

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

Ing. Jiří Kovář

**NÁVRH REGULACE TLAKU A PRŮTOKU V SOUSTAVĚ
ČERPADLO-NÁDRŽ**

DESIGN OF SYSTÉM FOR PRESSURE AND FLOW RATE
REGULATION IN PUMP-TANK SYSTEM

Zkrácená verze PhD Thesis

Obor: Inženýrská mechanika
Školitel: prof. RNDr. Ing. Tomáš Březina, CSc.

KLÍČOVÁ SLOVA

regulace soustavy čerpadlo-nádrž, gradientní metoda hydraulické analýzy, regulace tlaku, regulace průtoku, regulace výšky hladiny

KEYWORDS

control of pump-tank system, gradient method of hydraulic analysis, pressure control, flow control, control of water level in tanks

Disertační práce je uložena na Oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno

OBSAH

1	SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	5
1.1	Teoretická východiska.....	6
1.2	Návrh regulace dle rozlehlosti soustavy.....	7
1.3	Metody hydraulické analýzy tlakových potrubních sítí	9
1.4	Návrh regulace s využitím hydraulického řešiče	11
2	CÍLE PRÁCE	13
3	ZVOLENÉ METODY ŘEŠENÍ	14
4	HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE	14
4.1	Metoda hydraulické analýzy	14
4.2	Návrh a realizace softwarového řešení	15
4.3	Model potrubní sítě v aplikaci adam	16
4.4	Kalibrace a verifikace.....	16
4.5	Ověření modelu potrubní sítě města Vsetín	17
4.6	Metoda návrhu.....	18
4.7	Ověření navržených procesních pravidel	20
5	ZÁVĚR.....	22
5.1	Teoretický přínos.....	22
5.2	Praktický přínos.....	22
5.3	Pedagogický přínos	23
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	24
	AUTOROVO CV	26
	ABSTRACT	27

1 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Kontinuální doprava jakéhokoliv plynného, kapalného nebo práškového média na velké vzdálenosti je z velké části prováděna za pomoci trubních sítí. Tento způsob dopravy je zejména výhodný tam, kde je předpoklad nepřetržitého a dlouhodobého používání, kde vznikla potřeba vysoké spolehlivosti a také šetrnosti vůči životnímu prostředí.

Náklady na tuto technologii jako celek je možno rozdělit do tří skupin. První skupinou jsou náklady na zřízení dopravní cesty, druhou skupinu tvoří náklady na provoz a poslední skupinu tvoří náklady na její údržbu. Provozní náklady jsou z velké části reprezentovány spotřebovanou elektrickou energií potřebnou k procesu čerpání a v průměru tvoří 85% celkových nákladů na celou technologii. Na čerpání kapalin v tlakových potrubních sítích je celosvětově vynakládáno přibližně 10% veškeré vyrobené elektrické energie. Z provedených technických auditů plyne, že je možné až 40% z této spotřeby ušetřit účinnější regulací provozu jak čerpadel, tak celé sítě. Možná úspora elektrické energie představuje spotřebu domácností jedné miliardy lidí [1], [2]. Jedním z důsledků uvedených skutečností je rostoucí sociální důraz na šetrnost navrhovaných a provozovaných technologií vůči přírodě a jejím zdrojům a s rozvojem pokročilých technik řízení tím roste i tlak na ekologičtější, energeticky šetrnější a tím i výhodnější provoz tlakových potrubních sítí.

Z hlediska regulace může být charakteristickým požadavkem na provoz sítě dosažení žádané výšky hladiny v nádrži nebo také žádaného tlaku a průtoku v určitých bodech soustavy. Proces takového regulace tlaku a průtoku v soustavě čerpadlo-nádrž, jako součásti tlakové potrubní sítě, je možné realizovat v zásadě dvěma způsoby – regulací otáček čerpadla, a to včetně jeho zastavení a rozběhu, a zavíráním nebo otevíráním ventilu. Oba způsoby regulace s sebou přinášejí několik výhod i nevýhod.

Obecnou výhodou regulace tlaku a průtoku v soustavě čerpadlo-nádrž naznačenými způsoby je bezesporu možnost automaticky reagovat na změnu požadavků provozu sítě, na možné poruchové stavy atd. Hlavní výhodou regulace změnou otáček čerpadla je bezesporu relativně bezztrátový provoz, což je také jeho hlavní výhodou. Z technického hlediska je ale soustava rozšířena o další prostředky (např. frekvenční měnič), a tím jsou zvýšeny náklady na pořízení celé technologie, což je také hlavní nevýhoda tohoto přístupu. Regulace změnou otevření nebo uzavření ventilu může být z hlediska pořizovacích nákladů výhodné, nicméně jde z hlediska provozu celé tlakové potrubní sítě většinou o ztrátový druh regulace.

Parametry regulační soustavy lze najít pomocí různých metod návrhu. Problematika návrhu vhodných parametrů regulační soustavy čerpadlo-nádrž je stále aktuální a rozvíjená, z velké části díky rozvoji možností výpočetní techniky, kdy návrh parametrů regulační soustavy je v dnešní době tvořen na základě výsledků získaných z vhodného matematického modelu soustavy – tlakové potrubní sítě. Tato dizertační práce se zabývá návrhem soustavy pro regulaci závisle proměnných

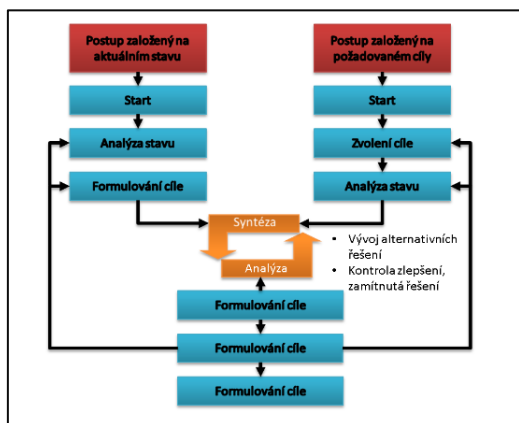
průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž, která je součástí širší tlakové potrubní sítě.

1.1 TEORETICKÁ VÝCHODISKA

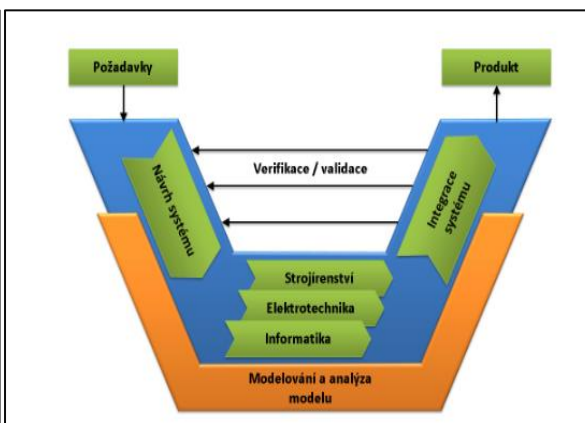
Návrh soustavy pro regulaci průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž, jako součást širší tlakové potrubní sítě, je z hlediska formulování obecného přístupu ve formě platné metodiky dlouhodobě řešeným vědeckým problémem. Tlakové potrubní sítě jsou z hlediska jejich matematického popisu komplexní nelineární soustavy, z čehož plynou i nároky na formulování výše zmíněné metodiky. Jednotlivá teoretická a praktická řešení se většinou omezují na předem definovanou soustavu, čímž jsou nároky na obecnost přístupu zmenšeny. Je-li ale tlaková hydraulická síť uvažována jako celek, lze na ni v určitých ohledech s výhodou pohlížet jako na mechatronickou soustavu.

Mechatronika je interdisciplinární obor kombinující znalosti a dovednosti z oborů mechaniky, elektroniky, elektrotechniky, řízení a IT apod. a cílem využít výhody jejich součinné kombinace. Mechatronika při návrhu jakéhokoli technického objektu představuje komplexní přístup zajišťující průběžnou integraci požadavků na důležité vlastnosti jednotlivých prvků a vazeb u všech podsoustav technického objektu s důrazem na jeho vyrobitelnost, funkčnost, spolehlivost a v neposlední řadě také provozuschopnost. Obecná metodika, která v sobě zahrnuje výše uvedené, je zpracována v normě VDI 2006 Design methodology for mechatronics systems [3]. Metodika definovaná v normě VDI zavádí a používá flexibilní procedurální model za účelem návrhu mechatronických zařízení. Definované základní tři přístupy jsou:

- Řešení obecně formulovaného problému za pomoci tzv. mikrocyklu (Obr. 1). Postup řešení problému je rozdělen do série kroků, v kterých je možné pružně reflektovat předem definované požadavky na vývojový proces. V této části řešení je možné také reagovat na často se nevyskytující dílčí problémové situace.
- Využití V-modelu (Obr. 2) jako makrocyklu. Jde o sérii na sebe logicky navazujících kroků, jejichž hlavním účelem je minimalizace nežádoucích mezních stavů, a to včetně rizikových faktorů při zachování funkčnosti a provozuschopnosti celého systému.



