o některé bloky, zejména model zavlažovací trubky.



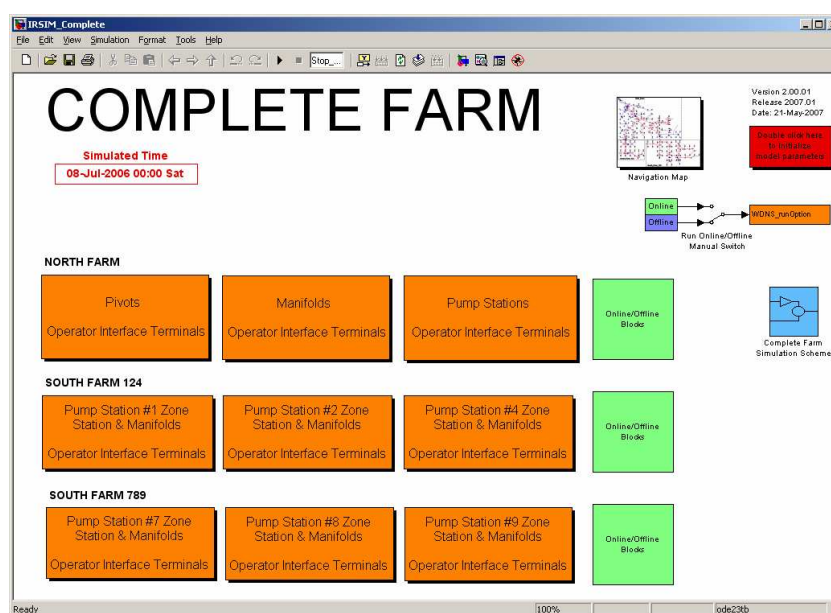
Obr. 9: WDNS library pro modelování hydraulických soustav.

Simulační modely hydraulických systémů založené na této knihovně se vyznačují schopností zahrnout do modelu stacionární i dynamické podmínky systému při rozumné časové náročnosti simulace. Navíc umožňují ovládání modelu v několika režimech — manuálně, automaticky (v případě

řešeného modelu zavlažovací sítě se jedná o aplikaci vytvořených rozvrhů zavlažování), aplikací historických řídicích signálů pro případ simulace minulých průběhů nebo aplikací řídicích signálů z reálné soustavy napojením na informační systém farmy přes OPC.

**Parametry modelu.** Parametry simulačního modelu IrSim (zejména hydraulické odpory potrubí a ventilů, charakteristiky čerpadel atd.) jsme určili na základě parametrů modelu v systému EPANET 2 poskytnutém společností Potlatch a z historických naměřených dat, především z tlaků a průtoků na čerpacích stanicích a rozdělovačích potrubí a ze stavů zavlažovacích ventilů. Vzhledem k tomu, že se parametry zavlažovacího systému mohou v čase měnit např. vlivem stárnutí potrubí nebo výměny zařízení, doplnili jsme simulační model o nástroj pro podporu kalibrace modelu, tj. nastavení parametrů modelu, a to pro čerpadla a rozdělovače potrubí (viz část 3.4).

**Simulace zavlažování, ovládání modelu a vizualizace signálů.** IrSim umožňuje simulaci zavlažovací soustavy jako celku nebo izolovaně jedné z jejích tří částí (severní farma, jihozápadní farma a jihovýchodní farma). Hlavní okno modelu kompletní farmy je na Obr. 10.



Obr. 10: IrSim — hlavní okno.

