

## OTVORENA SOFTVERSKA ARHITEKTURA ZA MODELIRANJE, SIMULACIJU I UPRAVLJANJE DISTRIBUTIVNIM VODOVODNIM SISTEMIMA\*

Aleksandar ERDELJAN, Imre LENDAK, Srđan VUKMIROVIĆ, Darko ČAPKO  
Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu

### REZIME

Na tržištu se može naći velik broj kvalitetnih softverskih rešenja koja se koriste u oblastima modeliranja, simulacije i upravljanja distributivnim vodovodnim sistemima. Nedostatak ovih proizvoda je da uglavnom ne mogu međusobno da komuniciraju. Rad predlaže softversku arhitekturu koja omogućava integraciju različitih softverskih proizvoda za modeliranje, simulaciju i upravljanje vodovodnim distributivnim mrežama. Ti softverski proizvodi se posmatraju kao podsistemi i njihova funkcionalnost je očuvana. Time se dobija jedinstven sistem u kome su delovi posvećeni svojstvenim problemima međusobno povezani. Predloženo rešenje se sastoji od zajedničkog *softbus*-a i softverskih adaptera koji povezuju podsisteme sa *softbus*-om. Koncept je proveren povezivanjem alata EPANET, MATLAB i SCADA softvera u jedinstvenu celinu. Rešenje je proširivo jer se dodavanjem novih adaptera omogućava povezivanje proizvoljnog broja novih softvera u sistem.

**Cljučne reči:** servisno orijentisana arhitektura, softverski modeli, distributivni vodovodni sistemi, sistemi za upravljanje i nadzor

### 1. UVOD

Savremeni distributivni vodovodni sistem sadrži računarima opremljen komandno-kontrolni centar odakle se vrše nadzor i upravljanje radom sistema. To je samo jedan deo računarski pokrivenog poslovanja preduzeća. Upravljanje distribucijom vode čine grupe inženjerskih poslova koji se izvršavaju u realnom vremenu (ili blisko realnom vremenu): operacije u distributivnoj mreži, praćenje inventara, održavanje i

radovi, podrška potrošačima, očitavanje potrošnje i lokalno upravljanje. Dodatne grupe inženjerskih poslova se odnose na: planiranje i optimizaciju operacija, planiranje izmena i širenja mreže. One se mogu sprovesti van realnog vremena. Pored ovih, u preduzeću postoje i druge grupe poslova, vezane za: naplatu potrošnje, finansije, magacine i nabavke, ljudske resurse, marketing, prodaju i ugovore, i sl. Tipično je da se svi nabrojani poslovi uglavnom pokrivaju zasebnim softverima između kojih se razmenjuje malo ili čak nimalo informacija.

Komercijalno raspoloživi SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) softver obično realizuje samo osnovne funkcije nadzora i upravljanja. Međutim, kada se posmatra cela grupa poslova koja se odnosi na operacije u distributivnoj mreži (nadzor rada mreže, upravljanje njenim radom, proračune u realnom vremenu, upravljanje kvarovima, analize uticaja manipulacija, formiranje izveštaja i sl.) potreban je dodatni softver koji implementira napredne funkcionalnosti.

Takvu naprednu funkcionalnost pruža UMS (*Utility Management System*) koji je sofisticirani upravljački sistem gde su osnovne SCADA funkcije nadograđene modulima za simulaciju i analizu rada sistema [1, 2]. Teži se sveobuhvatnom softverskom sistemu gde se svaka od nabrojanih grupa poslova može realizovati kao skup servisa. Ti servisi su dostupni ne samo unutar grupe, nego i na nivou sistema, tako da jedna grupa poslova može pozivati servise iz drugih grupa. Na primer, za servis naplate potrošnje potrebni su podaci iz servisa koji beleži potrošnju. Da bi se to postiglo, potrebno je da su svi moduli koji implementiraju nabrojane grupe poslova međusobno povezani preko jedinstvene „softverske magistrale“. Brojne su prednosti

\* Ovaj članak rezultat je rada na projektu 410019 - Informaciono-upravljački sistem vodovodnih sistema većih naselja

takvog pristupa: jasna podela posla između servisa, u svakom trenutku rezultati rada servisa su dostupni celom sistemu, omogućeni su složeni proračuni zasnovani na radu više servisa, unos podataka se vrši samo na jednom mestu (servisu), novi servisi se mogu dodavati (ili postojeći proširivati) bez uticaja na rad postojećih i sl. Dodatne prednosti u sistemima gde je neophodna stalna raspoloživost su olakšano udvajanje servisa i imunost na hardversko-softverske ispađe [3].

Implementacija UMS-a zasnovana na jednom softverskom proizvodu koji potpuno odgovara potrebama korisnika je teško ostvariva. Mnogo realniji je UMS sastavljen od softverskih modula raznih proizvođača (gde pojedini delovi mogu biti razvijeni sopstvenim snagama). Problem kod ovog pristupa jeste integracija modula koji moraju međusobno da komuniciraju. Međutim, kako je implementacija UMS „od nule“ skupa i zahteva višegodišnji period uhodavanja, većina UMS implementacija će nastojati da iznikne na osnovama postojećih softverskih rešenja u preduzeću. To dodatno otežava integraciju jer su softverski moduli razvijeni u različitim vremenskim trenucima, za različite ciljne operativne sisteme, podržavaju različite komunikacione tehnologije, ili su čak (u najgorem slučaju) potpuno zatvorene arhitekture.

Pored toga, svaki deo sistema ima svoj sopstveni model podataka. Time je nemoguća razmena informacija između delova sistema ukoliko se ne izvrši usaglašavanje modela podataka. Kako se ovde radi o većem broju aplikacija koje je potrebno povezati, neophodno je definisati zajednički model podataka i za svaku od aplikacija napraviti prevođenje njenog internog modela u zajednički i obratno. Ovde pomenuti zajednički model podataka ne treba posmatrati kao relacioni model podataka u bazi podataka, jer je on opštiji i obično se objektno modelira [4, 5]. Pored toga, svaki od servisa može da skladišti svoje podatke u nekoj bazi podataka u formatu koji je njemu pogodan, ali se to ne mora dovoditi u vezu sa zajedničkim modelom.

Cilj ovog rada je da predloži jednu otvorenu arhitekturu koja omogućava izgradnju UMS od postojećih upravljačkih (SCADA) i simulacionih softvera navedenih u narednoj glavi rada. Treća glava detaljno opisuje predloženu arhitekturu sa akcentom na jedinstveni programski interfejs i potrebne adaptore. Četvrta glava rada opisuje objedinjeni softverski model WCIM. Predložena arhitektura i WCIM model su implementirani na prototipu opisanom u petom poglavlju. Na

kraju rada su diskutovane performanse prototipa i pokazana je opravdanost primene predloženog rešenja.