Obr. 1 Mikro-cyklus



Obr. 2 Makro-cyklus

Konečným cílem této metodiky je funkční a prostorová integrace mechanických, elektrických a elektronických (případně jiných) jednotlivých komponent do výsledného mechatronického zařízení. Je nutné poznamenat, že mechatronické zařízení jsou komplexní soustavy vyznačující se úzkou provázaností samotného zařízení jako produktu s jeho vývojovou částí

1.2 NÁVRH REGULACE DLE ROZLEHLOSTI SOUSTAVY

Z regulačních úloh, které jsou používány v odvětví hydraulických soustav, je bezpochyby nejrozšířenější a také nejstarší typ regulace na výšku hladiny v nádrži. Regulace tlaku a průtoku v hydraulických soustavách, resp. metody návrhu a použité prostředky, jsou ale neustále rozšiřujícím a studovaným problémem. Navrhované regulační soustavy jsou používány nejen na regulaci výšky hladiny, tlaku nebo průtoku, ale také pro návrh časového rozložení funkčnosti čerpadel vzhledem k ceně jejich provozu apod. Dále je možné najít metody návrhu, jejichž úkolem je mimo jiné reagovat na havarijní stavy sítě atd. Jak bylo řečeno výše, jsou metody návrh závislé na velikosti regulované soustavy, která je brána v úvahu.

Jde-li o návrh parametrů regulační soustavy vzhledem k čerpadlu, popř. čerpadlo-krátká část výtláčného potrubí, bez uvážení případných dalších částí sítě, je používaná problematika poměrně dobře zpracována a některé přístupy jsou také patentovány:

- americký patent č. 5 240 380 [4] - ukazuje přístup pro regulaci průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-krátká část výtláčného potrubí. Regulace tlaku a průtoku je v tomto případě prováděna změnou otáček čerpadla a mírou otevření/uzavření regulačního ventilu,

- americký patent 8 019 479 [5] – představuje řídicí algoritmus pro čerpadlo s proměnnými otáčkami primárně za účelem konstantního nebo požadovaného průtoku.

Dále už jen heslovitě:

- americký patent 3 918 831 [6] – představuje regulační mechanismus pro zajištění konstantního průtoku,

- americký patent 200 400 642 92 A1 [7] – představuje řídicí systém pro soustavu odstředivých čerpadel,

- americký patent 425 774 5 A [8] – představuje automatický řídicí systém pro odstředivá čerpadla.

Z použitých metod návrhu parametrů regulátoru lze zmínit např. metodu Zieger-Nichols, dále použití heuristických metod hledání parametrů jako např. genetických algoritmů, diferenciální evoluce, dále neuronových sítí apod. Je-li brána do úvahy širší soustava, například čerpadlo-výtlačné potrubí-nádrž, popřípadě kdy je brána soustava čerpadlo-výtlačné potrubí-nádrž jako součást rozlehlé hydraulické potrubní sítě (což je v praxi patrně nejrozšířenější), je situace z hlediska návrhu složitější.

Problematika návrhu řízení a provozu regulovatelných prvků v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž, jako součástí rozlehlé tlakové hydraulické sítě, je studována přibližně od roku 1968, přičemž obecná metodika návrhu do dnešní doby není vytvořena.

Tato skutečnost je také důsledkem různorodosti hydraulických soustav. Obecná struktura řídicí soustavy byla definována např. v práci Cembrana a kol. [9]. Struktura byla rozdělena na dvě části, později rozšířením o SCADA systém na tři vzájemně propojené části: hydraulická síť, nižší vrstva řízení (obvykle nějaký typ SCADA systému a vyšší vrstva řízení).

Právě struktura a metody použité k vytvoření vyšší vrstvy řízení hydraulické soustavy jsou v dnešní době nejvíce studovaným problémem. I když sjednocující metoda není ještě definována, jsou vytvořeny alespoň rámcové způsoby řešení dané problematiky, které se vyvíjí již od prvních studií. Tyto první, ale také pozdější práce, formulují návrh parametrů regulační soustavy a její provoz jako optimalizační problém, přičemž studie samotné lze rozdělit dle jejich přístupu k řešení do dvou skupin. První skupina prací k řešení problému nějakým způsobem používá hydraulický řešič, druhá skupina potom používá jiné přístupy. Z druhé skupiny prací lze například uvést studii pánů Laie a Schaakeho [10] nebo Kohlhaas a Mattern [11] a navazující práce. Například tyto dvě práce definují metody při předpokladu, že tlaku v potrubní síti jsou konstantní, což výslednou metodu návrhu omezuje vzhledem k jejímu opakovanému použití.

V první skupině prací je používán nějaký typ hydraulického řešiče. Právě s rozvojem hydraulických řešičů došlo také k rozvoji přístupů k návrhu parametrů regulace soustavy. Původně se tyto studie zabývaly návrhem celé sítě a optimalizací rozložení a připojení jejich prvků, a to včetně regulačních prvků. Za stěžejní práci lze patrně označit práci pánů Alperovitse a Shamira [12], která se zaměřuje hlavně na návrh celé potrubní sítě a dále návrhu provozu sítě. Provozem sítě se v tomto případě myslí návrh pracovních bodů čerpadel, k jejichž získání byla použita metoda LPG (linear programming gradient). Také zde byla poprvé brána do úvahy změna průtoku v modelu sítě. Složitější ze dvou studovaných modelů sítě obsahoval jedno čerpadlo, kterým bylo přenášené médium transportováno z jedné nádrže do druhé přes zokruhovanou potrubní síť. Nicméně v jejich práci a hlavně v následné diskuzi je řečeno, že jejich metoda nemůže být ještě použita pro navržení pracovních bodů čerpadel.

Uvedená a také další navazující práce definovaly metodu pro návrh regulace jako optimalizační problém. S rozvojem výpočetní techniky a možností použití hydraulických řešičů byly i zlepšovány metody pro návrh provozu čerpadel v síti vzhledem k ceně provozu soustavy. Hlavním parametrem k optimalizaci bylo stanovení pracovních bodů čerpadel, časového rozložení funkčnosti, nebo v případě více čerpadel časového rozložení funkčnosti čerpadel vzhledem k ceně jejich provozu při zachování požadovaného průtoku a tlaku v hydraulické soustavě. Optimalizační úloha může být zadána například jako [13]:

$$\text{Minimize} \quad F(x; q, p) \quad (1)$$

Subject to

$$\begin{aligned} q(x) \\ p(x) \\ x_{\min} < x < x_{\max} \end{aligned} \quad (2)$$

kde $F(X;q,p)$ je účelová funkce, jejíž minimum se hledá a představuje cenu provozu čerpadel pro dané časové rozložení jejich funkčnosti. Omezení potom tvoří vektor průtoků $q(X)$ a vektor tlaků $p(X)$ (většinou minimálních tlaků). Uvedené tři funkce jsou funkce rozhodovací proměnné X , což je vektor nezávislých rozhodovacích proměnných. Ze studií, které se zabývají optimalizací chodu čerpadel v soustavě čerpadlo-nádrž, lze uvést například práci Ertina a kol.[14]. Regulace soustavy zde spočívala v udržení požadované výšky hladiny v nádrži, nicméně, jak uvádějí, je možné přidat omezující pravidla z důvodu udržení požadovaného tlaku v potrubí v předem stanoveném intervalu. Rozhodovací proměnná je označována jako procesní pravidlo. Představuje časový rozpis funkčnosti čerpadel, tedy např. pro zapnutí čerpadla v 16 hodin (16h;1350 otáček).

Pomocí optimalizačního modelu je zvolen vektor X a je vstupem do simulačního modelu, který na jeho základě vypočítá průtoky a tlaky a ty jsou vráceny k ohodnocení do optimalizační metody. Pokud vypočítané tlaky a průtoky odpovídají zadaným omezením, je vektor X vyhodnocen jako vyhovující a uložen (i s vyčíslením své účelové funkce). Vektor X v tomto případě představuje hledaná procesní pravidla. Jak bylo řečeno výše, studie se liší primárně v tom, jestli je pro optimalizaci použit hydraulický řešič či nikoliv.

Hydraulický řešič, tedy algoritmizovaná metoda pro analýzu průtoku a tlaku v tlakové hydraulické potrubní síti, je podstatnou částí celé metody návrhu. Z tohoto důvodu je nutné vytvořit alespoň krátký přehled existujících hydraulických řešičů, použitých metod apod.

1.3 METODY HYDRAULICKÉ ANALÝZY TLAKOVÝCH POTRUBNÍCH SÍTÍ

K modelování potrubní sítě, respektive k získání základních hydraulických veličin v jednotlivých významných částech sítě (rychlost proudění, průtok, tlak/tlaková ztráta) řešením soustavy rovnic, je nutné definovat matematickou reprezentaci prvků tvořící tuto síť a definovat vhodnou metodu výpočtu vytvořeného matematického modelu. Takovému modelování sítě potom říkáme hydraulická analýza, která vzhledem k časovému kroku simulace a také celkové době řešení může být dělena na:

- statickou: je uvažován neměnný stav zatížení sítě a hledá se řešení pro jeden časový okamžik (ustálené proudění),
- kvazi-dynamickou: (větší časové kroky v řádu sekund nebo minut) (někdy také pojmenované jako kvazi-statickou) – je posloupnost statických hydraulických analýz, kdy výstup jedné analýzy je vstupem druhé,

- dynamickou: (malé časové kroky v řádu milisekund nebo sekund) účelem dynamické analýzy je řešit model pro relativně krátké časové okamžiky, což je výhodné například pro studium přechodových jevů (hydraulický ráz apod.)

