**Vodni udar u tlačnim sustavima zaštićenim vodnim kotlićem**

**Sabor hrvatskih graditelja 2012**

**Martina Tadić1, Hrvoje Mostečak2, Filip Gjetvaj2**

*1„Hidroprojekt-ing“, Miramarska 38, 10000 Zagreb*

*2Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Fra Andrije Kačića-Miošića 26, 10000 Zagreb*

**Sažetak**

U vodoopskrbnim sustavima se zbog manevriranja zasunima i promjenama režima rada crpki često javljaju nestacionarna stanja. U radu se prikazuju rezultati mjerenja u Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu, te na izgrađenom podsustavu „Ravnik“.

Cilj ovog rada je prikazati važnost primjene akvizicije podataka u fazi eksploatacije hidrauličkog sustava, kako bi se mogli verificirati rezultati numeričkih modela dobiveni u fazi projektiranja sustava, te povećala kvaliteta upravljanja sustavom.

*Ključne riječi:vodni udar, tranzijentni procesi, vodoopskrbni sustav, mjerenje tranzijenata, akvizicija podataka*

**Water hammer in pressure systems with air vessel protection**

**Congress of Croatian Builders 2012**

**Abstract**

Transient conditions often occur during changes in the regime of pumping and maneuvering with valves in water supply systems. This study shows the results of the experiments carried out at the Hydraulics Laboratory of the Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, and at the built subsystem “Ravnik”.

The aim of this study is to show the importance of an application of data acquisition in an operational phase of the hydraulic system in order to verify the numerical model results achieved in the phase of the system design and to increase the quality of the system management.

*Key words: water hammer, transients, water supply systems, transients measurement, data acquisition*

**1 Uvod**

U vodoopskrbnim sustavima se odvija tečenje pod tlakom koje najčešće nije stacionarno cijelo vrijeme. Brzim promjenama tlaka u sustavu dolazi do tranzijentnih uvjeta tečenja. U svakom sustavu će se s vremena na vrijeme uključivati i isključivati crpke, javiti će se protok u hidrantima ili bilo koja druga nagla promjena tečenja, koja spada pod normalni rad sustava, no mogu se javiti i nenadani uzroci tranzijentnog tečenja kao što je nestanak struje, ljudske greške pri upravljanju sustavom, potresi i drugo. Svrha istraživanja promjene tlaka pri tranzijentnim procesima je poboljšanje razumijevanja ponašanja sustava prilikom pojave tranzijenata, a time i upravljanja samim sustavom.

Učestalost i veličina velikih udarnih tlakova varira od sustava do sustava i funkcija su nekoliko varijabli. Rezultati monitoringa postojećih sustava indiciraju da su uglavnom sljedeće lokacije i tipovi sustava najpodložnije razvoju niskih ili negativnih tlakova:

* sustavi sa crpnim stanicama,
* glavni vodovi distribucijskih sustava 1,6 do 3,2 km (1-2 milje) nizvodno od crpke hidraulički relativno jednostavno povezani sa crpkom,
* područja velike nadmorske visine,
* područja niskog statičkog tlaka,
* područja udaljena od nadzemnih spremnika,
* uzvodno i nizvodno od aktivnih zasuna na područjima velikog protoka. [1]

Mnogi tranzijentni događaji mogu dovesti do prekida vodnog stupca, koji može rezultirati katastrofalnim lomovima cjevovoda. Prema tome, pojava tranzijenata uzrokuje zdravstveni rizik i može dovesti do povećanja pukotina ili smanjiti pouzdanost sustava. [2]

Osim navedenog tranzijentne pojave mogu uzrokovati zamor cijevnog materijala, koroziju uzrokovanu zamorom materijala, posmična naprezanja duž stjenke cijevi koja uzrokuju resuspenziju sedimenta i izdvajanje biofilma, a time pogoršanje kvalitete vode.

Takozvana pojava „crvene vode“ je često povezana s tranzijentnim poremećajima [2].

Posljedice tranzijenata su maksimalni tlakovi u sustavu, stanje vakuuma, kavitacija, hidrauličke vibracije, smanjenje kvalitete vode i rizik za zdravlje ljudi. Ponekad posljedice pojave tranzijenata nisu trenutne, već se mogu dogoditi uzastopnim ponavljanjem udarnih tlakova čime mogu nastati pukotine i može se pojačati korozija cijevnog materijala što dovodi do smanjena debljine stjenke cijevi, preranog starenja cijevi i puknuća.