## 2. PREGLED POSTOJEĆIH ALATA

Na osnovu brojnih aplikacija u svetu, upravljanje distributivnim mrežama se uspešno realizuje nekim od komercijalnih SCADA softverskih paketa [6]. Sa druge strane modeliranje i simulacije mreže se mogu vršiti u tipski drugačijim, ali takođe raspoloživim paketima. I jedni i drugi se sreću u vodovodnim preduzećima i predstavljaju dobre kandidate za aplikacije koje mogu realizovati neke od servisa UMS-a. Većina ovih paketa se izvršava na Microsoft Windows platformama gde prisutne komunikacione tehnologije (COM/DCOM, MSMQ, .NET) olakšavaju povezivanje aplikacija. Među njima je veliki broj HMI/SCADA paketa koji podržavaju OPC komunikacione specifikacije [7, 8, 9], čime se u velikoj meri olakšava integracija sa takvim paketima. Primeri takvih softverskih paketa su:

- OASyS DNA sa specijalizovanim proširenjem Water Management Suite - firme Telvent, Španija.
- SIMATIC WinCC – firme Siemens, Nemačka
- iFIX – firme GE Fanuc-a, SAD (ranije Intellution, SAD)
- VipWin – firme Festo, Nemačka
- RSView32 – firme Rockwell Automation, SAD
- Geographically Distributed SCADA (Geo-SCADA) – firme Wonderware u okviru grupe Invensys, SAD.

EPANET spada među najpoznatije softverske pakete za modeliranje i simulaciju hidrauličkih svojstava distributivnog vodovodnog sistema. Razvijen je od strane američke agencije za zaštitu životne sredine (US EPA) [10]. Pored hidrauličkog ponašanja, on pruža mogućnost modeliranja i simulacije promena u kvalitetu vode. Paket je besplatan i dostupan preko Interneta širokom krugu korisnika. Platformski je nezavisan jer je napisan u "čistom" C kodu koji se prevodi u statičku biblioteku sa metodama koje se mogu pozivati iz spoljašnjih aplikacija. Tako posmatrano, EPANET je veoma pogodan alat za realizaciju UMS servisa. Komercijalni paketi koji su nastali na osnovama EPANET-a i znatno ga unapredili, poput MIKE NET-a, WesNet-a ili InfoWorks-a, omogućavaju znatno širu primenu. Oni su kompatibilni sa pojedinim GIS i SCADA paketima i podržavaju veći broj komunikacionih tehnologija tako da se očekuje da se mogu jednostavnije uklopiti u UMS sistem. Takođe je važno napomenuti da su ovi alati namenjeni Microsoft Windows platformama.

Pored specijalizovanih softverskih alata za modeliranje i simulaciju vodovodnih sistema, kandidati za UMS su i simulacioni alati opšte namene. Možda najpoznatiji alat među njima je MATLAB koji se ugradnjom *toolbox*-ova lako proširuje i specijalizuje za brojne oblasti. Postoje instalacije MATLAB-a za različite operativne sisteme, a među njima se izdvaja Windows verzija sa najboljom podrškom za razne komunikacione tehnologije, poput COM/DCOM-a i OPC-a. Takođe, moguće je integrisati MATLAB kod sa drugim aplikacijama (Microsoft Excel, RDBMS) ili algoritmima realizovanim u programskim jezicima: Fortran, C/C++ ili Java.

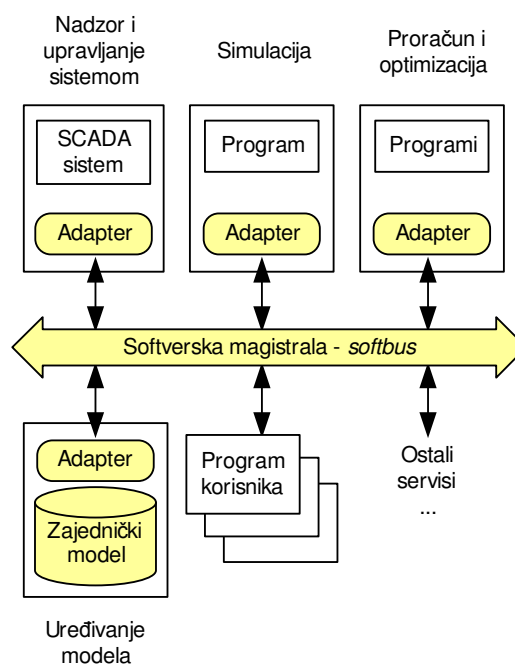
### 3. ARHITEKTURA SISTEMA

Pitanje na koje ovaj rad treba da odgovori je kako povezati postojeće heterogene softverske alate u jedinstven sistem [11, 12]. Kao odgovor na ovo pitanje predlaže se globalna arhitektura sistema koja se sastoji od niza servisa povezanih jedinstvenom softverskom magistralom - *softbus*-om. Uloga *softbus*-a (zajedno sa pratećim sistemskim servisima) je da olakša povezivanje aplikacija koje implementiraju pomenute servise, kontroliše njihov rad i da posreduje u prenosu podataka. Slika 1 prikazuje svega nekoliko servisa, ali je osnovna ideja da se sistem može proširivati dodatnim servisima, kao i da se postojeći servisi mogu zameniti ili proširiti bez uticaja na ostale servise. Svaki od servisa sadrži adapter kao prilagodni stepen između *softbus*-a i konkretne aplikacije koja implementira neku funkcionalnost značajnu za sistem. On prihvata pozive i poruke upućene servisu, odgovara na njih i može slati poruke drugim servisima da bi izazvao njihovu reakciju. Pored toga, adapter je potreban da prevodi podatke iz jedinstvenog modela u interni model konkretne aplikacije i obratno. Servis uređivanja modela pruža podatke o modelu vodovodnog sistema i omogućava uređivanje modela. Simulacioni servisi na osnovu stanja vodovodne mreže (statusa pumpi, ventila, zatvarača i sl.) i odgovarajućeg modela mreže proračunavaju vrednosti kako merenih parametara, tako i onih koji se ne mere. Grupa servisa za proračune i optimizacije određuje optimalne strategije i parametre za upravljanje sistemom ili nekim njegovim delom. Dodatni servisi se odnose na neke od grupa poslova nabrojanih u uvodu rada.

Svi ovi servisi mogu biti realizovani od strane različitih aplikacija i da bi se uklopili u jedinstven sistem potrebno je razviti odgovarajuće adaptore. Na primer, adapter SCADA sistema omogućava da tekuće informacije iz nadziranog sistema budu dostupne drugim

servisima, kao i da se SCADA sistem može proširiti dodatnim veličinama, čije vrednosti ne potiču iz upravljačkih i akvizicionih uređaja.

Servis uređivanja modela je neophodna komponenta sistema gde se vrši unos i izmena elemenata zajedničkog modela sistema. Pored rada sa elementima modela, ovaj servis može pružiti meta podatke o modelu, pa čak i omogućiti izmenu šeme podataka. Da bi se pristup podacima modela (bilo da se radi o podacima elemenata ili meta podacima) ostvario na način koji ne zavisi od konkretne šeme podataka implementacija servisa treba da podrži interfejsne definisane DAF [1] i GDA [13] specifikacijama. Pristup podacima zahteva implementaciju barem interfejsa za zahtvat podataka (*IQuery* iz DAF specifikacije). Ukoliko se zahteva i ažuriranje podataka potrebno je implementirati i *IUpdate* interfejs iz GDA specifikacije.