Pro modelování větších potrubních sítí pro delší časové úseky řešení bývají používány kvazi-dynamické (kvazi-statické) hydraulické řešiče. Uvažováno je proudění jako jednorozměrné. Z používaných metod pro kvazi-dynamickou hydraulickou analýzu lze uvést hlavně tyto metody:

- Hardy Cross metoda: byla vyvinuta pro analýzu průtoku a tlaku v okružových potrubních sítích. Teoreticky byla první popsána Crossem v roce 1936 [15]. S využitím počítačů zažila svůj rozmach v 60. letech dvacátého století, algoritmus byl popsán Adamsem v roce 1961.
- Newton-Raphson metoda: nahradila Hardy-Crossovu metodu. Tato metoda byla oproti své předchůdkyni použitelnější (stabilnější i pro složité soustavy) a rychleji konvergovala. Poprvé byla patrně popsána Martinem a Petersem v roce 1963, vylepšení potom představili v roce 1967 Dillingham a následně v roce Shamir a Howard [16].
- Linearizační metoda: McIlroy (1949), Fietz v roce 1973 [17], Wood a Charles v roce 1972 a 1973 atd.

Je nutné podotknout, že pod pojmem hydraulický řešič rozumíme také metodu, která řeší nelineární rovnice popisující soustavu. První rozdíl mezi hydraulickými řešiči je způsob sestavení rovnic. Tyto rovnice většinou nelze řešit exaktně, proto jsou používány numerické metody a v právě ve způsobu hledání řešení soustavy těchto rovnic se uvedené metody také liší. V průběhu posledních 40ti let minulého století se uvedené metody zlepšovaly a ověřovaly. Jejich vývoj lze najít např. v pracích pánů Epp a Fowler [18], Hamam a Brameller v roce 1971 [19], Wood a Charles [20], kteří mimo jiné vyvinuli nový (resp. vylepšili) algoritmus. Tyto práce sestavovaly linearizované rovnice pro výpočet tlaku a průtoku na základě okružové podmínky. Druhý způsob, totiž sestavení rovnic vzešlých z uzlových podmínek, zvolil např. Shamir a Howard [16]. Dále Chandrashekar (1980) [21] a Jeppson a Davis (1976) [22], kteří vypracovali techniku pro modelování netrubkových prvků sítě (čerpadla, ventily) a konečně v roce 1977 představili Rao a Bree [23] tzv. EPS (extended period analysis). V roce 1984 Todini a Pilati [24] představili nový způsob řešení těchto rovnic založený na gradientní metodě (pojmenování Todini-Pilati metoda, se oproti očekávání nerozšířilo). Gradientní metoda hydraulické analýzy vykazuje rychlejší konvergenci a větší stabilitu a v současné době je patrně nejpoužívanější metodou. Metody byly porovnávány například v práci [25]. Matematické vyjádření soustavy rovnic je v těchto případech pomocí matic, zvláště pak u rozsáhlejších sítí to jsou tzv. řídké matice (sparse matrix). Rozvoj metod řešení řídkých matic rovněž nemalou měrou přispěl k rozšíření metod hydraulické analýzy. Se vznikem algoritmizovaného řešiče a dále také v důsledku rozšíření výpočetní techniky se rozšířilo použití hydraulických řešičů i pro off-line (a později i on-line) regulaci reálných hydraulických potrubních sítí. Mezi jinými lze zmínit Brdys (1994) [26], Coulback (1975) [27] atd.

1.4 NÁVRH REGULACE S VYUŽITÍM HYDRAULICKÉHO ŘEŠIČE

Obecnou strukturu regulační soustavy pro tlakovou hydraulickou síť použitelnou i pro regulaci průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo nádrž je možné nalézt v [28]. Celá soustava je dělena do několika částí, přičemž nejdůležitější části jsou (Obr. 3):

- Seznam úkolů a Seznam úkolů údržby: může obsahovat seznamy úkolů ve smyslu např. naplnění nádrže (respektive udržení nádrže plné) apod. Úkoly jsou rozloženy v časových intervalech. Pro potrubní síť dopravující pitnou vody jsou například časové intervaly definovány jako 24hodinový, týdenní a měsíční. Omezením je třeba nečerpání v době drahého tarifu elektrického proudu.

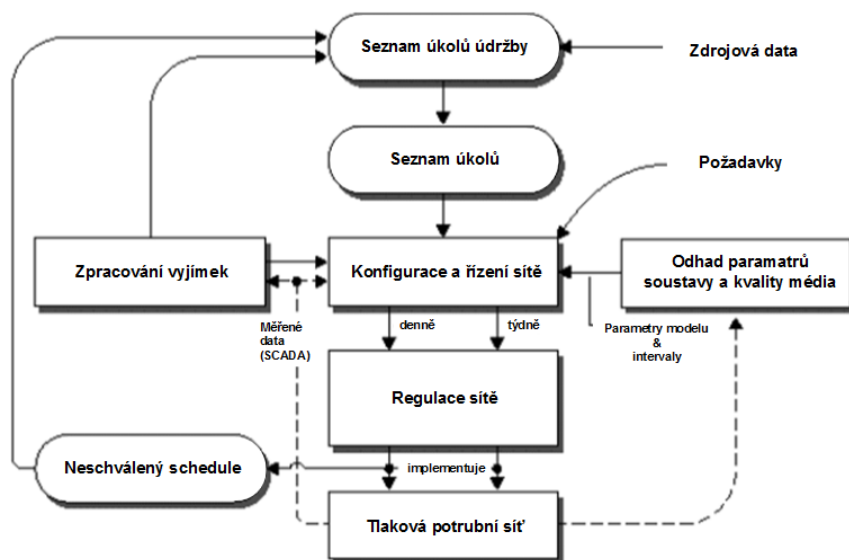
- Zpracování výjimek: má za úkol porovnávat předem známé požadavky a aktuální stav na síti. Výjimkou tedy může být rozdíl požadované hodnoty některé z regulovaných veličin vůči požadované. Výjimka je příčinou vytvoření nového vektoru X.

- Požadavky: představuje požadavky ve formě dodaných tlaků a průtoků ve význačných bodech sítě, požadovaných výšek hladin v nádrži atd. Jsou se zdrojovými daty základem pro vytvoření modelu hydraulické soustavy.

- Regulace sítě: představuje regulační zásahy pomocí akčních veličin při použití nižší vrstvy řízení na základě vektoru rozhodovacích proměnných X.

- Odhad parametrů soustavy a kvality média: úkolem této části je odhad klíčových parametrů soustavy, čím je myšleno například výška hladiny v nádrži, tlak nebo průtok v předem vybraných bodech apod. Používá se hlavně pro odhad kvality přenášeného média (např. stáří, koncentrace částic apod.)

- Konfigurace a řízení sítě: představuje nejvyšší vrstvu řízení. Na této úrovni se pomocí modelu soustavy tvoří regulační zásah ve formě vektoru nezávislých proměnných X – tedy procesních pravidel.

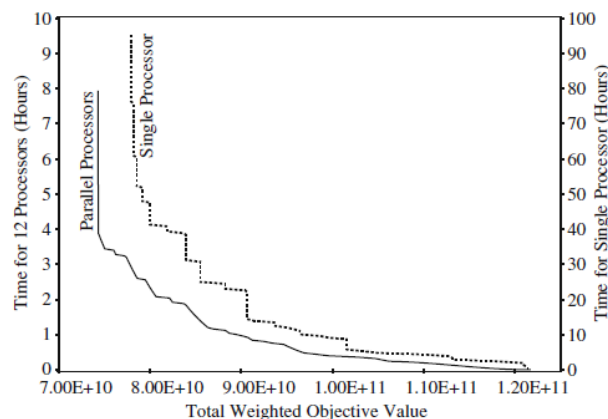


Obr. 3 Struktura regulační soustavy (převzato a upraveno) [28]

Cílem je tedy vytvoření vektoru X tak, aby bylo dosaženo požadavků vzhledem k tlaku, průtoku a výšky hladiny v soustavě. Vektor X je vyvolán na základě zpracované vyjímky, které byly studovány např. v práci pana Jamiesona a kol. [28]. Tlak a průtok jsou závislé proměnné a právě nadměrný odběr přenášeného média ze soustavy může způsobit pokles tlaku. Jako příklad si lze představit nadměrný odběr z důvodu odběru zásahových jednotek při požáru apod. Jako klíčový požadavek na vyšší vrstvu řízení soustavy Jamieson definuje schopnost on-line zásahu jako reakci na krátkodobé změny při zachování krátkodobých a dlouhodobých požadavků na provoz sítě.

Způsobů návrhu vyšší vrstvy řízení je možné v literatuře najít v poměrně dostatečném množství. Například Murphy [29] využívá genetických algoritmů, s přihlédnutím ke kvalitě vody například Sakarya [30], dále Omrsbee [31], Zyl [32], Goldman [33] atd. On-line regulaci potom řešil ve své práci Tsai [34]. Pro on-line regulaci je, jak uvádí ve své práci Tsai, klíčový problém vytvoření regulačních pravidel v relativně krátkém čase (Obr. 4). Z hlediska složitosti modelu jednotlivých soustav, době simulace a simulačním kroku je hledání regulačních pravidel časově náročný proces v důsledku také toho, že hledání vektoru X se děje opakovaným spouštěním simulace modelu soustavy.

