

Pokazno-obrazovna instalacija za ispitivanje pumpi u laboratoriji i preko interneta

Novica Janković¹
Miloš Nedeljković²
Petar Atanasijević³
Đorđe Čantrak⁴
Dejan Ilić⁵

APSTRAKT: Pokazno-obrazovna instalacija, sa širokim spektrom mogućnosti rada u oblasti hidrauličnih mašina, prikazana je u okviru ovog rada. Ugrađena je ispitna pumpa, kao i pomoćna, odnosno buster pumpa, koja omogućava ispitivanje u većem intervalu protoka. Ispitivanje radnih karakteristika pumpi se obavlja prema međunarodnom standardu ISO 9906:2012, odnosno SRPS EN ISO 9906:2013. Za merenje zapreminskog protoka, ugrađen je Venturimetar nestandardne geometrije, koji se kalibriše na samoj instalaciji zapreminskom metodom, prema međunarodnom standardu ISO 8316:1987. Moguća je promena brzine obrtanja obrtnog kola obe pumpe. Izmena radne tačke pumpe je moguća i zatvaranjem ventila na potisu pumpe koja se ispituje. Otvaranjem odgovarajućih ventila, moguće je ostvariti i složeni cevni sistem sa tri cevovoda. Kavitacijske uslove je moguće ostvariti ugrađenim ventilom na usisu pumpe koja se ispituje. Vizualizacija kavitacije je ostvarena sa providnim delovima instalacije na usisu i potisu pumpe koja se ispituje, kao i sa providnim spiralnim kućištem pumpe. Instalacija je opremljena odgovarajućim davačima pritiska, kao i inverterom za promenu brzine obrtanja pumpe koja se ispituje, dok buster pumpa ima ugrađen inverter. Akvizicija podataka i upravljanje instalacijom je omogućeno razvijenom LabView aplikacijom. Postoji mogućnost rada sa pokazno-obrazovnom instalacijom daljinski, odnosno putem interneta. Korisnici tom prilikom imaju mogućnost upravljanja svakom od dve ugrađene pumpe, kao i ventilima, tako da se mogu ostvariti svi radni režimi, a takođe i vizualizovati fenomen kavitacije i pojava prvog parno-gasnog mehura. Ugrađene su dve pan-tilt-zoom kamere, koje omogućavaju prikaz cele instalacije, kao i kavitacije na ulazu pumpe, u okviru spiralnog kućišta, kao i na potisu pumpe. Formirani mehurići na potisu pumpe vizualizuju turbulentno vihorno strujanje, još jedan fenomen od značaja za energetske efikasan rad rotodinamičkih pumpi.

Ključne reči: centrifugalna pumpa, radne krive, kavitacija, pokazno-obrazovna instalacija, vizualizacija, rad na daljinu

Educational installation for testing pumps in laboratory and via internet

ABSTRACT: Demonstration-educational installation, with a wide range of possibilities of work in the field of hydraulic machines, is presented within this paper. A test pump is installed, as well as booster one, which enables testing in a larger flow interval. Testing of pump performance is performed according to the international standard ISO 9906: 2012. The Venturimeter with non-standardized geometry is installed. It is calibrated on the installation itself by the volume method, according to the international standard ISO 8316: 1987. It is possible to change the rotation speed of both pumps. Variation of the pump duty point is, also, possible by closing the valve on the discharge of the pump under test. By opening the appropriate valves, it is possible to achieve a complex piping system with three pipelines. Cavitation conditions can be achieved by a built-in valve on the suction of the pump under test. Visualization of cavitation is achieved with transparent ducts on the suction and discharge side of the pump under test, as well as with a transparent spiral pump housing. The installation is equipped with appropriate pressure sensors, as well as an inverter to change the speed of the pump under test, while the booster pump has a built-in inverter. Data acquisition and installation

¹Dr Novica Janković, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, docent, njankovic@mas.bg.ac.rs

²Dr Miloš Nedeljković, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, redovni profesor, mnedeljkovic@mas.bg.ac.rs

³Petar Atanasijević, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, asistent, petarat@etf.bg.ac.rs

⁴Dr Đorđe Čantrak, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, vanredni profesor, djcantrak@mas.bg.ac.rs

⁵Dr Dejan Ilić, Mašinski fakultet Univerziteta u Beograda, vanredni profesor, diilic@mas.bg.ac.rs

management is enabled by the developed LabView application. There is a possibility of working with a demonstration-educational installation remotely, i.e. via the internet. On that occasion, users have the ability to control each of the two built-in pumps, as well as valves, so that all operating modes can be realized, as well as to visualize the phenomenon of cavitation and the appearance of the first cavitation bubble. Two pan-tilt-zoom cameras are installed, which enable the display of the entire installation, as well as cavitation at the pump inlet and within the spiral housing. Bubbles visualize turbulent swirling flow at the pump pressure side, which is another important phenomenon for energy-efficient operation of rotodynamic pumps.