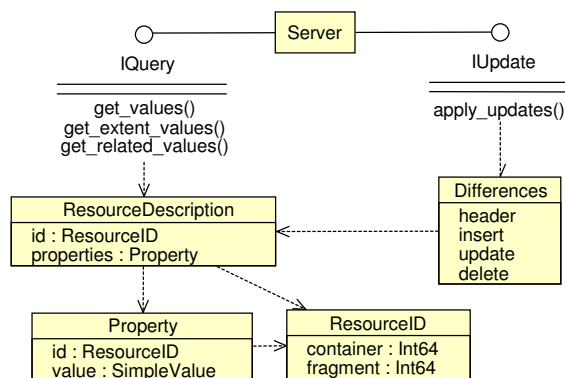


Slika 1. Globalna arhitektura sistema

Adaptori ostalih servisa takođe treba da implementiraju pomenute interfejsne kako bi globalno dostupni podaci svojstveni servisu bili izloženi drugim servisima i da bi se promene zajedničkog modela podataka mogle preneti i u pojedinačne servise. Pored toga, adapter se uvek može povezati na ove interfejsne drugog servisa i od njega preuzeti podatke (klijent-server veza). Stoga, sa strane *softbus*-a prenos podataka zajedničkog modela se

uvek ostvaruje preko standardnih interfejsa, dok se sa druge strane svaki od adaptera povezuje sa aplikacijom koju adaptira na način koji ona podržava.

Da bi se implementirali DAF i GDA interfejsi za pristup konkretnom modelu podataka, potrebno je definisati i realizovati konverzije svih entiteta iz modela u strukture tipa ResourceDescription, opisanog u DAF specifikaciji. Te strukture se sastoje od jedinstvenog identifikatora strukture (ResourceID) i niza atributa (Property), gde se svaki atribut opisuje identifikatorom i vrednošću. Vrednosti atributa nisu strogo tipizirane, sa ciljem da se omogući prenos širokog skupa različitih tipova atributa. Na taj način se potpuno uopšteno može opisati proizvoljna struktura podataka i jednostavno se preneti kroz *softbus* [14].



Slika 2. Interfejsi model servera

Važno je primetiti da ažuriranje modela podrazumeva da promene modela pristižu inkrementalno - u obliku delti, koje se sastoje od operacija dodavanja, ažuriranja i brisanja entiteta iz modela (slika 2). Uloga servisa za uređivanja modela je da prihvati deltu i pokuša da je primeni na tekući model ili je potpuno odbaci.

Primena UMS-a u elektrodistribucijama je poodmakla i dovela je do serija standarda: IEC 61970 za prenosne - EMS (*Energy Management System*) i IEC 61968 za distributivne - DMS (*Distribution Management System*) sisteme. Ideja prikazane globalne arhitekture sistema je potekla iz pomenutih standarda zbog sličnosti između prenosa vode i distribucije električne energije, ali je izvršeno prilagođenje potrebama vodovodnog sistema. Najvažnije razlike se odnose na uvođenje novog modela, uvođenje adaptera ka postojećim aplikacijama i zasnivanje komunikacija na drugačijem *softbus*-u.

Implementacija servisno orijentisane arhitekture [15, 16] se znatno pojednostavljuje kada se zasnjuje na nekom od komercijalno dostupnih *softbus*-ova (IBM WebSphere, Sonic Enterprise Software Bus, Microsoft WCF, OMG CORBA itd).

#### 4. MODEL PODATAKA

Kao što je već rečeno, za razvoj jedinstvenog sistema je neophodno imati zajednički model podataka. Pošto takav model u trenutku pisanja rada nije postojao, pristupilo se njegovom razvoju. Kao polazna tačka iskorišćen je CIM (*Common Information Model*) [17, 18, 19], koji je razvijen od strane IEC-a. CIM je zamišljen kao objedinjeni objektni model elektro-energetskih sistema i omogućava lakšu integraciju različitih softverskih rešenja koja se koriste u proizvodnji, prenosu i distribuciji električne energije.

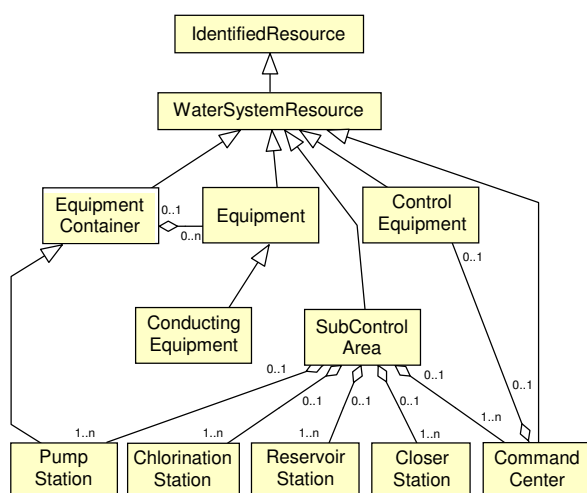
CIM je izabran kao polazna osnova pri razvoju modela iz više razloga. Najvažnija je činjenica da je međunarodni standard sa širokom primenom. Važan faktor je da se vodovodni sistemi mogu modelirati kao grafovi, slično CIM-u. Sa stanovišta softverskog modeliranja je bilo važno što CIM ima opštu hijerarhiju nasleđivanja osnovnih klasa, opšti model povezanosti i opšti model krivih i merenja. Zbog toga su ti delovi skoro u potpunosti preuzeti, i ugrađeni u novonastali objedinjeni softverski model vodovodnih sistema.

Bez obzira na sličnosti između vodovodnih i energetskih sistema (proizvodnja, kontrola kvaliteta, distribucija do krajnjih korisnika), vodovodni sistemi se ipak značajno razlikuju od energetskih, te je za dodatnu polaznu osnovu u razvoju novog objektnog modela, iskorišćen model iz softverskog paketa EPANET [10]. Specifični tipovi opreme koji se pojavljuju u vodovodnim sistemima su izvedeni iz EPANET strukturno orijentisanog modela.

Objedinjavanjem kvalitetnih rešenja iz CIM-a i EPANET-a, uz značajna prilagođavanja, dobijen je novi model podataka distributivnih vodovodnih sistema. On je po svom prvom uzoru, dodavanjem slova W, imenovan WCIM - *Water Systems Common Information Model* [20]. Potpuno je objektno orijentisan i opisan UML-om [4]. Slično CIM-u, klase (tipovi) su grupisane u veće logičke celine (pakete). Paketi koji sadrže bazne klase, provodnu opremu i povezanost će biti prikazani UML klasnim dijagramima.

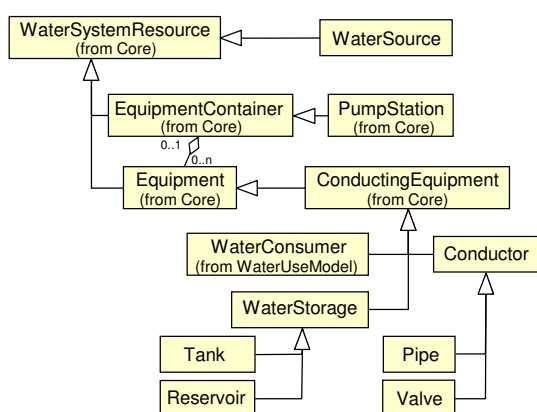
Na slici 3 je prikazan klasni dijagram sa baznim klasama modela. Najvažnije su sledeće klase:

- IdentifiedResource – osnovni tip svih resursa u distributivnom vodovodnom sistemu,
- EquipmentContainer – resurs koji sadrži druge resurse (npr. pumpna stanica - PumpStation),
- Equipment – bilo koji tip opreme,
- ControlEquipment – upravljačka oprema,
- ConductingEquipment – resurs za prenos vode



Slika 3. Bazine klase WCIM-a

Skoro svi tipovi opreme koja se koristi u distribuciji, a identifikovani su na osnovu EPANET modela (pumpna stanica, potrošač, rezervoar, cev, ventil, itd), su nasleđeni iz klase ConductingEquipment i mogu se videti na slici 4.