Návrh regulace průtoku, tlaku a výšky hladiny v tlakové potrubní síti z hlediska vyšší vrstvy řízení je problém návrhu vhodných akčních zásahů (vektoru X) na základě odpovídajícího modelu regulované soustavy. Vytvoření vektoru X je obvykle převedeno na optimalizační problém, k jehož řešení jsou s výhodou používány evoluční algoritmy.



Obr. 4 Čas potřebný pro výpočet regulačních pravidel X [34]

2 CÍLE PRÁCE

Při provozu jakékoliv tlakové potrubní sítě pro dodávku pitné vody spotřebitelům jsou sledovány tři priority:

- spolehlivost dodávky pitné vody – je nutné dodržet co možná nejméně přerušovanou dodávku pitné vody,
- jakost vody – pitná voda nesmí být znečištěna apod., z hlediska regulace se v rámci sítě tvoří ve vodojemech zásoby maximálně na dva dny,
- cena řešení (investice, provoz, údržba) – s cílem snížit celkové náklady na technologii.

Hlavním cílem dizertační práce je návrh regulace tlaku, průtoku a výšky hladiny v soustavě Prameniště Ohrada – vodojem Bečevná – vodojem Rokytnice a vodojem IBV Ohrada, tak, aby byla zachována spolehlivost soustavy při částečném výpadku dodávky pitné vody z přehrady Karolinka. Jedná se tedy o navržení procesních pravidel pro případ poklesu dodávek pitné vody z přehrady Karolinka. Přehrada Karolinka představuje pro město Vsetín hlavní zdroj pitné vody, zároveň je to ale zdroj pitné vody pro přilehlou aglomeraci čítající okolo 80 000 lidí. Město Vsetín má ještě druhý zdroj pitné vody, a to prameniště Ohrada (studna s úpravnou vody). Přivaděč pitné vody z přehrady Karolinka, Stanovnice, zásobuje 11 vodojemů uvažované vodovodní sítě s průměrným průtokem přibližně 250 litrů za sekundu. Z důvodu nedávných oprav přehrady vznikla otázka, zdali je možné z prameniště Ohrada zásobovat i část města Vsetína, která je závislá na dodávce vody z vodojemu IBV Ohrada. Je nutné podotknout, že pro zásobování města Vsetína z Prameniště Ohrada nelze použít přivaděč Stanovice, protože mezi těmito dvěma potrubními částmi neexistuje spojení.

Prameniště Ohrada aktuálně představuje zdroj pitné vody pro části města Vsetína, které jsou zásobeny z vodojemu Bečevná a Rokytnice. Aktuální způsob regulace je odvíjen od výšky hladiny v příslušných vodojemech. Čerpání z Prameniště Ohrada je spouštěno tak, aby hladina ve vodojemu Bečevná neklesla pod hranici jednoho metru. Pokud je to možné, je upřednostňováno čerpání v době levného elektrického tarifu. Obdobně to platí při čerpání z vodojemu Bečevná do vodojemu Rokytnice. Vodojem Bečevná přitom představuje jediný zdroj pitné vody pro vodojem Rokytnice.

V případě omezení dodávky pitné vody ze Stanovnice je odstavena část sítě pro dodávku spotřebitelům a čerpá se přímo do nádrže IBV Ohrada, dokud se nádrž nenaplní. Poté je opět připojena část města Vsetína a k čerpání se v tomto případě nepřistupuje. Bez regulace otáček čerpadla by byl tlak v uzlech, kde jsou připojeni spotřebitelé, větší než dovolených 0,6MPa (a i to je hraniční hodnota, ideálně je tlak 0,35 až 0,45 MPa). Cílem je tedy vytvořit takové procesní pravidla, aby byly dodrženy předem uvedené podmínky a zároveň byly naplněny příslušné vodojemy při zachování spolehlivosti potrubní sítě.

3 ZVOLENÉ METODY ŘEŠENÍ

Po vytvoření rešerši byly zvoleny tyto metody k řešení cílů práce:

- pro realizaci hydraulické analýzy vytvořeného modelu byla zvolena gradientní metoda kvazi-statické hydraulické analýzy,
- gradientní metoda bude implementována do softwarového řešení, ve kterém bude model vytvořen,
- model bude kalibrován a verifikován,
- pro navržení procesních pravidel bude použit genetický algoritmus
- a navržená pravidla budou simulačně ověřena.

4 HLAVNÍ VÝSLEDKY PRÁCE

4.1 METODA HYDRAULICKÉ ANALÝZY

Pro vytvoření modelu soustavy byla zvolena gradientní metoda kvazi-statické hydraulické analýzy. Vyznačuje se poměrně rychlou konvergencí a stabilitou výpočtu. Je definována takto [35]

$$A_{12}H + K(Q) = -A_{10}h_0 \quad (1)$$

$$A_{21}Q = q \quad (2)$$

kde A_{12} ($=A_{21}^T$) je matice incidence neznámých tlaků v uzlech sítě, A_{10} je matice incidence známých (neměnných) uzlových tlaků, Q je vektor průtoků v jednotlivých potrubích, q je vektor tzv. předepsaných průtokových odběrů v uzlech sítě, H je vektor neznámých tlaků v uzlech sítě, h_0 je vektor známých (neměnných) tlaků v uzlech sítě a $K(Q)$ reprezentuje tlakové ztráty (nebo zisky) v úsecích modelu sítě závislé na průtoku.

Z definice například plyne, že v modelu soustavy musí být přítomen alespoň jeden uzel s pevně určeným tlakem. Například model sítě, kdy čerpadlo čerpá do potrubní sítě, ve které není připojena ani jedna nádrž apod. není pro tuto metodu řešitelný. Dále není možné touto metodou studovat přechodové jevy, které doprovázejí např. vypnutí a zapnutí čerpadla, rychlé zavření nebo otevření ventilu apod. Další omezení jsou definovány v [35]. Hlavními jsou

- Q-H charakteristika čerpadla musí být monotónně klesající funkce.
- Funkce, která popisuje tlakové ztráty podél potrubí musí být monotónně vzrůstající.

Obecně je ale algoritmus gradientní metody považován za stabilní a poměrně rychle konvergující. Gradientní metoda je základem většiny komerčně používaných softwarových řešení, která jsou dostupná na trhu. Ve vědecké oblasti je používána hlavně pro návrh tlakových potrubních sítí, jejich optimalizaci, návrhu chodu čerpadel a tak dále. Je základem rozšířených komerčních i nekomerčních aplikací jakou jsou MIKE NET, EPANET apod.

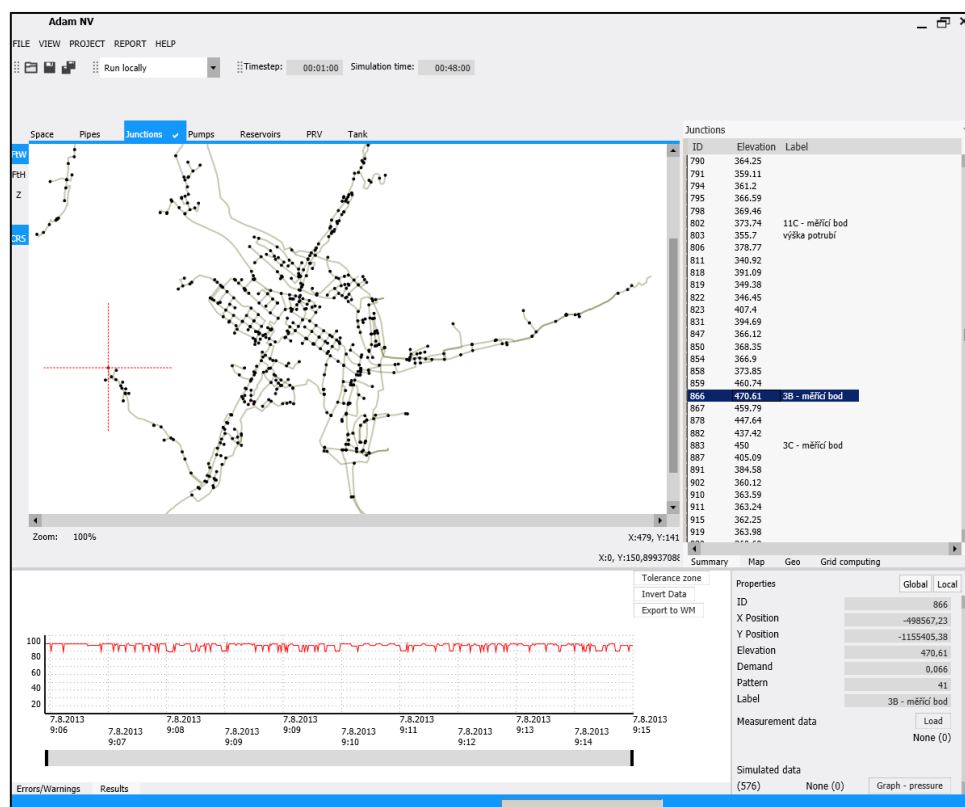
4.2 NÁVRH A RELIZACE SOFTWAREVÉHO ŘEŠENÍ

V rámci řešení dizertační práce bylo nutností vyvinout celé softwarové řešení a jeho implementaci na danou problematiku. Pro zajištění co největší kontroly nad numerickou simulací za účelem hydraulické analýzy tlakové potrubní sítě jsem realizoval celé softwarové řešení nesoucí název ADAM. Hlavní výhodou je možnost plné kontroly nad výpočtem a tokem programu, možnost modifikovat a doplňovat potřebné části kódu apod.