Keywords: centrifugal pump, pump characteristics, cavitation, demonstrational installation, visualization, distance learning

1 Uvod

Pokazno-obrazovna instalacija je projektovana i izrađena sa željom da se studentima, kao i inženjerima, približe fenomeni strujanja u rotodinamičkim centrifugalnim pumpama i pripadajućim sistemima, da se izučavaju različiti načini regulisanja rada pumpe, kao i da se demonstrira način ispitivanja pumpe u skladu sa važećim standardom SRPS EN ISO 9906:2013[5].

Prva varijanta instalacije je imala ručno podesive ventile sa, takođe, urađenom LabView aplikacijom, koja je služila za prikupljanje podataka[4, 6, 7].

Nadograđivanje instalacije je rađeno u nekoliko etapa, što je prikazano u [8, 9]. Neke od mogućnosti rada na instalaciji, prikazane su u [3].

Razvoj još jednog tipa instalacije sa centrifugalnom pumpom in-line tipa prikazan je u [1].

Obe varijante pumpne instalacije, kao i treća sa in-line pumpom, imaju za cilj prikaz praktičnih zadataka iz [2, 10], tako da se mogu odrediti radne tačke sistema i pumpi, kao i pripadajući protoci po granama složenog sistema.

Dakle, osnovni zadaci pokazno-obrazovne instalacije su:

1. određivanje radnih karakteristika ispitivane centrifugalne pumpe u skladu sa standardom SRPS EN ISO 9906:2013,
2. regulisanje rada pumpi promenom brzine obrtanja,
3. zapreminska kalibracija Venturimetra na instalaciji na osnovu standarda ISO 8316:1987 [11],
4. određivanje radne tačke sistema i radne tačke pumpe u slučaju rada sa prostim cevovodom (cirkulacija), kao i sa složenim i
5. vizualizacija kavitacije i turbulentnog vihornog strujanja.

Sve ovo je moguće obaviti prilikom rada u Laboratoriji Katedre za hidraulične mašine i energetske sisteme Mašinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu, kao i putem interneta.

2 Eksperimentalna instalacija

Radi lakšeg uočavanja strujnih fenomena, poput kavitacije i turbulentnog vihornog strujanja, kućište pumpe koja se ispituje, usisna cevna deonica sa ugrađenim umirivačem fluidne struje, kao i potisna cevna deonica pumpe sa ugrađenim Venturimetrom izrađene su od providnih materijala. U nastavku je prikazan detaljniji izgled instalacije.

2.1 Instalacija

Eksperimentalna instalacija prikazana je na slici 1. Njene gabaritne dimenzije su 2 x 0,6 x 1,5 m. Usisna i potisna deonica pumpe P1, u njenoj neposrednoj blizini, su providne, kao i deonica u kojoj je smešten Venturimetar.

Na slici 1. izdvojene su sledeće pozicije na instalaciji: R1 - donji rezervoar zapremine 250 l, R2 - kalibracioni gornji rezervoar zapremine 50 l, R - račva, V1 – ventil na usisu pumpe P1 za izazivanje kavitacije, V2 i V3 – regulacioni ventili, V4 – elektromagnetni ventil, V5 – ventil za pražnjenje

rezervoara R2, P1 – pumpa koja se ispituje, P2 – buster pumpa, K- kamera (pan – tilt - zoom), M – mlaznica, Č – čep za nalivanje instalacije, T1, T2 i T3 – davači pritiska. Na instalaciji su prikazani i zapreminski protoci Q_1 , Q_2 i Q_3 .



Slika 1. Izgled pokazno-obrazovne instalacije.

Obe pumpe su proizvođača Grundfos i imaju frekventne regulatore, odnosno invertere. Pumpa koja se ispituje (P1) je tipa in-line, model UPE50-120F. Buster pumpa (P2) je centrifugalna, model GRUNDFOS NBE32-160.1/169 AF-A-BAQE-96538987. Maksimalne snage pumpi su, redom, 0,79 kW i 5,5 kW. Ispitnoj pumpi P1 je izmenjeno kućište tako da je ugrađena kao centrifugalna sa providnim spiralnim, tangencijalnim kućištem.

Motorizovani ventili su tipa VXG44.25-10, DN25, kvs 10m³/h, NP16 sa aktuatorom SAS61.03. Celim sistemom se može upravljati lokalno ili putem interneta uz pomoć razvijene LabView aplikacije.