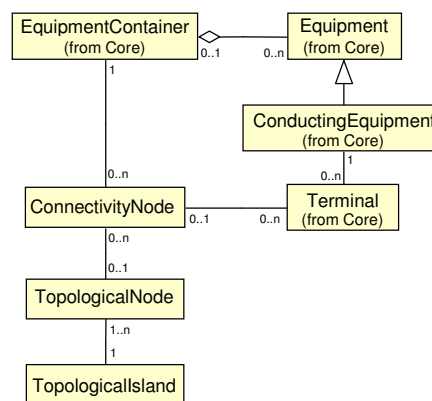


Slika 4. Klase za modeliranje prenosne opreme

Distributivni vodovodni sistem je moguće posmatrati kao graf, gde su grane prenosna oprema (cevi, ventili,

pumpe, itd), a njihove veze čvorovi. Ova ideja je iskorišćena kod razvoja modela povezivanja. Najvažnije klase ovog dela modela prikazane su na slici 5.

Zbog sličnosti između elektrodistributivnih sistema i vodovoda model povezanosti i topologije je preuzet iz CIM-a. Svaki deo prenosne opreme (cev, ventil, itd) ima terminale (Terminal), preko kojih ulazi u vezu sa drugim delovima prenosne opreme. Veze, tj. čvorovi, su modelirane tipom ConnectivityNode. Svi čvorovi se nalaze unutar kontejnera opreme (EquipmentContainer). Čvorovi sa istim pritiskom mogu se grupisati u topološke čvorove (TopologicalNode). Veći broj topoloških čvorova, koji su direktno povezani i ne moraju biti pod istim pritiskom, mogu se grupisati u topološka ostrva (TopologicalIsland).



Slika 5. Model povezanosti i topologije

Uvođenje objedinjenog objektnog modela vodovodnih sistema je važno iz više razloga. Kao prvo, takav model se može koristiti unutar jedinstvenog softverskog sistema vodovoda u svojstvu zajedničkog „jezika“ između komponenti sistema. Kao drugo, u velikom sistemu on se može upotrebiti kao standard za razmenu podataka između UMS-ova. Kao treće, podaci sadržani u WCIM-u se mogu lakše razmeniti na standardizovan način, u RDF/XML formatu [21].

```
<wcm:Pipe rdf:ID="Pipe_11">
  <wcm:Pipe.length> 5280 </wcm:Pipe.length>
  <wcm:Pipe.diameter> 14 </wcm:Pipe.diameter>
  <wcm:Pipe.roughness> 100 </wcm:Pipe.roughness>
</wcm:Pipe>
```

Listing 1. Opis cevi u RDF/XML formatu

Prednost ovog formata u odnosu na EPANET-ov matrični zapis u tekstualnu datoteku jeste snimanje u standardizovani XML, koji ne samo da je čitljiv za ljudsko oko (*human readable*), nego i za računare

(*computer readable*) zbog sveprisutne podrške za XML format.

Treba naglasiti da je u sklopu ovog istraživanja razvijen potpuno novi softverski model distributivnih vodovodnih sistema.

## 5. IMPLEMENTACIJA REŠENJA

Da bi se ispitala ostvarljivost predloženog rešenja, razvijen je prototip sistema, u okviru koga su realizovani servisi prikazani u globalnoj arhitekturi sistema. Implementiran je objektni model WCIM sa perzistencijom podataka u relacionoj bazi podataka, kao i WMS server za pristup i uređivanje WCIM-a. Pored toga, implementirani su adapteri za postojeće softverske pakete: EPANET, MATLAB i komercijalno raspoložive SCADA sisteme.

Sve komponente prototipa su implementirane u Microsoft Visual Studio 2005 razvojnom okruženju gde je korišćen programski jezik C#. Microsoft .NET Remoting je upotrebljen za povezivanje programskih komponenti unutar servisa UMS-a, kao i za prenos podataka preko *softbus*-a. Pored .NET Remoting-a, za prenos podataka preko *softbus*-a implementirani su i *Web Service*-i jer predstavljaju pogodan način komunikacije podržan od velikog broja programskih jezika (uključujući i široko prihvaćen Java programski jezik) i operativnih sistema (MS Windows, Unix, Linux, itd). Time je postignuta platformaska nezavisnost rešenja iako su upotrebljeni Microsoft razvojni alati.

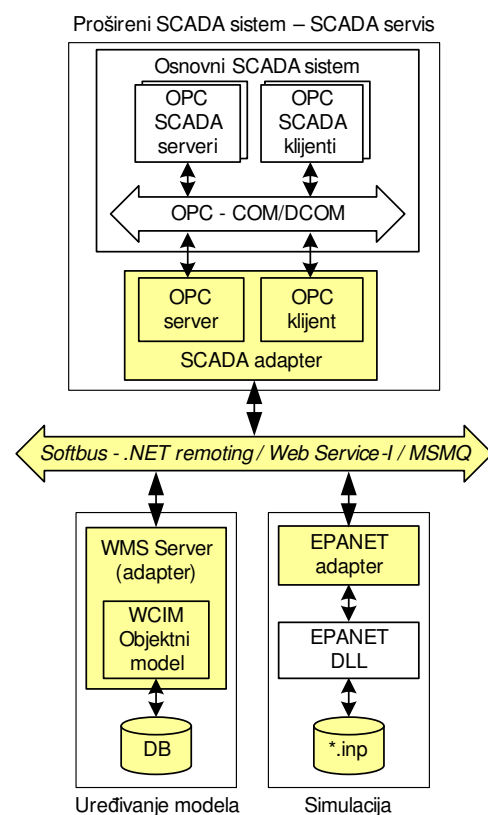
Implementirano rešenje je testirano učitavanjem različitih modela, od jednostavnih, test modela koji dolaze uz EPANET alat, do složenih distributivnih sistema Sremskih Karlovaca i Novog Sada. Izvršeno je povezivanje realizovanih komponenti nekoliko servisa da bi se realizovala dva test scenarija:

- obogaćivanje SCADA pogleda na nadzirani sistem rezultatima *on-line* simulacije i
- nalaženje optimalnog upravljanja pumpama.

### Scenario obogaćivanja SCADA pogleda na nadzirani sistem rezultatima *on-line* simulacije

Osnovna namena ovog scenarija je da se na SCADA ekranima pored izmerenih vrednosti fizičkih veličina (pritisci, protoci, nivoi, itd) i stvarnih statusa opreme prikažu i rezultati simulacije, sprovedene nad modelom nadzirane distributivne mreže. Na taj način, korisnici SCADA sistema dobijaju informacije o fizičkim veliči-

nama koje nisu merene. Ako se pak, vrše merenja računatih vrednosti, tada se na SCADA ekranu može vidno označiti da postoji razlika između izmerenih i simulacijom dobijenih vrednosti, što ukazuje na moguć problem u sistemu. Da bi scenario dobro funkcionisao, potrebno je da simulacioni rezultati odgovaraju stvarnom stanju u mreži što zahteva da je: simulacioni model kalibrisan, da se tekuća stanja opreme u sistemu (otvorenosti ventila i zaptivača, uključenost pumpi i brzine na kojima rade, i sl.) prenose na ulaze simulacionog modela i da se mogu estimirati čvorne potrošnje vode za tekući trenutak.