Implementace byla realizována v podobě výbavově rozlišené softwarové rodině ADAM (Obr. 5). Celý software byl navržen jako modulární aplikace pro hydraulickou analýzu potrubních sítí, jejich kalibraci, verifikaci a návrhu procesních pravidel pro říditelné prvky sítě. Software je vytvořen ve dvou základních verzích, které jsou od sebe odlišeny svou funkcí. Doporučená HW konfigurace je:

- procesor 2GHz a vyšší,
- 4Gb paměti a víc,
- 2Gb volného místa na disku,
- grafickou katu podporující DirectX 9.0,
- pro optimální běh programu je vhodné mít SSD disk.

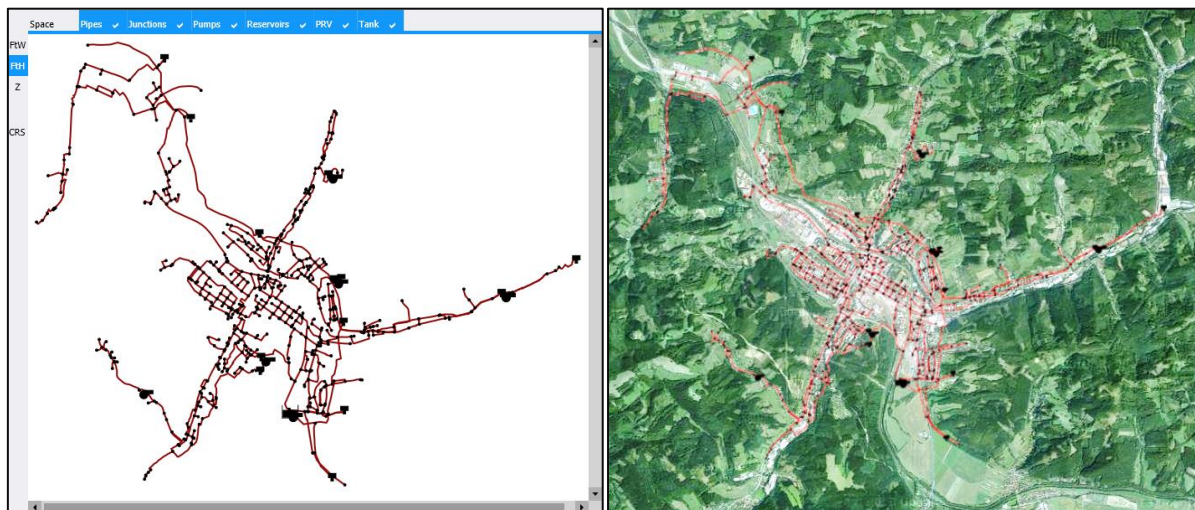
Z hlediska softwarové vybavení je vyžadován operační systém Microsoft Windows XP SP3 a vyšší a .NET Framework 4.0 a vyšší.



Obr. 5 Zobrazení modelu potrubní sítě města Vsetín aplikaci ADAM NS

4.3 MODEL POTRUBNÍ SÍTĚ V APLIKACI ADAM

Potrubní síť slouží k dodávání pitné vody pro město Vsetín a přilehlé obce. Celkové rozmístění jednotlivých prvků potrubní sítě je ukázáno na Obr. 6. Celá potrubní síť byla vypracována dle zadávací dokumentace, prošla procesem kalibrace a verifikace.



Obr. 6 Zobrazení modelu potrubní sítě města Vsetín s podkladovou mapou a bez podkladové mapy (ortofotomapa) v aplikaci ADAM NS

4.4 KALIBRACE A VERIFIKACE

Podstatou celého kalibračního procesu je vhodné nastavení parametrů simulačního modelu tak, aby simulačně získané hodnoty tlaku byly ve shodě s těmi měřenými. Za předpokladu stejných počátečních a okrajových podmínek pro model a reálnou soustavu definujeme tlakový rozdíl jako:

$$\Delta p = p_M - p_C \quad (3)$$

kde p_M je měřený hydrodynamický tlak a p_C je hydrodynamický tlak získaný pomocí simulačního modelu ve stejném bodě při referenčním průtoku. Model je považován za validní, pokud platí $\Delta p \leq 0,01 \text{ MPa}$. Požadavek větší přesnosti většinou není nutný i s ohledem na použitý měřicí aparát. Kalibrace modelu je rozdělena do tří navazujících částí – měření na potrubní síti, celoplošná kalibrace a detailní kalibrace [36], [37].

Celoplošná kalibrace

Je prováděna pro korekci modelu sítě k odstranění hrubých chyb v její definici. Na základě měřených dat je v určených bodech sítě sledován tlak a průtok v časovém intervalu od několika dnů až po měsíce. Hlavní sledované parametry modelu jsou:

- tlakové pásma,
- průtok – směr a přibližná hodnota,

- výška hladiny v nádržích,
 - charakteristiky čerpadel apod.,
- přičemž jsou v této části kalibrace převážně odstraňovány tyto chyby:

- chybějící potrubí,
- omylem uzavřené potrubí,
- špatně definovaná topologie,
- špatně definovaná výška nádrže

Výstupem musí být model sítě, jehož výsledky dobře odpovídají skutečně naměřeným hodnotám.

Detailní kalibrace

Proces detailní kalibrace je postupný proces zaměřený na přesnější kalibraci v rámci menších částí hydraulické sítě, který navazuje na úspěšně ukončený proces celoplošné kalibrace. Typicky jde o spojitě sekce potrubní částí, jejichž délka se pohybuje od přibližně 500 do 1000 metrů délky. V této části kalibrace je model hydraulické sítě upravován tak, aby bylo vyhověno podmínce (3). Úprava modelu je docílena modifikací parametrů. Obvykle se detailní kalibrace provádí hlavně pro úseky, které mají na celou síť největší vliv.

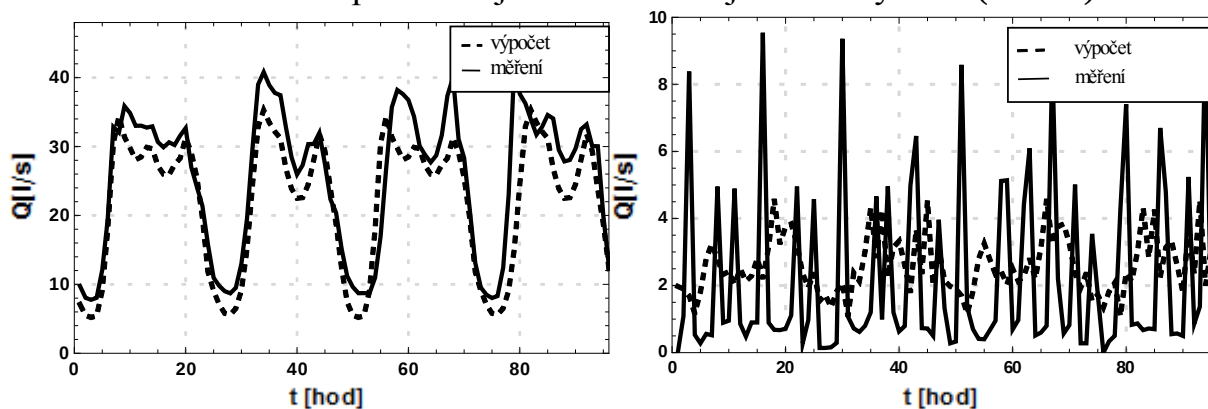
Verifikace modelu

Verifikací modelu rozumíme schopnost simulačního modelu s předem danou přesností predikovat chování reálné soustavy. Požadovaná přesnost je závislá např. na typu modelované sítě, její velikosti, přenášeném médiu, přesnosti použitých měřicích prostředků, použité výpočtové metodě apod. Úspěšná verifikace modelu je podmínkou pro použití modelu v reálném provozu a je nutné brát v úvahu, že opravňuje použití modelu jen pro např. určitý interval tlaků a průtoků apod. Verifikovaný model soustavy není vhodné používat např. mimo pásma tlaků, které jsou svým rozsahem mimo rozsah kalibračních dat.

Proces kalibrace a verifikace byl implementován do aplikace ADAM jako toolbox.

4.5 OVĚŘENÍ MODELU POTRUBNÍ SÍTĚ MĚSTA VSETÍN

Měření pro porovnání se simulačními hodnotami bylo provedeno na dvou místech tlakové potrubní sítě. První sada měřených dat představuje odběr z vodojemu Bečevná. Druhá sada dat představuje odběr z vodojemu Rokytnice (Obr. 7).