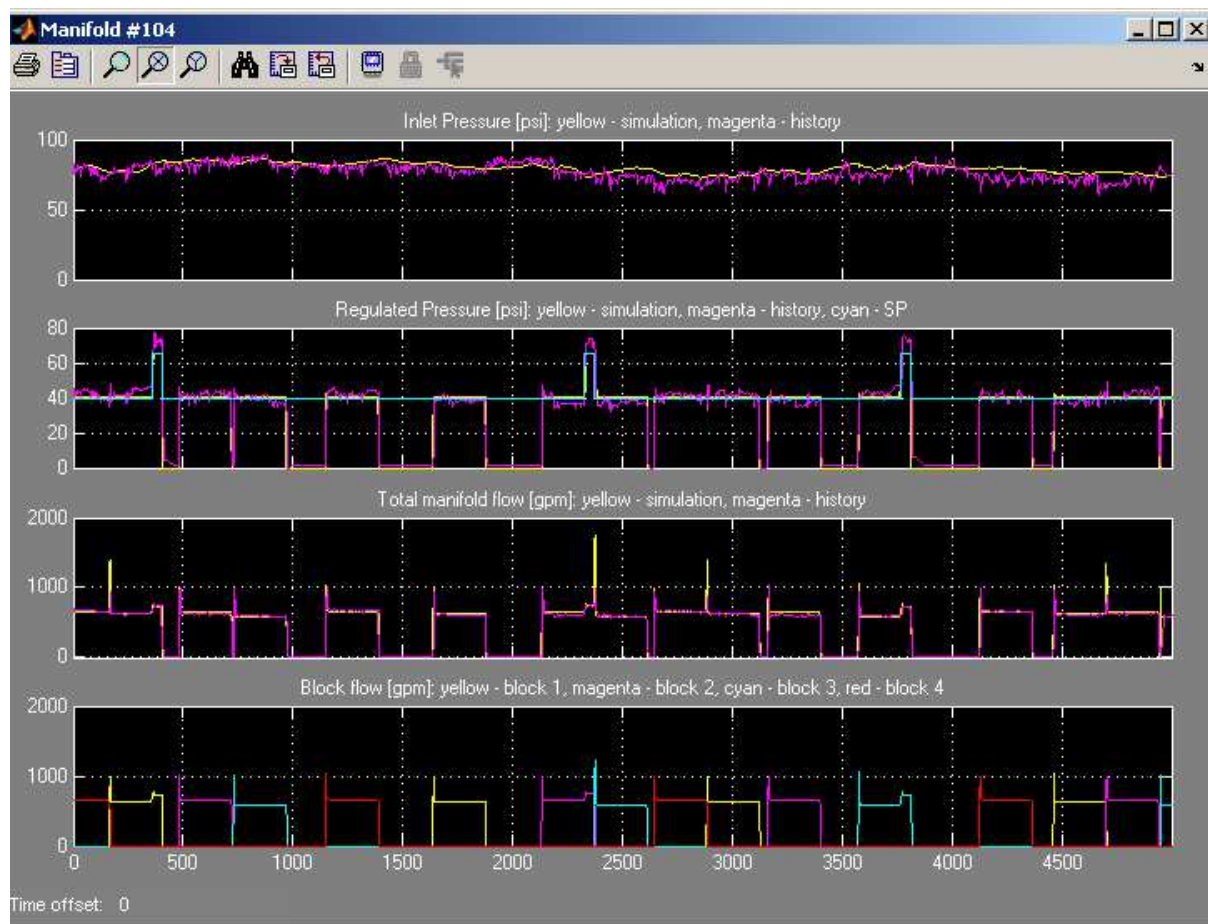
IrSim slouží především pro simulaci hydraulických a řídicích veličin při aplikaci rozvrhu zavlažování vytvořeného aplikací AHBIS Program. Simulovat lze budoucí chování systému i chování systému v minulosti — v takovém případě v grafech spolu se simulovanými veličinami zobrazují také v historii naměřené signály, jsou-li k dispozici. Obr. 11 ukazuje graf simulovaných veličin pro rozdělovač potrubí spolu s naměřenými daty. V grafech jsou dobře patrné špičky průtoku na začátku zavlažovacích cyklů i režim proplachu, kdy byla zvýšena požadovaná hodnota tlaku a došlo k odpovídajícímu nárůstu průtoku.

Rychlost simulace závisí především na aplikovaném rozvrhu zavlažování a na složitosti simulované části zavlažovací sítě. Simulace šestidenního zavlažovací plánu u strukturálně nejjednodušší jihozápadní farmy trvá přibližně jednu minutu. Pro celou farmu je trvání simulace řádově desítky minut.

### 3.3 Propojení simulačního modelu s informačním systémem

IrSim lze snadno připojit k informačnímu a řídicímu systému RSVIEW SCADA od firmy Rockwell Automation, který je na farmě nasazen. Při propojení je simulační čas IrSimu synchronizován s reálným časem a model běží v online režimu. Komunikace probíhá přes OPC a IrSim je pro komunikaci předem nakonfigurován, takže režimy lze jednoduše přepnout pomocí přepínače v hlavním okně simulátoru. IrSim z informačního systému čte a může aplikovat řídicí signály pro čerpadla a ventily a zpět posílá simulované hydraulické veličiny.





Obr. 11: Grafické zobrazení hydraulických veličin pro rozdělovač potrubí. Veličiny v grafech (shora): 1. vstupní tlak, 2. výstupní (regulovaný) tlak, 3. celkový průtok rozdělovačem, 4. průtoky do jednotlivých bloků. Popis signálů v prvních třech grafech: žlutá – simulovaná veličina, fialová – měřený signál, modrá – požadovaná hodnota tlaku. Časová osa je v minutách.