Slika 6. Arhitektura SCADA sistema proširenog simulacionim servisom

Analizom scenarija je zaključeno da su za njegovu realizaciju potrebni servisi prikazani na slici 6: prošireni SCADA sistem zasnovan na postojećem SCADA sistemu, servis za pristup i uređivanje WCIM-a i servis simulacije zasnovan na EPANET biblioteci funkcija. Da bi se navedeni programski alati povezali u jedinstvenu celinu potrebno je: proširiti SCADA-u da prihvati i prikaže simulacione rezultate, naći način upravljanja radom i razmenom podataka sa EPANET bibliotekom i implementirati servis za uređivanje modela (WCIM-a).

Osnovi SCADA podsistem je proširen dodavanjem SCADA adaptera koji sa osnovim SCADA podsistemom komunicira kroz OPC magistralu, dok se sa druge strane povezuje na *softbus*. Zadatak adaptera je da podatke iz SCADA okruženja predstavi odgovarajućim WCIM objektima, kao i da rezultate drugih servisa učini raspoloživim SCADA podsistemu.

Povezivanje na OPC magistralu je izabrano jer većina komercijalno raspoloživih SCADA sistema u sebi sadrži OPC Data Access 2.0 server putem koga su dostupne trenutne vrednosti: merenja i statusa daljinski kontrolisane opreme. U predloženom rešenju adapter se ponaša kao OPC server i omogućava da se rezultati simulacije uvedu u SCADA sistem kao dodatne veličine. On je ujedno i OPC klijent da bi postojeće SCADA veličine učinio dostupnim preko *softbus*-a. Unutar SCADA sistema, aplikacije koje prikazuju slike nadziranog sistema su klijenti pomenutim OPC serverima i izgled ekrana osvežavaju na osnovu vrednosti dobijenih od tih servera. Otuda se na jednom SCADA ekranu mogu naći izmerene vrednosti i vrednosti dobijene simulacijom.

Upravljanje radom i razmena podataka sa EPANET bibliotekom je poverena EPANET adapteru, koji predstavlja prilagodni stepen ka EPANET biblioteci. Njegova osnovna uloga je da: prihvata ulazne podatke sa *softbus*-a, pokreće simulaciju na zahtev i emituje simulacione rezultate nazad na *softbus*. Pored toga, adapter treba da postavi početak simulacionog perioda (u ovom scenariju ga postavlja na tekuće vreme), podesi čvorne potrošnje, kao i da formira ulazne datoteke (\*.inp) za EPANET biblioteku. Programerski posmatrano, on „sakriva“ sve specifičnosti EPANET biblioteka funkcija uključujući i specifičnosti EPANET modela podataka.

Za predstavljanje podataka o sistemu implementiran je servis uređivanja modela koji sadrži jednu kopiju objektnog modela distributivnog vodovodnog sistema (WCIM). Pristup podacima je omogućen preko komponente WMS Server gde su implementirani interfejsi: IQuery i IUpdate (slika 2).

Tipičan scenario ponašanja objedinjenih servisa, u ovom ili nekom sličnom scenariju, sadrži nekoliko koraka koji se ciklično izvršavaju. Prvo se podaci o tekućem stanju nadzirane mreže pojavljuju na OPC magistrali unutar SCADA sistema. SCADA adapter ih preuzima (ima ulogu OPC DA klijenta) i prosleđuje ih na *softbus*. Sa druge strane, servisi (u ovom primeru „simulacija“ zasnovana na EPANET biblioteci funkcija) se

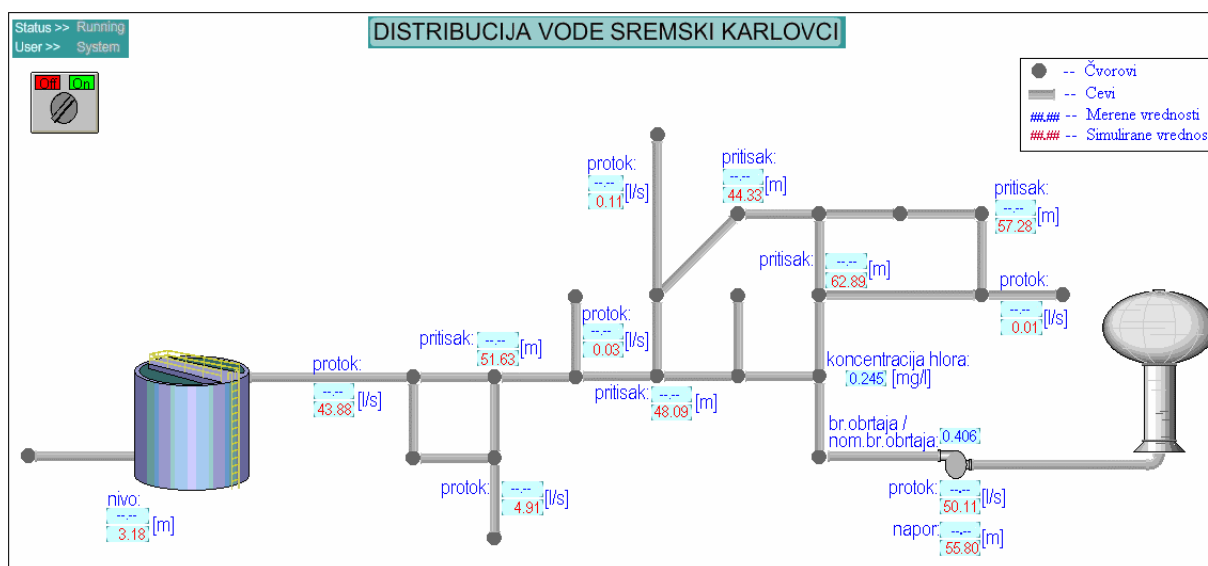
prijavljaju na *softbus* kao zainteresovani za poruke o promenama stanja mreže. Kada se pojave takve poruke, servisi ih prihvataju, pokreću proračune i rezultate proračuna emituju na *softbus* u obliku drugih poruka. Nadalje, prihvatajući takve poruke, SCADA adapter se ponovo aktivira, ali sada u ulozi komponente koja je pretplaćena na poruke rezultata. On ih prikuplja sa *softbus*-a i čini ih dostupnim unutar SCADA sistema putem OPC magistrale (adapter ima ulogu OPC DA servera).

Od rešenja se očekuje da se brzo sprovodi. Zato se simulacije pokreću neposredno nakon promene stanja opreme u sistemu, kao odgovori na poruke sa *softbus*-a. Pored toga, simulaciju je potrebno periodično pokretati zbog vremenske zavisnosti čvornih potrošnji. Perioda pokretanja zavisi od gustine podataka na unapred definisanim vremenskim dijagramima promene čvorne potrošnje.