Zbog svih tih negativnih posljedica i iz potrebe da se što bolje shvate tranzijentni procesi u vodoopskrbnim sustavima, bilo oni jednostavni ili složeni, proizlazi važnost mjerenja i akvizicije podataka.

Simulacija nestacionarnog tečenja, točnije tranzijentnog toka, te pronalaženje adekvatne zaštite sustava ukoliko je to potrebno je esencijalan zahtjev koji bi se trebao ispuniti kako bi se osiguralo pouzdano funkcioniranje sustava i ekonomska isplativost.

**2 Važnost mjerenja i prikupljanja podataka**

Mjerenjem, akvizicijom podataka, te njihovom daljnjom analizom i obradom omogućava se bolje razumijevanje ponašanja sustava prilikom rutinskih i kontroliranih pojava poput starta i gašenja crpki, manevriranja zasunima i onih nenadanih poput nestanka struje, požara, puknuća cijevi i svih drugih događaja koji mogu uzrokovati značajne brze promjene u sustavu. Uz navedeno možemo vidjeti koliki je utjecaj potrošača na sustav i detektirati anomalije u sustavu (puknuća cijevi).

Osviještenost glede važnosti mjerenja, akvizicije podataka i njene daljnje obrade sve više se povećava. Bitno je znati kako se sustav ponaša prilikom redovnog pogona, ali i vanrednih situacija i u svakom trenutku razumjeti fiziku sustava. Uz to mjerenjem i akvizicijom podataka možemo spoznati nove činjenice vezane uz tranzijente, a možda i opovrgnuti stare.

Provedene su razne studije kako bi se istražio utjecaj cijevnog materijala, pukotina, zarobljenog zraka u cijevi i trenja na disipaciju hidrauličkih tranzijenata (Vitkovsky, 2001). Većina tih istraživanja je koristila male laboratorijske sustave napravljene za svrhu eksperimenta. Dok su te studije iznijele razne pretpostavke, veliki operativni sustavi nisu bili istraženi. Na primjer znanje o utjecaju potrebe za vodom (potrošnje) i topologije cjevovoda je još uvijek oskudno (Stoianov, 2004.). [3]

Implicitne pretpostavke da su elementarna i konzervativna pravila valjana baza za projektiranje su se često pokazale upitne, ponekad i opasne [4].

Modeliranje je najjeftiniji i najbolji način da se prije izgradnje sustava i uloženih novčanih sredstava ispita sustav, otkriju najslabije točke i zaštiti sustav od neželjenih posljedica. Pri modeliranju treba imati na umu da će dobar model omogućiti ne samo siguran sustav, nego i ekonomski najisplativiji. Kada kažemo modeliranje sustava ne smijemo misliti samo na nove sustave, jer vodoopskrbni sustavi su najčešće izgrađeni i često puta je potrebna nadogradnja ili zamjena postojećih dijelova sustava. U takvim slučajevima je poželjno mjeriti stanje postojećeg sustava, analizirati dobivene podatke i na temelju njih kalibrirati model i predvidjeti ponašanje nadograđenog i/ili rekonstruiranog sustava. Ukoliko su mjerenja dobro provedena kalibrirani model se može koristiti s velikim stupnjem pouzdanosti kao moćan, učinkovit i ekonomičan alat [5]. Neki primarni parametri na koje je potrebno obratiti posebnu pažnju pri kalibraciji modela i koji utječu na razvoj i disipaciju tranzijentnih tlakova su brzina propagacije vala, faktor trenja cijevi, inercija crpke i potrošnja u čvorovima [5].

Mjerenje i akvizicija podataka su u funkciji ekonomičnog upravljanja vodoopskrbnim sustavima. Ako se sustav pravilno dimenzionira može se postići projektirani vijek sustava i izbjeći veliki troškovi sprječavanjem havarija. Samo u Kanadi procjena troškova za popravljanje puknuća glavnih vodovoda nadvisuje 100 miliona kanadskih dolara godišnje, a jedan od izvora opterećenja koji je obično zanemaren u analizama vodovodnih sustava je pojava vodnog udara ili tranzijentnih uvjeta [6].

Monitoring sustava omogućava lakše uočavanje kvara i anomalija na sustavu, a prikupljeni podaci mogu smanjiti vrijeme troškova analize. U svom radu su F. Papa i drugi [7] su pokazali kako se mogu brzo i efikasno otkriti uzroci nepravilnog rada sustava uspoređujući podatke dobivene u vrijeme kada je sustav normalno funkcionirao s podacima dobivenim kada su uočeni problemi u sustavu.