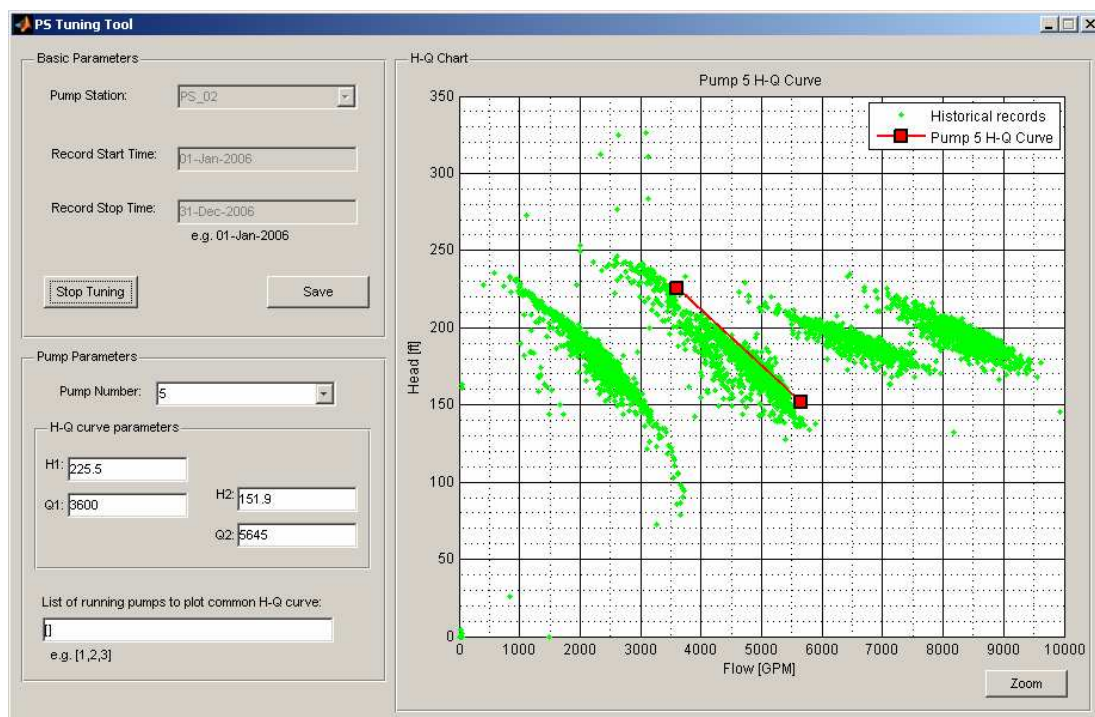
### 3.4 Podpora kalibrace modelu

Jako příslušenství k simulačnímu modelu IrSim byly vyvinuty dva nástroje pro kalibraci modelu, pomocí nichž může zákazník sám nastavovat a ladit některé důležité parametry modelu.

*PS Tuning Tool* slouží k nastavování hydraulické charakteristiky čerpadel a *MF Tuning Tool* slouží k nastavování hydraulických odporů zavlažovacích ventilů u rozdělovačů potrubí. Uživatelské rozhraní nástroje *PS Tuning Tool* je ukázáno na Obr. 12.

## 4 Závěr

Aplikace AHBIS Program pro automatickou tvorbu zavlažovacích rozvrhů a simulátor zavlažovací soustavy IrSim představují řešení speciální úlohy pro konkrétního zákazníka, který provozuje rozsáhlou zavlažovanou farmu pro produkci topolového dřeva. Oba produkty jsou zákazníkem běžně užívány a ve srovnání s předchozím řešením přinesly výraznou úsporu energie, lidské práce, a v důsledku toho i finančních nákladů, a přispěly ke zvýšení spolehlivosti provozu zavlažovací soustavy.



Obr. 12: PS Tuning Tool pro nastavování hydraulické charakteristiky čerpadel.

## Literatura

- [1] R. Linn, W. Zhang. "Hybrid flow shop scheduling: a survey," *Journal of Computers and Industrial Engineering*. Vol. 37, pp. 57–61, 1999.
- [2] C. Oğuz, M. F. Ercan, T. C. E. Cheng, Y. F. Fung. "Heuristic algorithms for multiprocessor task scheduling in a two-stage hybrid flow shop," *European Journal of Operational Research*. Vol. 149, pp. 390–403, 2003.
- [3] M. Ghallab, D. Nau, P. Traverso. *Automated Planning: Theory and Practice*. The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence, Elsevier, 2004.
- [4] P. Brucker. *Scheduling Algorithms*. Springer–Verlag, fourth edition, 2004.
- [5] L. A. Rossman. *EPANET 2 Users Manual*. US Environmental Protection Agency, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, no. EPA/600/R-00/057, September 2000. [url: <http://www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet/EN2manual.PDF>]

Jakub Královec

ProTyS, a.s., Václavská 12/316, 120 00 Praha 2

Rockwell Automation Research Center, Pekařská 695/10a, 15500 Praha 5

Email: [kralovec@protys.cz](mailto:kralovec@protys.cz)

Tel: +420-224904461

Petr Horáček

ProTyS, a.s., Václavská 12/316, 120 00 Praha 2

Rockwell Automation Research Center, Pekařská 695/10a, 15500 Praha 5

Email: [horacek@protys.cz](mailto:horacek@protys.cz)

Karel Stryczek

Rockwell Automation, 1 Allen Bradley Drive, Mayfield Heights., OH, 44124 USA

Email: [kstryczek@ra.rockwell.com](mailto:kstryczek@ra.rockwell.com)