Obr. 7 Porovnání měřených a vypočtených dat

4.6 METODA NÁVRHU

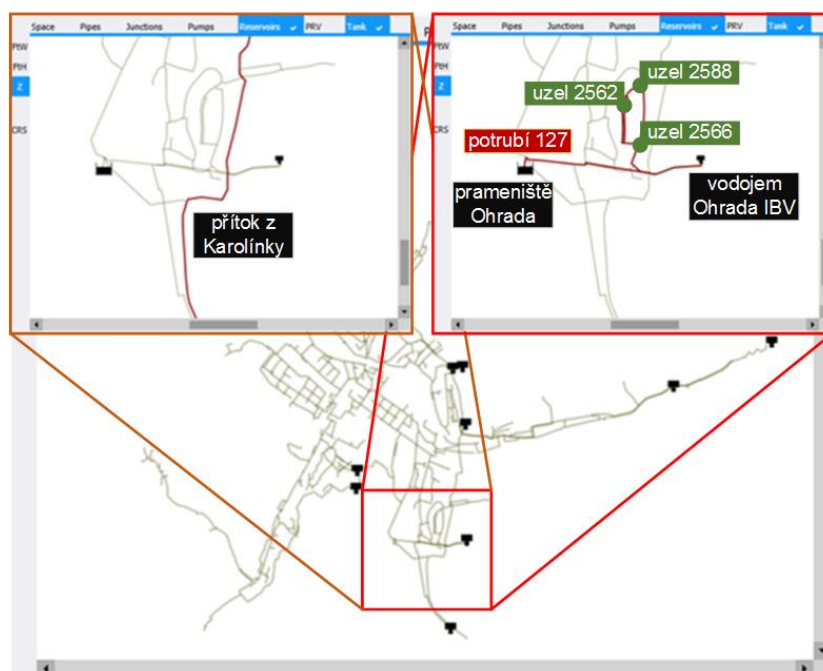
Návrh procesních pravidel je realizován pomocí genetického algoritmu, kdy je hledáno řešení ve formě vektoru obsahujícího pro každý počítaný časový krok číslo, které reprezentuje otáčky čerpadla. Mezi požadavky patří doba simulace, která činí 48 hodin se simulačním krokem 3 minuty. Při tomto nastavení simulace by vektor X měl 960 prvků, což by bylo z hlediska optimalizace prakticky nemožné dosáhnout. Proto byla možnost zásahu omezena na 15ti minutové intervaly. Skutečnost, že je hydraulická analýza uskutečňována pomocí EPS, má za následek, že není možné jednu simulaci rozdělit a hledat vektor X pro simulace s menší simulační dobou. Proto jsem výpočetní jádro upravil tak, aby výpočet nebyl dokončen, pokud alespoň jeden z výsledků neodpovídá zadaným regulačním omezením (velmi obecně Tab. 1)

Tab. 1. Upravený algoritmus výpočtu

```
N1: [Initialize of objects in model]
N2: [Initialize of static heads and node consumptions]
N3: [EPS] While(EndOfSimulation)
    Calculate demands
    Calculate regulation actions
    HA algorithm (Tab 1)
    If (RegulationConditions satisfied) -> Continue
    Else EndOfSimulation -> N4
N4: [EPS] EndWhile
N5: Save calculated data
```

Popis regulované soustavy

Regulovaná soustava je součástí potrubní sítě pro dodávku pitné vody pro město Vsetín, přičemž regulace je navrhována pro situaci, kdy hlavní zdroj pitné vody, přehrada Karolinka, není v plné výši schopen dodávek pitné vody. Topologie sítě je na Obr. 8. Z prameniště ohrada je pitná voda čerpána horizontálními čerpadly firmy Vogel MPA 125 2/3 (příkon 45kW) nebo MPA 125 2/5 (75kW). Každé čerpadlo je zálohováno identickým čerpadlem. Při čerpání do vodojemu Bečevná jsou průtoky 35 respektive 20 litrů za sekundu. Z vodojemu Bečevná se čerpá pomocí čerpadla firmy Grundfos CR 45-3A (11kW, cca. 12 litrů za sekundu).



Obr. 8: Mapa regulované soustavy v zobrazená v softwaru ADAM NS

Simulační výsledky regulace

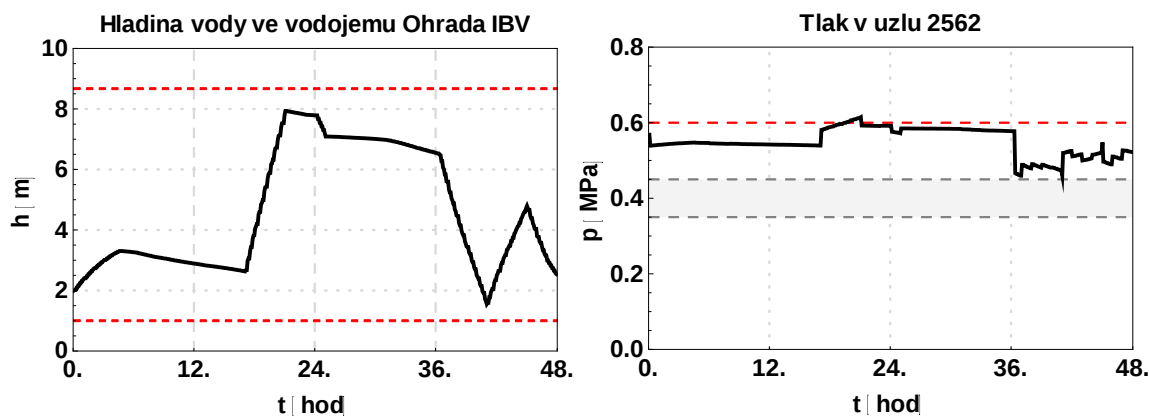
Regulace byla provedena za těchto počátečních podmínek:

- začátek simulačního experimentu je stanoven na půlnoc pracovního dne před volným dnem,
- doba simulace je stanovena na 48 hodin,
- počáteční hladina v nádrži je metr nad minimem,
- za dodržení výše uvedených podmínek.

Navržená procesní pravidla mají odpovídat těmto omezením:

- tlak ve sledovaných uzlech číslo 2562, 2566 a 2588 nesmí překračovat hranici 0,6MPa,
- ideálně by se tento tlak měl pohybovat v rozmezí 0,35MPa až 0,45Mpa,
- tlakové změny by měli být co nejmenší,
- hladina v nádrži IBV Ohrada nesmí klesnout pod hranici 1 metru.

Navíc je třeba uvážit další skutečnosti. Nejdůležitějším je fakt, že prameniště Ohrada je zároveň zdrojem pro vodojemy Bečevná a Rokytnice. Hlavní omezení zde tedy vzniká v podobě celkové doby čerpání. S ohledem na velikost uvedených vodojemů a spotřebu v rámci zásobovaných částí sítě je povolená doba čerpání do vodojemu IBV Ohrada omezena na přibližně 6 a půl hodin denně (maximálně 8,5 hodiny denně). Mezi další požadavky patří skutečnost, že předpis otáček čerpadla má platit pro dva dny – jeden den pracovní a navazující den volna. Hledáno je jakékoliv odpovídající řešení pomocí implementovaného genetického algoritmu. Nevýhodou tohoto přístupu je, že ne vždy je nalezeno stejné řešení. Výsledky simulačního experimentu jsou zobrazeny na Obr. 9.



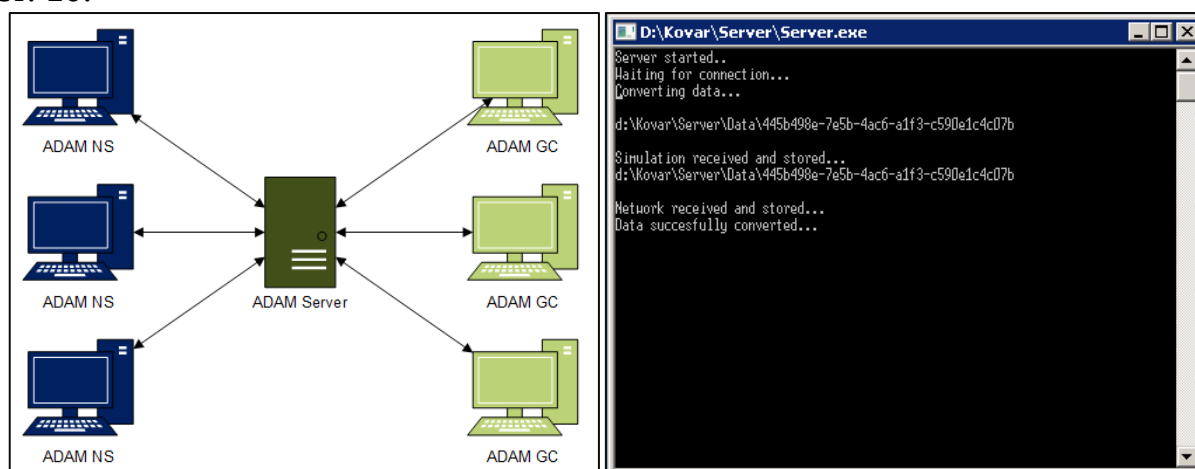
Obr. 9 Vlevo: graf výšky hladiny v IBV Ohrada

Vpravo: tlak v uzlu 2562

4.7 OVĚŘENÍ NAVRŽENÝCH PROCESNÍCH PRAVIDEL

Protože jsou tato navržená procesní pravidla navržena heuristickým algoritmem, je možné k jejich ověření přistoupit pomocí jejich porovnání se všemi možnými konfiguracemi nebo v rámci delší simulační doby. Protože doba simulace jedné konfigurace procesních pravidel trvá přibližně 80 sekund, bylo výhodné distribuovat výpočty na více počítačů. Z tohoto důvodu jsem navrhl a realizovat výpočtový distribuční server (ADAM Server, není součástí aplikační rodiny ADAM). Tato konzolová aplikace je tvořena jako bezobslužná. Není v ní tedy možné navrhovat sítě ani modifikovat pravidla a omezení pro návrh regulace. ADAM Server je schopen distribuovat časově náročné výpočty na připojené výpočetní stanice a výsledky potom předávat klientu.