Primjer uporabe monitoringa kao jednog od alata za detektiranje i rješavanje postojećih problema u vodoopskrbnom sustavu se nalazi i u radu koji opisuje studiju rizika pomoću procjene hidrauličkih tranzijenata za grad Ottawu. U radu je prikazana korist praćenja tranzijentnih tlakova u sustavu i poveznica između upravljanja sustavom, hidrauličkih performansi i rizika od tranzijenata.

Bilo koji nedostatci sustava, rizici ili promjene tipično se uvijek razotkrivaju kroz odziv tranzijentnih tlakova. Drugim riječima hidraulički tranzijenti predstavljaju puls sustava i zato su dobri indikatori naprezanja. [8]

**3 Provedena mjerenja**

**3.1 Provedena laboratorijska mjerenja**

U Hidrotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Zagrebu provedena su mjerenja na modelu kojim se prikazuje prirast tlaka uslijed nagle promjene brzine (protoka) pri čemu se bilježi pojava vodnog udara. Provedenim mjerenjima na fizikalnom modelu testirala se mjerna oprema kojom će se u drugoj fazi mjerenja na izgrađenom sustavu za kondicioniranje vode „Ravnik“ mjeriti pojavnost tranzijenata.

Laboratorijski model opskrbljuje se vodom iz vodovodne mreže preko gibljive cijevi koja je spojena na zračni kotlić. Zračni kotlić na ovom modelu ima istu svrhu kao i zračni kotlić u podsustavu za vodoopskrbu „Ravnik“, a to je održavanje tlaka u sustavu. Na zračnom kotliću modela ugrađen je tlakomjer radi očitanja vrijednosti tlaka na ulazu u tlačni cjevovod modela. Na drugom kraju zračnog kotlića nalazi se ispust za tlačni cjevovod koji je duljine 200 m. Na kraju tlačnog cjevovoda postavljena su dva zasuna i dva tlakomjera. Prvi zasun je kuglasti zasun koji služi da bi se naglo zatvorio protok vode i time izazvala pojava tranzijenata. Drugi zasun je regulacijski zasun kojim se mogu odrediti različiti protoci. Dva tlakomjera u sustavu su analogni, a jedan je senzor tlaka *Pressure Transmitter Model A-10* koji služi za pretvaranje prirasta tlaka u analognu vrijednost. Analogna vrijednost se nakon obrade u analogno-digitalnom pretvaraču obrađuje i dobivene vrijednosti prikazuju na računalu.

Pozivajući se na teoriju sustava prema [9] svaki sustav dijeli se na fizički dio kojim se upravlja (upravljani dio, objekt upravljanja) te upravljački dio sustava. Opisan fizikalni model može se također promatrati kao jedan sustav, ili preciznije rečeno, podsustav za akviziciju podataka sustava za vodoopskrbu pitkom vodom.

Fizički (upravljani) dio sačinjavaju već nabrojani elementi, a posebnu važnost ovog sustava imaju elementi koji čine upravljački dio. Za potrebe prikupljanja podataka o vrijednostima tlakova i pojave vodnog udara i oscilacije vodnih masa, najprije na modelu potom i na izgrađenom sustavu, korišteni su elementi za analogno-digitalnu (A/D) konverziju, multipleksiranje i kondicioniranje signala (*ADAM-5000*), te element za kontrolu i automatizaciju procesa, te komunikaciju na relaciji senzor tlaka-korisnik (*GeniDAQ 4.0*).

Na laboratorijskom modelu s navedenom opremom mjerenja su provedena u više stupnjeva zatvorenosti regulacijskog zasuna, te je svako pojedino mjerenje ponovljeno 10-12 puta kako bi se dobio veći broj podataka i bolji uvid u proces koji se odvija u sustavu pod tlakom. Sva mjerenja su pokazala isti trend kretanja veličine tlaka u sustavu, te podjednaku frekvenciju pojave vodnih udara i oscilacija. Prikaz ovih rezultata slijedi u poglavlju 4.

**3.2 Provedena mjerenja na izgrađenom sustavu**

Karta.tifVodoopskrbni podsustav „Popovača – Kutina“ je dio vodoopskrbnog sustava Moslavačke Posavine i u funkciji je duže od 20 godina. Sastoji se od crpilišta, uređaja za kondicioniranje vode „Ravnik“, vodospremnika „Veliko Brdo“ i vodoopskrbne mreže do Kutine na istočnoj strani i naselja Vidrenjak na zapadnoj strani područja, slika 1.