2.2 Merna opremanainstalaciji

Na instalaciji je priključeno pet davača pritiska, i to T1 – meri diferencijalni pritisak na Venturimetru, T2 – meri nivo vode u rezervoaru R1 i T3 – meri diferencijalni pritisak na pumpi P2. Na usisu pumpe je povezan davač pritiska T4 koji meri apsolutni pritisak. Na usisu i potisu pumpe P1 je povezan diferencijalni davač pritiska T5. Samo davač pritiska T4 meri apsolutni pritisak, dok ostali mere diferencijalni pritisak.

Modeli i merni opsezi davača pritiska prikazani su u Tabeli 1.

Tabela 1. Karakteristike ugrađenih davača pritiska.

Davači pritiska	Merenje pritiska na instalaciji	Model-oznaka	Merni opseg [bar]
T1	diferencijalni	M400CD01121	0-3
T2	diferencijalni	M400CE01121	0-0,1
T3	diferencijalni	M400CF01121	0-5
T4	apsolutni	M401CE01128	0-1
T5	diferencijalni	M400D001121	0-1

Merno-akvizicioni i upravljački sistem je proizvođača National Instruments, SAD NI cDAQ-9174 sa karticama NI 9203, NI 9482 i dve NI 9263.

2.3 Način rada instalacije

Postoje tri osnovna načina rada instalacije i to su:

1. Pumpe P1 i P2, ili samo jedan od njih dve, transportuju protok Q_1 kroz cevovod 1, koji se deli u račvi R na Q_2 i Q_3 (slika 1.). Zatvoren je samo ventil V5.
2. Pumpe P1 i P2, ili samo jedan od njih dve, transportuju vodu iz donjeg rezervoara R1 u gornji rezervoar R2 i tada su zatvoreni ventili V2 i V5.
3. Voda cirkuliše u sistemu i tada su zatvoreni ventili V3 i V5.

Tokom prvog načina rada, određuje se radna tačka sistema i svake od pumpi pojedinačno, koje tada rade u rednoj sprezi. Ukoliko se posmatra presek redukovane redne sprege pumpi P1 i P2, i paralelne sprege cevovoda 2 i 3, moguće je odrediti radnu tačku sistema, odnosno napor u račvi R. Da će doći do ove sprege jasno je na osnovu jednačine kontinuiteta za račvu R:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3. \quad (1)$$

Karakteristike cevnih deonica sa pripadajućim lokalnim otporima izračunavaju se prema jednačini (2), imajući u vidu da su referentna ravan i račva R postavljeni na nivou vode u donjem rezervoaru R1:

$$H_{a1} = k_1 Q^2 / g, H_{a2} = k_2 Q^2 / g \text{ and } H_{a3} = H_{geo} + k_3 Q^2 / g. \quad (2)$$

gde je $i = 1$ do 3, za tri različita cevovoda, Q – zapreminski protok [m^3/s], g – ubrzanje sile Zemljine teže [m/s^2], H_{geo} – geodezijska visina, koja se meri od nivoa vode u donjem rezervoaru R1 do izlaza iz mlaznice M (slika 1.) i k_i – koeficijent otpora i -te cevne deonice [m^{-4}], određen na sledeći način:

$$k_i = \frac{8}{D_i^4 \pi^2} \left(\sum_{j=1}^n \zeta_j + \lambda_i L_i / D_i \right), \quad (3)$$

gde su: n – broj lokalnih hidrauličnih otpora, D_i – pripadajući unutrašnji prečnici cevovoda [m], ζ_j – lokalni hidraulični otpori, λ_i – koeficijent trenja (koji, u opštem slučaju zavisi od Rejnoldsovog broja i relativne hrapavosti cevovoda) i L_i – dužina odgovarajuće cevne deonice [m]. Da bi se odredila tačna vrednost potrebne energije za svaki pojedinačni cevovod, u jednačine (2) unosi se odgovarajući protok. Unutrašnji prečnik D_i varira u cevovodu 1, pa bi jednačina (2) bila nešto složenija u tom slučaju. Pretpostavlja se da je strujanje vode u cevovodima turbulentno. Smer strujanja je ucrtan na slici 1. Voda se usisava iz donjeg rezervoara R1 i prolazi kroz pomoćnu (buster) pumpu P2, pa potom kroz cevovod 1 do pumpe koja se ispituje P1, pa kroz Venturimetar do račve R gde se završava cevovod 1. Potom se protok vode Q_2 vraća u usisni rezervoar R1, dok se deo vode potiskuje od račve R, kroz cevovod 2 i mlaznice M do gornjeg, potisnog rezervoara R2 (slika 1.). Dakle, kada su otvoreni svi ventili osim V5, i rade obe pumpe, posmatra se složeni hidraulički sistem cevovoda u sprezi sa rednom spregom dve pumpe. Uloga pomoćne pumpe P2 je proširivanje oblasti ispitivanja pumpe P1 kao i za nalivanje sistema vodom neposredno pre startovanja ispitivane pumpe.