Na server je zasílán soubor s definicí sítě a dále soubor s definicí jednotlivých procesních pravidel říditelných prvků a se seznamem sledovaných parametrů. Server jednotlivé výpočty distribuuje volné výpočtové stanice (ADAM GC), které zpětně posílají jen výsledky simulačních výpočtů. Porovnání je prováděno jen na straně serveru. Struktura zapojení serveru do výpočtů a ukázka hlavního okna serveru je na Obr. 10.

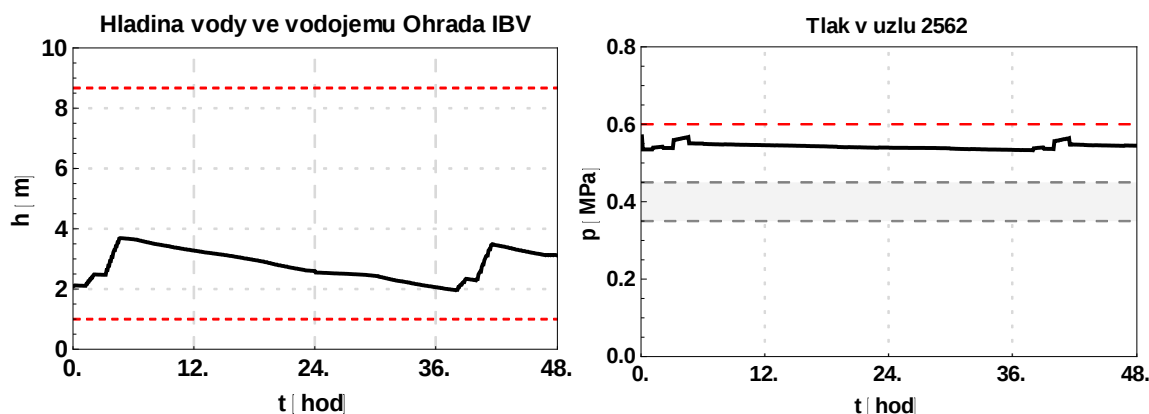


Obr. 10 Vlevo: ilustrace distribuce výpočtu pomocí serveru;

Vpravo: Konzolová aplikace ADAM Server

Test č. 1

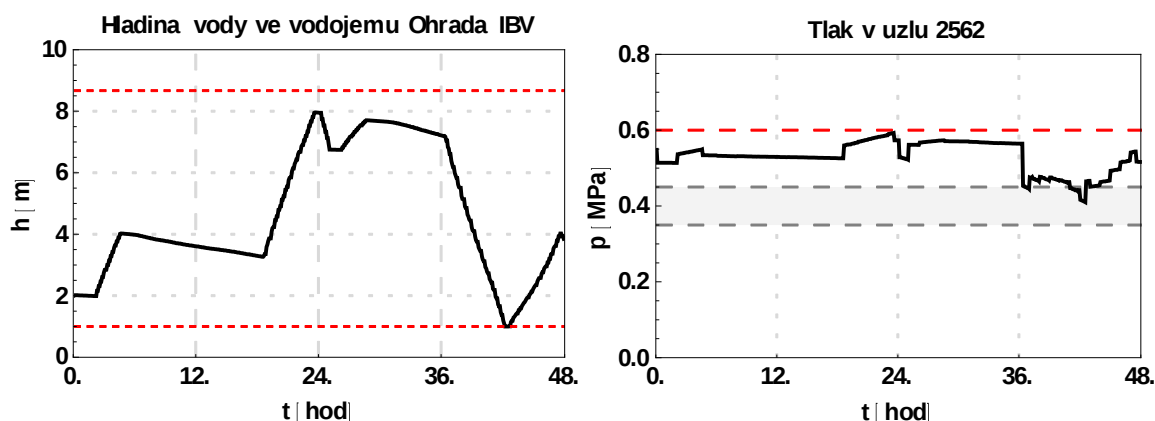
Doba výpočtu simulace v tomto případě byla omezena na 4 hodiny. Z výsledků je patrné, že dodávka pitné vody se v tomto případě přesunula z IBV Ohrady na připojenou část potrubní sítě, která zásobuje centrum města Vsetína (Obr. 11). V tomto případě se jedná o nechtěný důsledek, který je patrně zapříčiněn nedostatečně vymezenými pravidly simulace.



Obr. 11 Vlevo: graf výšky hladiny v IBV Ohrada
Vpravo: tlak v uzlu 2562

Test č. 2

Doba výpočtu v tomto případě byla omezena na 1 hodinu. Omezující podmínka, kdy se musí čerpat maximálně 8,5 hodiny denně, byla vyměněna za podmínku, že se může čerpat kdykoliv v době, kdy se nečerpá do vodojemu Bečevná. Výsledky jsou podobné jako v předchozí kapitole, nicméně dochází k nežádoucímu poklesu hladiny ve vodojemu IBV Ohrada v 43 hodině simulačního experimentu (Obr. 12). Také doba čerpání se prodloužila.



Obr. 12 Vlevo: graf výšky hladiny v IBV Ohrada
Vpravo: tlak v uzlu 2562

5 ZÁVĚR

Hlavním cílem této dizertační práce byl návrh regulace průtoku a tlaku v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž, která je součástí širší tlakové potrubní sítě, za použití mechatronického přístupu. V návaznosti na formulaci teoretických východisek byla vytvořena řešeršní studie související s danou problematikou, na jejímž základě byla provedena analýza získaných poznatků a formulovány dílčí cíle práce. Návrh je definován jako optimalizační problém, jehož výsledkem jsou procesní pravidla, které popisují rozložení funkčnosti regulačních prvků soustavy. V tomto případě čerpadel. K nalezení řešení optimalizačního problému je použit genetický algoritmus. Hydraulická analýza potrubní sítě pro dopravu pitné vody města Vsetína je řešena použitím gradientní metody. Model je dále kalibrován, verifikován a porovnán s měřenými hodnotami. Uvedené skutečnosti jsou implementovány do aplikace ADAM, která byla v rámci dizertační práce vytvořena.

5.1 TEORETICKÝ PŘÍNOS

Hlavním teoretickým přínosem předkládané dizertační práce jsou:

- **návrh metody pro regulaci tlaku, průtoku a výšky hladiny v soustavě čerpadlo-potrubí-nádrž jako součást širší hydraulické potrubní sítě:** Návrh regulace tlaku, průtoku a výšky hladiny je formulován jako optimalizační problém, jehož řešení je hledáno pomocí genetického algoritmu. Výstupem je časové rozložení funkčnosti regulačních prvků soustavy, zejména čerpadel. Regulační metodou navržená procesní pravidla byla tvořena pro tlakovou potrubní síť pro dopravu pitné vody města Vsetína, konkrétně pro částí sítě Prameniště Ohrada, vodojem Bečevná, vodojem Rokytnice a vodojem IBV Ohrada pro případ částečného výpadku dodávky z přehrady Karolinka,
 - mechatronický přístup ke zpracování modelu hydraulické soustavy,
 - vytvoření metodiky kalibrace sítě,
 - vytvoření metodiky verifikace sítě.

5.2 PRAKTICKÝ PŘÍNOS

Jako hlavní praktický přínos lze označit vytvoření softwaru pro hydraulickou analýzu potrubních sítí – ADAM. Tento software již využívají v testovacím provozu pracovníci FAST VUT v Brně například za účelem tvorby odkalovacích plánů vodovodních sítí.

Za důležité další praktické přínosy lze označit:

- implementaci metodiky kalibrace sítě,
- implementaci metodiky verifikace sítě,
- navržený algoritmus hledání procesních pravidel,
- vytvořený výpočetní server pro hydraulickou analýzu potrubních sítí.