Zahvaljujući asinhronom prenosu poruka preko *softbus*-a, opisani scenario omogućava da više zainteresovanih servisa nezavisno reaguje na promene detektovane SCADA podsistemom, a da pri tome SCADA podsistem ne mora da zna za zainteresovane servise. I obrnuto, kada servisi u sistemu emituju podatke, SCADA podsistem može prihvatiti deo tih podataka, ali ne mora da zna odakle ti podaci dolaze. Naravno, složenost povezivanja i međusobnog obaveštavanja servisa se poverava implementaciji *softbus*-a, što i jeste cilj predložene arhitekture.

### Primeri primene implementiranog sistema

Razvijeni scenario je primenjen na dva postojeća primera vodovodnih mreža. Najpre je softver testiran na modelu vodovodne mreže Sremskih Karlovaca, za čiji nadzor je upotrebljena SCADA aplikacija razvijena u grafičkom okruženju CX-Supervisor proizvođača Omron. Izgled SCADA ekrana je prikazan na slici 7 i ujedno je vizuelna predstava postojećeg EPANET modela. Sa slike se vidi da su prikazane veličine bitne za praćenje rada nadziranog sistema: pritisci u čvorovima, protoci u cevima i u pumpi, nivo vode u rezervoarima, kvalitet vode izražen preko koncentracije rezidualnog hlora, napor pumpe (razlika između izlaznog i ulaznog pritiska) i broj obrtaja pumpe u odnosu na nominalni broj obrtaja. Za neke veličine su prikazane dve vrednosti: merena vrednost sa mernog uređaja (gornje polje) i vrednost dobijena simulacijom (donje polje). Pošto je aplikacija testirana u laboratorijskim uslovima, nisu prikazane merene vrednosti, jer nije postojala komunikacija sa mernim uređajima.



Slika 7. CX-Supervisor SCADA pogled na vodovodnu mrežu Sremskih Karlovaca

Implementirani softver je zatim testiran na primeru vodovodnog sistema grada Novog Sada. Na slici 8 je prikazana SCADA aplikacija razvijena u grafičkom okruženju VipWin proizvođača Festo. Osnovu aplikacije čini SCADA sistem koji je u upotrebi u JKP "Vodovod i kanalizacija" iz Novog Sada, a za potrebe ovoga rada je proširen prikazom rezultata simulacije. Upotrebljen je EPANET simulacioni model distribucije vode za područje Novog Sada, koji je takođe vlasništvo JKP "Vodovod i kanalizacija". Iz istog razloga, kao i u prethodnom primeru, nisu prikazane vrednosti dobijene iz mernih uređaja. Tamnija polja predstavljaju vrednosti pritiska u čvorovima, a svetlija polja predstavljaju vrednosti protoka u cevima, gde prvo polje sa leve strane sadrži vrednost dobijenu simulacijom, a drugo polje vrednost dobijenu merenjem. Treba napomenuti da vrednosti dobijene simulacijom nisu na zadovoljavajućem nivou, jer je EPANET model grubo kalibrisan.

### Scenario određivanja optimalnog upravljanja pumpama

Cilj drugog scenarija je primena prototipa za izračunavanje optimalnog upravljanja pumpama u sistemu. U ovom scenariju je potrebno da se na osnovu simuliranog ponašanja nadziranog sistema tokom 24h proračunavaju potrebne brzine pumpi sa ciljem da se dobije minimalan utrošak električne energije uz zadovoljavanje ograničenja nametnutih prirodom sistema. Zahteva se da pritisak

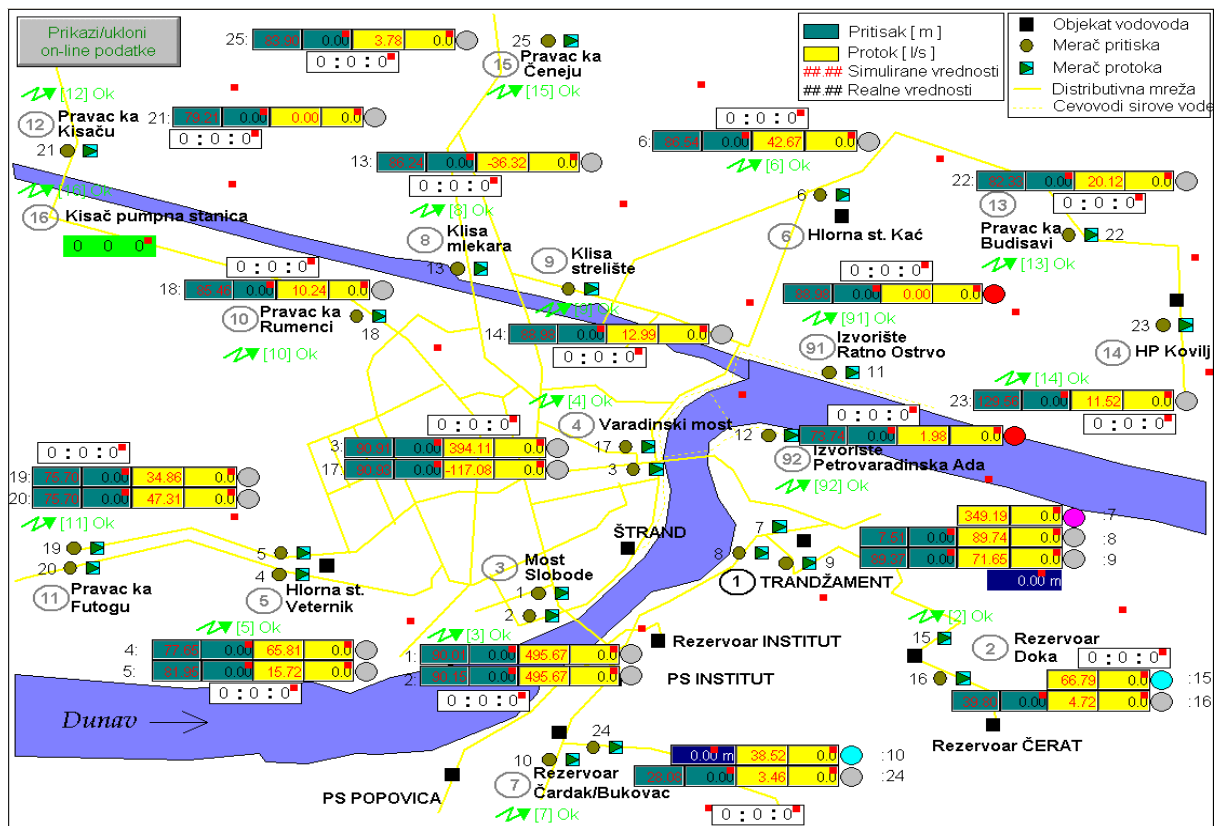
u svim čvorovima i protok u cevima budu u zadatim granicama. Takođe je potrebno obezbediti ciklično punjenje i pražnjenje rezervoara u sistemu uz nametanje ograničenja da nivo u rezervoaru na kraju simulacionog ciklusa bude jednak početnom.

Opisani problem je realizovan spregom EPANET i MATLAB alata (odgovarajućim adapterima). EPANET je korišćen za simulaciju hidrauličkih svojstava distributivnog vodovodnog sistema, dok je MATLAB upotrebljen za nalaženje optimalnog algoritma upravljanja pumpama.