Kada je deo ovako složenog sistema, cevovod 2 se može posmatrati kao bajpas (optočni vod) i ukazati posmatračima i na ovakav način regulacije pumpi. Takođe, smanjivanjem energije u račvi R, moguće je obustaviti strujanje u cevovodu 3, odnosno $Q_3 = 0$, pa dovesti i do uvlačenja vazduha u sistem kroz cevovod 3.

Prilikom drugog načina rada, jasno je da se radi o jednostavnom cevovodu, jer se tada prikazuje samo transport vode iz donjeg rezervoara R1 u gornji R2. U ovom slučaju se kriva cevovoda može odrediti sabiranjem radnih krivih cevovoda 1 i 3 na sledeći način:

$$H_{a13} = H_{geo} + (k_1 + k_3) Q^2 / g. \quad (4)$$

Ovo je način rada instalacije koji se koristi prilikom kalibracije protokomera.

Treći način rada je prikaz cirkulisanja vode u određenom sistemu, koji je prisutan u, na primer, sistemima grejanja. Tada je uspostavljen, ponovo, jednostavan cevni sistem i formirana je jednačina potrošača, odnosno zbirnih cevovoda 2 i 3 na sledeći način:

$$H_{a12} = (k_1 + k_2) Q^2 / g. \quad (5)$$

I u drugom i trećem načinu rada instalacije pumpe P1 i P2 rade u rednoj sprezi. Kako bi se odredila radna tačka sistema i protok, preseca se kriva proizvođača (redne sprege pumpi P1 i P2) sa krivom cevovoda H_{a12} . Odatle se, pri konstantnom protoku, određuju radne tačke pumpi P1 i P2.

3 Akvizicija podataka i rad na instalaciji

U okviru ovog poglavlja razmatra primena razvijene LabView aplikacije za instalaciju. Detalji razvijene aplikacije se ne mogu prikazati zbog svog obima, pa se razmatra samo njena primena. Prezentovani su i detalji daljinskog načina rada pokazno-obrazovne instalacije.

3.1 Određivanje radnih krivih pumpe i cevovoda

Korisnički interfejs razvijene aplikacije u softverskom paketu LabView prikazan je na slici 2. Na panelu se vide sve merene veličine. Pet kružnih belih indikatora (prema LabView nazivima „gauge“) pokazuju vrednosti pritiska, koje mere davači pritiska T1 do T5. Na skali rezervoara je prikazana trenutna zapremina tečnosti. U donjem redu se nalaze četiri klizača kojim se reguliše stepen otvorenosti ventila V1 do V3 i V5. Elektromagnetni ventil (EMV), na slici 1. označen kao V4, nije regulacioni, već brzi ventil za zatvaranje deonice 3 kako bi se sprečilo prelivanje rezervoara R2 i omogućila realizacija vežbe kalibracije/etaloniranja protokomera. Pri vrhu potisnog rezervoara R2 postavljena su dva sigurnosna prekidača (plovka), kao i dva prekidača u usisnom rezervoaru R1, koja u zavisnosti od nivoa vode šalju signal za isključenje napajanja pumpe. Za startovanje ventila EMV je postavljeno dugme „Elektromagnetni“, odnosno uključi/isključi, koje šalje relejni signal, kako bi se aktivirao ventil V4, tj. EMV, i otvorio da pušta protok Q_3 .

Brzine obratnja pumpe P1 su u granicama od 700 do 2900 min^{-1} , dok je brzina pomoćne, odnosno buster pumpe P2 ograničena zbog bezbednog korišćenja instalacije preko interneta kao još jedna od mera zaštite instalacije od eventualnog propusta ili zloupotrebe od strane korisnika. Brzine se mogu podešavati na korisničkom interfejsu. Za pumpu P1 je trenutno prikazana brzina obrtanja oko 2860 min^{-1} (slika 2.). Takođe, sa invertera pumpe P1 se može očitavati i njena snaga, što je takođe moguće na panelu prikazanom na slici 2.

Na korisničkom interfejsu su prikazane i komande za pokretanje i zaustavljanje male i velike, odnosno ispitivane i pomoćne pumpe. Dugme „Dozvola za rad mp“ onemogućava slučajno startovanje pumpe koja se ispituje, P1. Postoji i dugme za uključivanje kamera za snimanje cele instalacije, kao i za fokusiranje na usis pumpe gde se mogu uočiti prvi kavitacioni mehurovi.