Slika 1 Podsustav Popovača - Kutina

Vodoopskrbni podsustav „Popovača – Kutina“ funkcionira na način da se podzemna voda iz 10 bušenih zdenaca dovodi do uređaja za kondicioniranje vode „Ravnik“. Kondicionirana voda se skuplja u prizemni vodospremnik i tlači distribucijskom crpnom stanicom kapaciteta 100 l/s u vodoopskrbnu mrežu i u kontra-vodospremnik „Veliko Brdo“ volumena 2 x 2000 m3. Čvorište prema Kutini i Vidrenjaku je 2810 m udaljeno od uređaja za kondicioniranje vode „Ravnik“, a udaljenost od uređaja do vodospremnika iznosi 3355 m. Magistralni cjevovod „Ravnik-Veliko Brdo“ je od nodularnog lijeva (ductil), promjera DN 500 mm, ogranak orijentiran prema Kutini je PVC cjevovod promjera DN 400 mm, a ogranak prema Vidrenjaku je od ductilnog cjevovoda promjera DN 500 mm. Na tlačnoj strani crpke je ugrađen nepovratni zasun, koji se automatski zatvara pri ispadu crpke iz pogona. Sustav je zaštićen zračnim kotlom koji se nalazi na uređaju za kondicioniranje vode, neposredno uz crpku.

Mjerenja na „Ravniku“ su izvršena s istom mjernom opremom s kojom su rađena laboratorijska ispitivanja. U blizini zasuna je postavljen tlakomjer kojim su se mjerile oscilacije tlaka, a akvizicija podataka je izvršena sustavom ADAM-5000. Vremenski inkrement uzorkovanja je bio jedna dvadesetina sekunde, čime se omogućilo bilježenje naglih tranzijentnih promjena tlaka.

Svrha mjerenja je prikazati ponašanje sustava prilikom ispada crpke iz pogona i dijagram promjene tlaka kada je sustav pravilno zaštićen.

Prvo su izmjereni tlakovi i protoci za kvazi - stacionarno stanje kako bi se utvrdila ispravnost opreme i točnost mjerenja. Tokom kvazi – stacionarnog strujanja je očitana razina vode u zračnom kotlu i protok u cjevovodu. Nakon što su izmjerene sve potrebne veličine crpka je naglo ugašena. Mjerni uređaj je mjerio oscilacije tlaka u cjevovodu, a na kotliću je očitana razina vode nakon umirenja. Mjerenje je ponovljeno dva puta kako bi bili sigurni u točnost zapisa.

**3 Rezultati provedenih mjerenja**

**3.1 Rezultati laboratorijskih mjerenja**

Na slici 2 grafički je prikazan jedan rezultat mjerenja vodnog udara na kojem se vidi prirast tlaka uzrokovan naglim zatvaranjem glavnog zasuna.

Pokus je trajao 20-tak sekundi, a sastoji se od toga da je do četvrte sekunde pokusa pušteno da voda slobodno teče kroz slavinu. Nakon toga, naglo se zatvara glavni zasun na dovodnom cjevovodu, te dolazi do naglog povećanja tlaka u sustavu (prvi skok je 10,8 bara) i dalje se promatra promjena tlakova u sustavu do izjednačavanja s tlakom u vodovodnoj mreži (kod cca 20-te sekunde trajanja pokusa).

Na prvom dijagramu može se vidjeti da postoje određeni šumovi u mjerenjima (dijagram je „hrapaviji“ s mnogo manjih titraja); uzrok tome su pojave koje nastaju kao rezultat velikog broja slučajnih procesa u interakciji između okoline i mjernog sustava i slučajnih procesa u mjernom sustavu. Kao bismo kompenzirali ovaj nedostatak provedeno je deset istih mjerenja te je uzeta prosječna vrijednost tlakova svih mjerenja za svaki vremenski trenutak na razmaku od 0,06 sekundi. Kao rezultat dobiven je drugi dijagram koji pokazuje istu pojavu vodnog udara s procesima koji se dalje razvijaju, no šumovi su znatno smanjeni. Ovim dodatnim mjerenjima na istom modelu, u istim uvjetima i istim postupkom pokazano je kako veći broj mjerenja doprinosi smanjenju utjecaja slučajnih pogrešaka pri mjerenjima.

Slika 2 Dijagram prirasta tlaka za jedno provedeno mjerenje

Slika 3 Dijagram prirasta tlaka za deset provedenih mjerenja

Provedenim laboratorijskim mjerenjima izvršeno je testiranje same mjerne opreme kojom su mjerene vrijednosti tlakova na izgrađenom sustavu „Ravnik“, a može se konstatirati da je mjerna oprema baždarena za potrebna mjerenja i da daje očekivane rezultate.