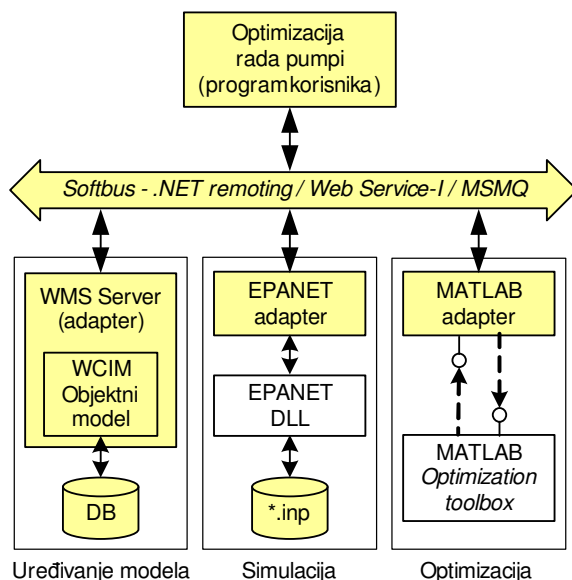
Za proračun je upotrebljen genetski algoritam implementiran u *Optimization toolbox*-u MATLAB-a, gde se za izabrani period (npr. 24h) variraju profili brzina motora pumpi. Tokom rada algoritma pozivaju se funkcije EPANET biblioteke da bi se: 1) zadate brzine pumpi prenale u EPANET model, 2) izvršila kvazistatička simulacija ponašanja modela mreže i 3) očitali simulacioni rezultati radi formiranja vrednosti funkcije cilja [22]. Arhitektura jednog rešenja ovog servisa je prikazana na slici 9, gde je Optimizacija rada pumpi program korisnika namenjen raspodeli poslova ka servisima i sinhronizaciji njihovog rada.

Od ranije opisanih servisa u ovom scenariju se koristi servis za simulacije zasnovan na EPANET biblioteci i odgovarajućem adapteru. Servis je upotrebljen bez programskih izmena.





Slika 8. VipWIN SCADA pogled na vodovodnu mrežu Novog Sada



Slika 9. Arhitektura sistema za optimizaciju rada pumpi

Za sprovođenje ovog scenarija potreban je dodatni servis za izračunavanje optimalnog upravljanja. Za taj zadatak izabran je programski paket MATLAB i razvijen je odgovarajući adapter da bi se od korisnika servisa izolovale specifičnosti MATLAB-a. Implementacija MATLAB adaptera nije bila jednostavna, jer pored svoje sprege sa *softbus*-om, treba da omogući i m-funkciju (koja se izvršava u MATLAB-u) da takođe komunicira preko *softbus*-a, da bi iskoristila usluge drugih servisa. Konkretno problem je predstavljalo izračunavanje funkcije cilja gde se na osnovu simulacionih rezultata određuje povratna vrednost. Stoga se iz MATLAB-a, prilikom svakog izračunavanja funkcije cilja, poziva EPANET biblioteka. Za ovaj problem postoji jednostavnije rešenje, gde se direktno sprežu MATLAB i EPANET, ali se time dobija zatvoreno, a samim tim i neprihvatljivo rešenje. Realizovano je rešenje u kome MATLAB adapter implementira *callback* COM interfejs preko koga se pozivi iz MATLAB okruženja prenose do adaptera a odatle do *softbus*-a. Na taj način se tokom rada optimizacionog algoritma postavljaju ulazi u

simulacioni model i preuzimaju rezultati simulacije za računanje vrednosti funkcije cilja. Implementacija obostrane veze MATLAB-a i adaptera je zasnovana na COM/.NET Interoperability paketu klasa [23].

Prikazana arhitektura zasnovana na adapterima, pored toga što pruža programsku nezavisnost MATLAB-a i EPANET biblioteke, omogućava zamenu aplikacije za simulaciju ili optimizaciju uz izmenu odgovarajućeg adaptera, a da preostali deo sistema ostaje nepromenjen. Takođe, otvorenost rešenja omogućava primenu drugih optimizacionih algoritama.

Korisnički interfejs (implementiran SCADA grafičkim alatima) se u okviru SCADA paketa ponaša kao OPC klijent. On tipično prikazuje stanje nadziranog vodovodnog sistema, ali preko SCADA servera omogućava posredno upravljanje udaljenom opremom. Stoga, da bi se iz kontrolnog centra potpuno automatizovalo optimalno upravljanje pumpama, potrebno je da korisnički program Optimizacija rada pumpi, npr. svakog sata, emituje optimalne brzine pumpi određene na osnovu ranije izračunatih optimalnih trajektorija. Te vrednosti se posredstvom SCADA sistema prenose do upravljačkih uređaja (RTU) u pumpnim stanicama i predstavljaju zadate vrednosti brzina za lokalnu automatiku.

Krajem 2006. godine se pojavila nova, objedinjena OPC arhitektura (OPC UA - *Unified Architecture*) [24]. Ona nije uzeta u razmatranje jer se još nije dokazala u industriji i nema podršku u komercijalno raspoloživim SCADA aplikacijama. Specifikacija opisuje novi OPC *softbus*: poruke i podatke koji se njime prenose. U odnosu na ovde predložena rešenja ne postoje krupne razlike. Na mestu softverske magistrale sa slike 1 koristio bi se UA *softbus*. Pored toga, bilo bi potrebno da se WCIM i ostali uvedeni adapteri prilagode UA specifikacijama.

## 6. DISKUSIJA PERFORMANSI

Cena modernih računara pada, a njihova procesna moć raste iz godine u godinu [25]. Bez obzira na ove činjenice, kod planiranja složenih softverskih proizvoda mora se voditi računa o mnogim parametrima funkcionisanja takvih sistema. U fazi planiranja prikazanog sistema se vodilo računa o sledećim parametrima:

- sa kolikim modelima podataka će moći da rukuje,

- kolika je potrebna računaska moć za izvršavanje proračuna.

Da bi se odredilo sa kolikim modelima podataka sistem može da rukuje, on je bio pokretan sa modelima različite složenosti. Prvo su učitani jednostavni modeli koji dolaze sa EPANET alatom. Ti modeli sadrže do par stotina entiteta i zauzimaju zanemarljivo malo radne memorije (ispod 1 MB). Da bi se ispitale granice sistema, napravljeni su hipotetički modeli sa mnogo većim brojem entiteta. Merenjem performansi je utvrđeno da memorijsko zauzeće raste linearno sa brojem entiteta i da je potrebno manje od 1 kB po entitetu. Ovo na modernim računarima omogućava skladištenje podataka o sistemima sa milionima entiteta. Takođe, zbog činjenice da su korišćene mape za skladištenje podataka, vreme pristupa je izuzetno kratko bez obzira na broj entiteta. Merenja su pokazala da je bez obzira na veličinu sistema vreme potrebno za pristup jednom resursu uvek reda milisekunde. Zbog toga se može očekivati brz odziv sistema u realnim aplikacijama.

Pored merenja memorijskog zauzeća, izmereno je i vreme izvršavanja simulacija. Mereno je vreme simulacije za proračun hidrauličkih svojstava sistema za jedan vremenski trenutak. Izvršavao se jedan korak EPANET simulacije i rezultati (pritisci u čvorištima i protoci u cevima) su učitani u WCIM model. Za jedan korak izvršavanja simulacije nad EPANET modelom Novog Sada i učitavanja vrednosti u model je bilo potrebno oko 70 milisekundi. Simulacije su trajale značajno kraće za ostale, manje modele (reda nekoliko milisekundi).