Postavljeno je i veliko dugme „EMERGENCY SHUT DOWN“ koje trenutno zaustavlja rad sistema u slučaju nekih problema i vraća komande na inicijalne vrednosti kada sistem nije u pogonu. To je još jedan nivo zaštite, koji gasi sve ventile i obe pumpe. Na desnoj strani interfejsa je prikazano pet jezičaka sa različitim zadacima o čemu će biti reči u nastavku.

Na slici 2. je prikazana situacija kada svuda postoji strujanje, odnosno pored složenog cevovoda, postoji i pražnjenje gornjeg rezervoara.

Na slici 3. prikazan je izgled interfejsa sa akitvnim jezičkom (tabom) „Prva vežba“ u okviru koje se određuje kalibraciona kriva Venturimetra zapreminskom metodom. Uspostavljanje protoka u instalaciji, očitavanjem diferencijalnog pritiska na T1, nakon nekoliko sekundi, prikazano je na dijagramu 2, slike 3. Praćenje napunjene zapremine rezervoara R2 u vremenu dato je na dijagramu 5 na slici 3.

Doprinos zapremine tokom vremena uspostavljanja protoka se oduzima. Nakon završetka merenja pri podešenom protoku, dugmetom „Snimi“ (poz. 3 na slici 2) se kriva prenosi na dijagram 1 (slika 3.). Na osnovu dobijenih krivih na dijagramu 1 i određenih pritiska, formira se dijagram 4 na slici 3.:

$$Q = b \sqrt{\Delta p}, \quad (5)$$

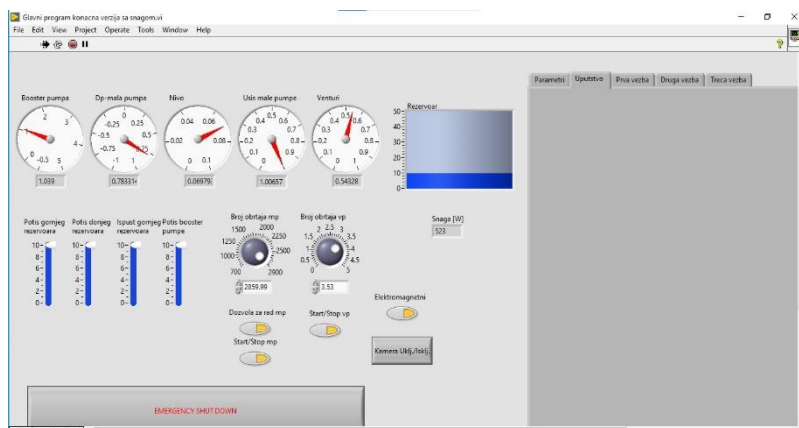
19. Savetovanje SDHI i SDH - Beograd, Srbija 2021. Conference SDHI & SDH - Belgrade, Serbia 2021.

gde je Δp diferencijalni pritisak koji se meri na davaču pritiska T1. Odavde se određuje kalibracioni koeficijent Venturimetra (b) i koristi u sledećim vežbama.

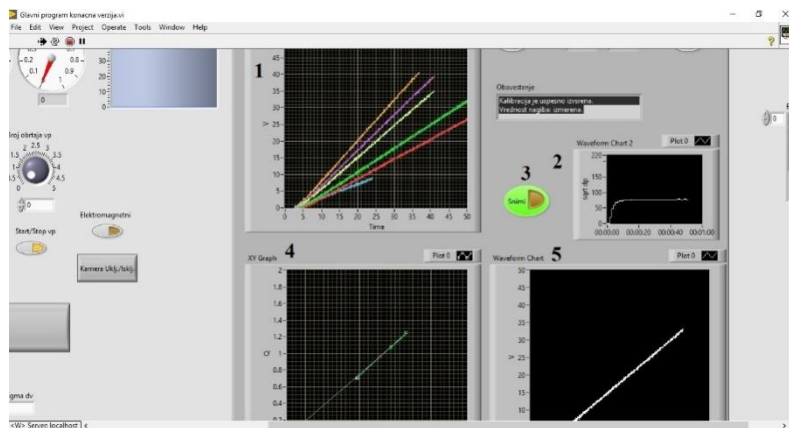
Na slici 4. prikazan je izgled interfejsa sa aktivnim jezičkom (tabom) „Druga vežba“ u okviru koje se određuje radna kriva pumpe P1 pri različitim brzinama obrtanja. Na slici su prikazane radne krive i to napora i snage u funkciji od protoka za četiri različite brzine obrtanja. Napor se određuje na osnovu jednačine (11), dok se snaga pumpe meri na njenom inverteru. Na osnovu ovako dobijenih podataka, moguće je odrediti i stepen korisnosti pumpnog agregata.