**3.2 Rezultati mjerenja na izgrađenom sustavu**

Nakon što je mjerna oprema baždarena izvršeno je mjerenje na „Ravniku“. Dobili su se zadovoljavajući rezultati, a dijagram oscilacija tlaka je prikazan na slici 4. Iz priloženog dijagrama možemo vidjeti da pri naglom prestanku rada crpke dolazi do promjene tlaka, ali i da je sustav adekvatno zaštićen i da zračni kotao dobro kompenzira pojavu vodnog udara.

Slika 4 Rezultati mjerenja na Ravniku

Na krivulji oscilacija tlaka se primjećuju i mali titraji, koji predstavljaju male vodne udare u sustavu. Preciznost opreme i mogućnost uzorkovanja u malim vremenskim inkrementima (1/20 s) omogućilo je da se primijeti pojava vodnog udara unutar oscilacija vodnih masa.

**4 Zaključak**

Ovim radom se pokušalo ukazati na važnost mjerenja, akvizicije prikupljenih podataka i daljnjeg proučavanja tranzijentnih procesa kako bi se pomoglo inženjerima pri projektiranju novih sustava i otklanjanju problema, rekonstrukciji i nadogradnji postojećih sustava, te upravljanju i održavanju sustava. Od esencijalne je važnosti da potrebu za mjerenjem uoče svi koji su u doticaju s hidrauličkim sustavima, jer provedba mjerenja i razumijevanje postojećih sustava je jedino moguća uz suradnju istraživača, projektanata, upravitelja komunalnih sustava, komunalnih poduzeća i dr.. Provedena mjerenja u ovome radu također ne bi bila moguća bez takve suradnje.

Imajući na umu da još uvijek postoje dijelovi tranzijentnih procesa koji nisu u potpunosti istraženi i da je proračun tranzijenata baziran na nizu pretpostavki treba težiti daljnjem proučavanju tranzijenata na temelju sve razvijenije tehnologije i uporabe računala. Samo potpuna analiza može riješiti tranzijentne procese kompleksnih hidrauličkih sustava i dati rješenja za adekvatnu zaštitu.

**Zahvala**

Autori zahvaljuju Katedri za temeljnu hidrotehniku Građevinskog fakulteta u Zagrebu, tvrtkama „Hidroprojekt-ing“ projektiranje d.o.o. i „Moslavina“ d.o.o. i njihovim djelatnicima, jer su omogućili provedena mjerenja i potrebne informacije o postojećem podsustavu „Popovača – Kutina“.

**Literatura**

[1] Friedman, M., Radder, L., Harrison, S., Howie, D., Britton, M., Boyd, G., Wang, H., Gullick, G., LeChevallier, M., Wood, D., Funk, J.: Verification and control of pressure transients and intrusion in distribution systems, Denver,, 2004.

[2] Boulos, P.F., Karney, B. W., Wood, D.J. & Lingireddy, S.: Hydraulic Transient Guidelines for Protecting Water Distribution Systems, *Journal AWWA*, 97:5, 111-124, 2005.

[3] Garcia-Pomareda, J. D., Stoianov, I.,: Modeling and experimental evaluation of occurrence and propagation of hydraulic transients, *1st Civil and Enviromental Engineering Student Conference*, London, 2012.

[4] Jung., B. S., Kareney, B. W., Boulos, P. F.: The need for comprehensive transient analysis of distribution systems, *Journal AWWA*,, 99:1, 112-123, 2007.

[5] Kareney, B. W., Tang, K., Papa, F., Erkes, E., Welker, R.: Field application of inverse transient analysis to calibrate London’s water distribution system model, *Joint Ontario Water Works Association (OWWA) and Ontario Municipal Water Association (OMWA) Conference*, Collingwood, 2007.

[6] Kareney, B. W., McInnis, D.: Transient analysis of water distribution systems, *Journal AWWA*, Vol. 82, No. 7, pp. 62-70, 1990.

[7] Papa, F., Radulj, D., Frieri, M.,: System diagnostics: a case study from the city of Vaughan, *Joint Ontario Water Works Association (OWWA) and Ontario Municipal Water Association (OMWA) Conference*, Windsor, 2010.

[8] Radulj, D., Papa, F., Kareney, B.W., McDonald, S., Leclair, M.,: System-Wide Hydraulic Transient Assessment for the City of Ottawa, *Joint Ontario Water Works Association (OWWA) and Ontario Municipal Water Association (OMWA) Conference*, Windsor, 2010.

[9] Đorđević, B.,: *Vodoprivredni sistemi*, Naučna knjiga, Beograd, 1990.