Svi testovi su vršeni na (u trenutku pisanja rada) prosečnim računarima (procesor 3GHz sa jednim jezgrom, 1 GB radne memorije, Windows XP operativni sistem). Merenja su vršena pokretanjem servera modela podataka iz razvojnog okruženja Visual Studio 2005. Mereno je zauzeće fizičke radne memorije.

Izloženim testovima performansi pokazano je da je model podataka opisan u ovom radu pogodan za skladištenje modela sa velikim brojem entiteta. Takođe je pokazano da je prototip predloženog rešenja dovoljno brz za izvršavanje simulacija u jednom UMS-u. Uz različite optimizacije, performanse prototipa bi se mogle unaprediti, sa ciljem da se omogući rad sa većim modelima i da se ubrzaju razmene podataka sa EPANET simulatorom.

## 7. ZAKLJUČAK

Ovim radom je pokazano da je moguće razviti softversku arhitekturu vodovodnih sistema u kojoj se koriste sve pogodnosti postojećih, kvalitetnih softverskih rešenja u sklopu jedinstvene softverske arhitekture vodovoda većeg naselja. Možda najveća prednost predložene arhitekture jeste njena otvorenost. Zbog toga se UMS može lako proširiti, bez obzira da li je potrebno dodavanje spoljašnjih aplikacija ili novih softverskih modula koji se razvijaju specijalno za korisnika.

Druga velika prednost predloženog sistema jeste uvođenje objedinjenog objektnog modela vodovodnih sistema, koji je pravljen po ugledu na postojeće industrijske standarde i sadrži detaljan opis distributivnog vodovodnog sistema.

Sa stanovišta korisnika ovakvog sistema postoje dve važne prednosti: može se očekivati smanjenje troškova za nabavku i/ili razvoj softvera i mogu se kupovati mali softverski moduli, i po potrebi lako se ugrađivati u jedinstveni UMS. To praktično znači da je kod uvođenja novih ili nadogradnje postojećih softverskih rešenja moguć odabir softverskih modula koji rade tačno ono što je korisniku potrebno.

## LITERATURA

- [1] OMG - Object Management Group: Utility Management System (UMS) Data Access Facility Specification, v2.0.1, 2005.
- [2] X. Li, M. Gao, J. Liu, Z. Ding, X. Duan: A software architecture for integrative utility management system, Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, Vol. 2, pp 476 – 480, 2001.
- [3] E. Marcus, H. Stern: Blueprints for High Availability, John Wiley & Sons, 2000.
- [4] G. Booch., I. Jacobson, J. Rumbaugh: The Unified Modeling Language User Guide, Addison-Wesley, 1999.
- [5] E.F. Codd: A Relational Model of Data for Large Shared Data Banks, Communications of the ACM 13 (6): pp 377-387, 1970.
- [6] P.A.S. Ralstona, J.H. Grahamb, J.L. Hiebb: Cyber security risk assessment for SCADA and DCS networks, ISA Transactions, In Press, 2007.
- [7] OPC Foundation: OPC Data Access Custom Interface Specification 2.0, 1998.
- [8] X. Hong, W. Jianhua: Using standard components in automation industry: A study on OPC Specification, Computer Standards & Interfaces, No 28, pp 386-395, 2005.
- [9] X. Hong, W. Jianhua: An extendable data engine based on OPC specification, Computer Standards & Interfaces, No 26, pp 515-525, 2003.
- [10] Environmental Protection Agency, EPANET software for water distribution network simulations, <http://www.epa.gov>, 2001.
- [11] S. Zarić, S. Vukmirović, I. Lendak: Softver za nadzor, simulaciju i upravljanje distributivnom vodovodnom mrežom, 50. Konferencija ETRAN 2006, Beograd, Srbija, 2006.
- [12] I. Lendak, A. Erdeljan, S. Zarić: A generic DAF server architecture for water distribution systems, 9. Međunarodna konferencija ISIRR 2007, Novi Sad, Srbija, 2007.
- [13] International Electrotechnical Commission (IEC): IEC 61970-403: Generic Data Access, Draft Revision 7, 2005.
- [14] A. Erdeljan, D. Čapko: Analiza primene DAF i GDA specifikacija za pristup objektnom modelu UMS-a, 51. Konferencija ETRAN 2007, Herceg Novi, Crna Gora, 2007.
- [15] T. Erl: Service-Oriented Architecture (SOA): Concepts, Technology, and Design, ISBN-13: 978-0131858589, Prentice Hall PTR, 2005.
- [16] D. Krafzig: Enterprise SOA: Service-Oriented Architecture Best Practices, ISBN-13: 978-0131465756, Prentice Hall PTR, 2004.
- [17] International Electrotechnical Commission (IEC) Task Group 13: Common Information Model (CIM) Base – Revision 11, 2006.
- [18] J.P. Britton, A. N. deVos: CIM-based standards and CIM evolution, IEEE transactions on Power Systems, Vol 20, issue 2, 2005.
- [19] R. Podmore, et al: Common Information Model - A Developer's Perspective, 32nd Hawaii International Conference on System Sciences, 1999.

- [20] A. Erdeljan, I. Lendak, S. Vukmirović: Adaptacija CIM-a za potrebe vodovodnih sistema, 50. Konferencija ETRAN 2006, Beograd, Srbija, 2006.
- [21] World Wide Web Consortium (W3C): Resource Description Framework (RDF) Model and Syntax Specification, <http://www.w3.org/RDF>, 1999.
- [22] D. Čapko, Ž. Kanović, V. Čongradac: Softver za modeliranje, simulaciju, upravljanje i analizu distributivne mreže vodovodnog sistema uz korišćenje EPANET-a, L ETRAN 2006, Beograd, 2006.
- [23] A. Troelsen: COM and .NET Interoperability, Apress, 2005.
- [24] OPC Foundation: OPC Unified Architecture, <http://www.opcfoundation.org/UA>, 2006.
- [25] S.E. Thompson, S. Parthasarathy: Moore's law: the future of Si microelectronics, Materials Today, Volume 9, Issue 6, Pages 20-25, 2006.

## COMBINATION OF DIFFERENT SOFTWARE PRODUCTS FOR THE MODELLING, SIMULATION AND CONTROL OF WATER MANAGEMENT SYSTEMS

by

Aleksandar ERDELJAN, Imre LENDAK, Srđan VUKMIROVIĆ, Darko ČAPKO  
Faculty of Technical Sciences, Novi Sad

### Summary

A plethora of high quality software products can be used for water system modeling, simulation and control. These products come from different sources and are meant to solve a wide range of problems. Yet, a major drawback of the majority of these programs is that they usually can not interact with each other because they are written in different programming languages, use different water system models and different interfaces to connect to other programs and/or to the user interface. This paper proposes a solution that allows a seamless interconnection of various software products into a loosely coupled architecture, in which software products

from various vendors can be used together for modeling, simulation and control tasks in water system management. The solution consists of a shared *softbus* and of a number of adapters which allow the different software products to connect to it. The concept was tested by implementing a prototype which connects EPANET, MATLAB and SCADA into a loosely coupled system. By developing additional adapters the solution is extendable to other external software products.

Key words: service oriented architecture (SOA), software models, water distribution networks, SCADA

Redigovano 04.12.2007.