Omogućen je i automatski eksport dobijenih mernih podataka u eksel fajl i prikaz rezultata, kao što se može videti u nastavku.

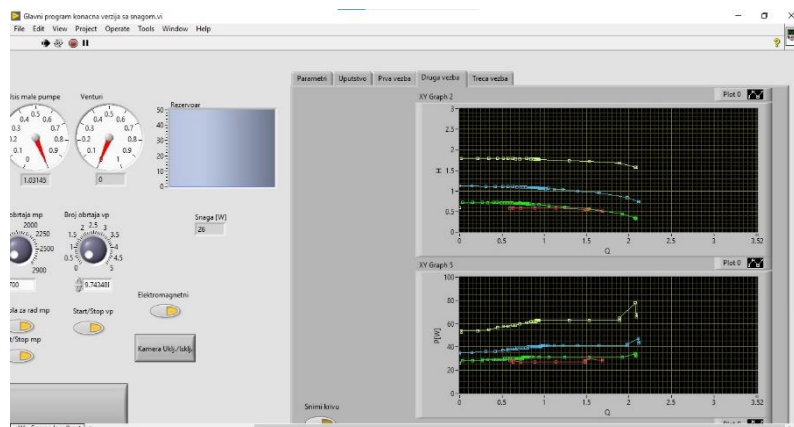
Planirana je i treća vežba (vidi se jezičak (eng. tab) na slici 4), u okviru koje bi se određivala inicijalna kavitacijaska rezerva. Diskusija je data u okviru poglavlja 4.



Slika 2. Izgled razvijene aplikacije u softverskom paketu LabView.



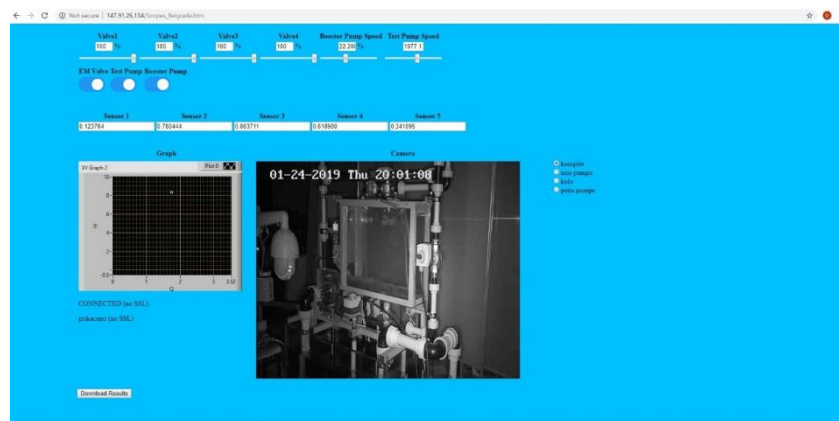
Slika 3. Rezultati prve vežbe u softverskom paketu LabView.



Slika 4. Rezultati druge vežbe u softverskom paketu LabView.

3.2 Daljinski rad na instalaciji

Na razvijenoj pokazno-obrazovnoj instalaciji moguće je ostvariti i daljinski rad preko internet linka: http://147.91.26.134/Scopes_Belgrade.htm Na slici 5. je dat prikaz internet stranice kada su instalacija i kamere priključene na mrežu (u noćnom režimu rada).



Slika 5. Izgled daljinskog pristupa instalaciji.

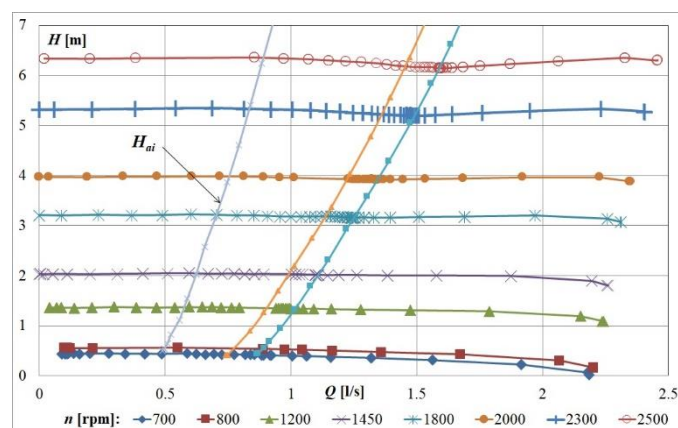
Dat je prikaz sa jedne od kamera, kao i jedna ostvarena radna tačka pumpe P1. Može se uočiti da su svi ventili otvoreni, da je brzina obrtanja ispitivane pumpe $n = 1977,1 \text{ min}^{-1}$, kao i da je pomoćna pumpa sa brzinom obrtanja na oko 22,2% od svog maksimuma $n_{max} = 2860 \text{ min}^{-1}$. Uočava se da su obe pumpe uključene, kao i ventil EMV. Dati su rezultati pokazivanja davača pritiska. Sve opisane eksperimente u potpoglavlju 3.1 moguće je obaviti i na daljinu, preko interneta.