5.3 PEDAGOGICKÝ PŘÍNOS

Jako hlavní pedagogický přínos předkládané dizertační práce je plánované použití softwaru ADAM pro pedagogické účely na Ústavu vodního hospodářství FAST VUT v Brně v rámci výuky konané v magisterských studijních programech. Aplikace ADAM, která je dílčím výsledkem předkládané dizertační práce, je využitelná pro další pedagogickou činnost v rámci bakalářských a diplomových závěrečných prací z oblasti automatizace a informatiky, přičemž v rámci řešení předkládané dizertační práce vyvstaly nové problémy, které je možné dále řešit například v rámci VaV projektů. Dílčím přínosem předkládané dizertační práce je možnost rozšíření hydraulického řešiče aplikace ADAM (díky použité softwarové architektuře MVVM), případně jeho náhrada za jiný, a vytvoření tak nového nástroje například pro jiný typ analýzy tlakových potrubních sítí. Dalším potenciálním využitím aplikace ADAM je možnost implementace metod pro detekci úniků přenášeného média z potrubních sítí. Neposledním přínosem práce je vytvoření výpočetní serveru – ADAM Server a výpočtového klienta ADAM GC, jehož výpočetní jádro může být rovněž nahrazeno za jiné při zachování stejné komunikační struktury. Samozřejmá je možnost využití aplikací ADAM Server a ADAM GC v rámci výuky informatiky pro účely studia distribuovaných výpočtů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] International Energy Agency, World Energy Outlook 2009, [citováno 14.8.2013]
<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/2009/WEO2009.pdf>
- [2] de ALMEIDA, A.T., FERREIRA, F.J.T.E., FONG, J., FONSECA, P., EUP Lot 11 Motors, ISR - University of Coimbra, 2008, [cit. 14.8.2013]
http://www.ebpg.bam.de/de/ebpg_medien/011_studyf_08-04_motors_updated.pdf
- [3] „VDI 2206 Design methodology for mechatronics systems“ 2002
- [4] MABE, W. J., US Patent 5240380: Variable speed control for centrifugal pumps
- [5] BERTHELSEN, L. H., US Patent 8019479: Control algorithm of variable speed pumping systém
- [6] GRENN, CH. W., US Patent 3918831: Centrifugal pump with variable impeller
- [7] ROBB, G. A., a kol., US Patent 2004/0064,292: Control systém for centrifugal pumps
- [8] MOORE, T. A., a kol., US Patent 4257745: Automatic control systém of centrifugal pumps
- [9] CEMBRANO, G., WELLS, G., QUEVEDO, J., PÉREZ, R., ARGELAGUET, R., Optimal control of a water distribution network in a supervisory control system, Control Engineering Practice, Elsevier, 2000
- [10] LAI, D., SCHAAKE, J.C., Linear programming and dynamic programming application to water distribution network design, MIT Hydrodynamica Laboratory, Cambridge, 1969
- [11] KOHLHASS, C., MATTERN, D.E., An algorithm for obtaining optimal looped pipe distribution networks, Papers of the 6th annual symposium on the application of computers to the problems of urban society, New York, 1971
- [12] ALPEROVITS, E., SHAMIR, U., Design of optimal water distribution systems, Water resources research, 1977
- [13] ORMSBEE, L., LINGIREDDY, S., CHASE, D., Optimal pump scheduling for water distribution systems, Multidisciplinary international conference on scheduling: theory a application, Dublin, Ireland, 2009
- [14] ERTIN, E., DEAN, A.N., MOORE, M.L., PRIDDY, K.L., Dynamic optimization for optimal control of water distribution systems, Proc. Spie, 2001
- [15] CROSS, H., Analysis of flow in networks of conduits or conductors, Bulletin no. 286, Engineering experiment station, University of Illinois, 1936
- [16] SHAMIR, R., HOWARD, C.D.D., Water Distribution Systems, Analysis, Proc ASCE, 1968
- [17] FIETZ, T.R., Hydraulic network analysis using linear theory, ASCE
- [18] EPP, R., FOWLER, A.G., Efficient code for steady state flows in networks, Journal of the hydraulic division, Proceedings of the american society of civil engineers, 1970
- [19] HAMAM, Y. M., BRAMILLER, A., Hybrid method for the solution of piping networks, Proceedings institution of electrical engineers, vol., 118, no.11
- [20] WOOD, D.J., CHARLES, C.O.A., Hydraulic network analysis using linear theory, Journal of the hydraulic division ASCE, vol.98, no. hy7
- [21] CHANDRASHEKAR, M., Extended set of components in pipe networks, Journal of the hydraulic division, ASCE, vol. 106, no. hy1
- [22] JEPSON, R.W., DAVIS, A.L., Pressure reducing valves in pipe network analysis, Journal of the hydraulic division, ASCE, vol. 102, no. hy7
- [23] RAO, C.R., BREE, D.W., Extended period simulation of water systems – Part A, Journal of the hydraulic division, ASCE, vol. 103, no. hy2

- [24] TODINI, E., PILATI, S., A gradient algorithm for the analysis of pipe networks, Computer applications in water supply, Tauton, UK
- [25] IFTEKHAR, A., Application of the gradient method for the analysis of unsteady flow in water networks, Ph.D. práce, The University of Arizona, 1997
- [26] BRDYS, M.A., ULANICKY, B., Operational control of water systems: structures, algorithms and applications, UK Prentice-Hall international
- [27] COULBECK, B., Optimization and modelling techniques in dynamic control of water distribution systems, Ph.D. práce, University of Sheffield, UK
- [28] JAMIESON, D. G., SHAMIR, U., MARTINEZ, F., FRANCHINI, M., Conceptual design of a generic, real-time, near-optimal control system for water distribution networks, Journal of HydroInformatics, 2007
- [29] MURPHY, L. J., SIMPSON, A. R., DANDY, G. C., Pipe Network Optimization using an Improved Genetic Algorithm, Research Report No. R 109, University of Adelaide
- [30] SAKARYA, A.B.A., MAYS, L.W., Optimal operation of water distribution pumps considering water quality, J Water Resour Plan Manage, ASCE
- [31] OMRSBEE, L.E., WALSKI, T.M., CHASE, D.V., SHARP, W.W., Methodology for improving pump operation efficiency, J Water Resour Plan Manage, ASCE
- [32] van ZYL, J.E., SAVIC, D.A., WALTERS, G.A., Operational optimization of water distribution systems using a hybrid genetic algorithm, J Water Resour Plan Manage, ASCE
- [33] GOLDMAN, F.E., MAYS, L.W., Chapter 5 Water distribution system operation: application of simulated annealing, Water resources systems management tools, McGraw-Hill, New York
- [34] TSAI, F. T.-C., KATIYAR, V., TOY, D., GOFF, R.A., Conjunctive Management of Large-Scale Pressurized Water Distribution and Groundwater Systems in Semi-Arid Area with Parallel Genetic Algorithm, Water Resour Manage, 2009
- [35] SALGADO-CASTRO, R., O., Computer modelling of water supply distribution networks using the gradient method, Volume One & Two, Ph.D. thesis, Newcastle university
- [36] RUCKA, J., KOVAR, J., Prevention of discoloration events in water distribution systems, 12th International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2013, IN PRESS
- [37] WU, Z.Y., Optimal calibration method for water distribution water quality model, Journal of Environmental Science and Health, Part A, LESA, 2006

AUTOROVO CV

Osobní údaje

Ing. Jiří Kovář

narozen 7. 1983 ve Valticích

Pracoviště

Ústav automatizace a informatiky

Fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně

Technická 2896/2

616 69 Brno

Funkce na pracovišti

technický pracovník

Vzdělání a akademická kvalifikace

2008: Ing. (Bc.) FSI VUT v Brně, Mechatronika

2003: Střední průmyslová škola Edvarda Beneše Břeclav, Slaboproudá elektrotechnika

Přehled zaměstnání

2012-dosud: NETME, technický pracovník

2009-dosud: UAI FSI VUT v Brně, technický pracovník

2009:TLC, tech. školitel IT

2003:Heat Transfer Systems s.r.o., kontrolor kvality

2002: Standard Oil Company, technický pracovník

Pedagogická činnost

Výuka cvičení předmětů: Informatika

Vědecko výzkumná činnost, zapojení do projektů

Modelování a řízení soustav s redundantní aktuací

Možnosti propojení programu National Instruments LabVIEW a databáze

Vývoj řízení a senzoriky nekonvenčních mechatronických zařízení

Virtuální kurz k programu Microsoft Access ve výuce technicky zaměřených bakalářských studijních programech

Virtuální kurz k programu Microsoft Access ve výuce technicky zaměřených bakalářských studijních programech

Vývoj řízení a senzoriky nekonvenčních mechatronických zařízení

Komplexní cenově dostupný řídicí systém leteckých motorů

Spolupráce s průmyslem

Vývoj komplexní pohonné jednotky atd.

ABSTRACT

The proposed work is dealing with control design of pump-tank system as part of broader water-supply network with using of mechatronic approach. The main goal of this work is design of control for regulation of flow, pressure and water level in tank in water-supply network of Vsetin city. This water-supply network consists of various components, such as pumps, pipes, valves, tanks etc. For the purpose of the control design is necessary to create a model of pipe network. The solution of hydraulic analysis is obtained by using the gradient method, which was implemented into the software solution named ADAM. The results of hydraulic analysis are compared with measured values of flow and pressure and difference of these values has to be minimalized by proposed calibration and verification process. The calibration and verification process was implemented in software ADAM. The essence of design control is formulating control problem as optimization problem. Therefore the output of higher control layer is set of procedural rules, which determines for example speed of pumps in time etc. Results were verified by using for this purpose developed computational server (ADAM Server).