4 Rezultati merenja i vizualizacije

U okviru ovog poglavlja prikazuju se i razmatraju rezultati merenja na pokazno-obrazovnoj instalaciji, kao i vizualizacija strujanja.

4.1 Određivanje radnih krivih pumpe i cevovoda

Na osnovu dobijenih eksperimentalnih rezultata na pokazno-obrazovnoj instalaciji, formiran je dijagram pri različitim brzinama obrtanja ispitivane pumpe P1 (slika 6.). Napor pumpe je određen na osnovu jednačine (11).



Slika 6. Karakteristike napora ispitne pumpe P1 pri različitim brzinama obrtanja i krive cevovoda.

U navedenom intervalu protoka, napor pumpe je približno konstantan, što je prikazano i na slici 4. Određivanje radnih krivi ispitivane pumpe P1 se obavlja pri radu sa složenim cevovodom. Na slici 6. prikazane su tri krive složenih cevovoda. Jedna kriva cevovoda (H_{ai}) se formira podešavanjem otvorenosti ventila i potom menjanjem brzine obrtanja pumpe koja se ispituje (P1). Da bi se dobila druga kriva cevovoda, promeni se nivo zatvorenosti ventila, pa se ponovi isti postupak sa menjanjem brzine obrtanja pumpe P1.

4.2 Eskperimentalno određivanje inicijalne kavitacije rezerve

U okviru rada [9] diskutovano je određivanje inicijalne kavitacijske rezerve ($NPSH_{ini}$) na razmatranoj pokazno-obrazovnoj instalaciji. Definiše se na osnovu sledećeg izraza:

$$NPSH_{ini} = \left(p_I + \rho c_I^2 / 2 - p_D \right) / (\rho g), \quad (6)$$

gde indeks „I“ označava merni presek na usisu pumpe, c srednju brzinu strujanja u mernom preseku, p_D pritisak zasićene vodene pare pri radnim uslovima i ρ gustinu vode.

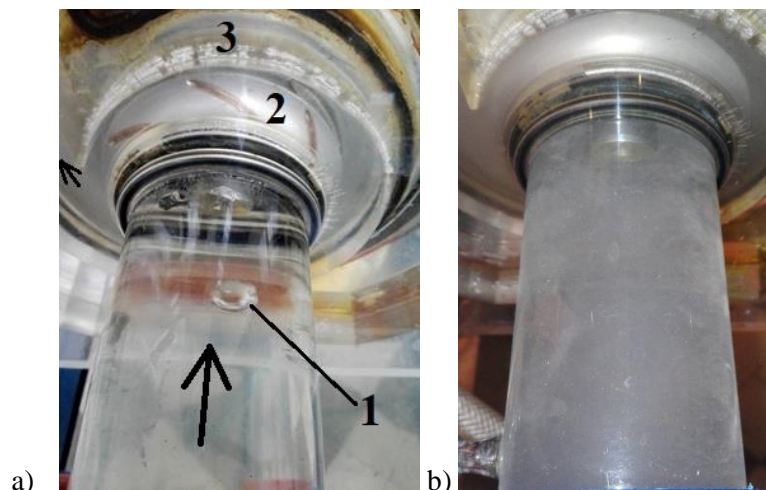
Providni delovi instalacije su od izuzetnog značaja za određivanje inicijalne kavitacije i rezerve prema jednačini (6), jer pojava prvog mehura je od izuzetnog značaja za posmatranje inicijalne kavitacije. Postupak određivanja inicijalne kavitacije je sledeći:

1. Brzina obrtanja pumpe koja se ispituje (P1) podesi se na određenu vrednost.
2. Ventil V2 je u određenom položaju, dok se ventil V1 polako pritvara.
3. U trenutku kada se pojavi prvi kavitacioni mehur na usisu pumpe (slika 7.a), očitavaju se davači pritiska T1 i T4. Na ovaj način se, pomoću davača T1, određuje diferencijalni pritisak na Venturimetru i samim tim, na osnovu jednačine (5) zapreminski protok. Apsolutni pritisak na usisu pumpe se određuje pomoću davača T4.
4. Na osnovu izmerenih vrednosti pritiska u prethodnoj tački, određuje se inicijalna kavitacija rezerva na osnovu jednačine (6).

5. Postupak se ponavlja za novu poziciju ventila V2.

Drugi način za određivanje $NPSH_{ini}$ je sledeći:

1. Brzina obrtanja pumpe koja se ispituje (P1) podesi se na određenu vrednost.
2. Sada je obrnut postupak u odnosu na prethodni način. Naime, ventil V1 je u određenom položaju, dok se ventil V2 polako otvara dok se ne pojave kavitacioni mehurovi (slika 7.b).
3. Ventil V2 se se zatvara dok ne nestanu svi parno-gasni, odnosno kavitacioni mehurovi.
4. $NPSH_{ini}$ se, na osnovu eksperimentalno određenih pritiska, određuje na osnovu izraza (6).
5. Postupak se ponavlja za drugi položaj ventila V1.
6. Sada se može odrediti zavisnost $NPSH_{ini} = f(Q)$.



Slika 7. Vizualizacija kavitacije u pumpi: a) Pojava prvog mehura: 1- mehur na usisu pumpe, 2- obrtno kolo pumpe i 3- spiralno kućište pumpe; b) Kavitacioni mehurovi na usisu pumpe [9].

Na slici 7.a prikaza je i smer strujanja vode i to u usisnom cevovodu, kao i kod jezička spirale, kada je sabran ceo protok kroz pumpu. Po obimu spiralnog kućišta uočava se i zaptivač.

Ovako zamišljena laboratorijska vežba bi bila treća u nizu, ali se još razmatra tačnost ovako definisane procedure.

4.3 Dodatne mogućnosti za izučavanje strujanja u pokazno-obrazovnoj instalaciji

Kako je već ispred napomenuto, delovi usisnog i potisnog cevovoda su ostavljeni providni sa namerom da se izučava fenomen kavitacije, kao i turbulentnog vihornog strujanja. U tu svrhu je postojeće „in-line“ spiralno kućište zamenjeno klasičnim za centrifugalne pumpe, sa tangencijalnim izlazom.

Strujanje kroz pumpno kolo je trodimenzijsko, a može se vršiti izvesna aproksimacija i kako bi se razmatralo kao dvodimenzijsko, posebno ako se posmatra izuzetno centrifugalna pumpa male specifične brzine obrtanja. Spiralna kućišta se projektuju tako da se duž glavnog pravca strujanja ostvaruje konstantna cirkulacija, odnosno $rc_u = \text{const.}$, gde je r radijus, a c_u obimska komponenta apsolutne brzine. Kako na izlazu korišćene pumpe ne postoji zakolo, odnosno sprovedni aparat, koji bi ispravio fluidnu struju, formirana cirkulacija na izlazu iz obrtnog kola (slika 7.a, poz. 2) se održava u spiralnom kućištu do izlaznog preseka, pa i nakon toga u potisnom cevovodu, što se može uočiti na slici 8.a.

Iz Ojlerove jednačine za turbomašine, neturbine, sledi:

$$Y_{th} = u_2 c_{3u} - u_1 c_{0u}, \quad (7)$$

gde Y_{th} jedinična strujna energija kola pumpe, u_1 i u_2 su obimske brzine na ulazu i izlazu iz obrtnog kola, redom, dok su c_{0u} i c_{3u} obimske komponente apsolutne brzine na ulazu i izlazu iz obrtnog kola pumpe. Kako je na ulazu pumpe postavljen ispravljaj fluidne struje, predrotacija ne postoji, pa se jednačina (7) može uprostiti:

$$Y_{th} = u_2 c_{3u}. \quad (8)$$

Kako je obimska brzina $u = D\pi n/60$, gde je prečnik $D = 2r$, sledi:

$$Y_{th} = u_2 c_{3u} = c_{3u} D_2 \pi n / 60 = r_2 c_{3u} \pi n / 30 \rightarrow r_2 c_{3u} = 30 Y_{th} / \pi n = 30 H g / (\pi n \eta_h), \quad (9)$$

gde je H napor pumpe, koji se određuje na osnovu standarda ISO 9906 [5] i η_h hidraulički stepen korisnosti pumpe. Hidraulički stepen korisnosti se definiše kao odnos hidrauličke i snage kola neto [10]. Jedinična strujna energija kola (Y_{th}) je, preko hidrauličkog stepena korisnosti, u direktnoj vezi sa jediničnom strujnom energijom pumpe (Y), pa samim tim i naporom pumpe (H):

$$\eta_h = P_h / P_{kn} = Y / Y_{th} = gH / Y_{th}. \quad (10)$$

Ovaj izraz je iskorišćen prilikom izvođenja jednačine (9).

Napor pumpe (H) je određen na osnovu definicije napora pumpe i merenja koja se obavljaju na instalaciji i to na sledeći način:

$$H = (p_{II} - p_I) / (\rho g) + (c_{II}^2 - c_I^2) / (2g) + (z_{II} - z_I), \quad (11)$$

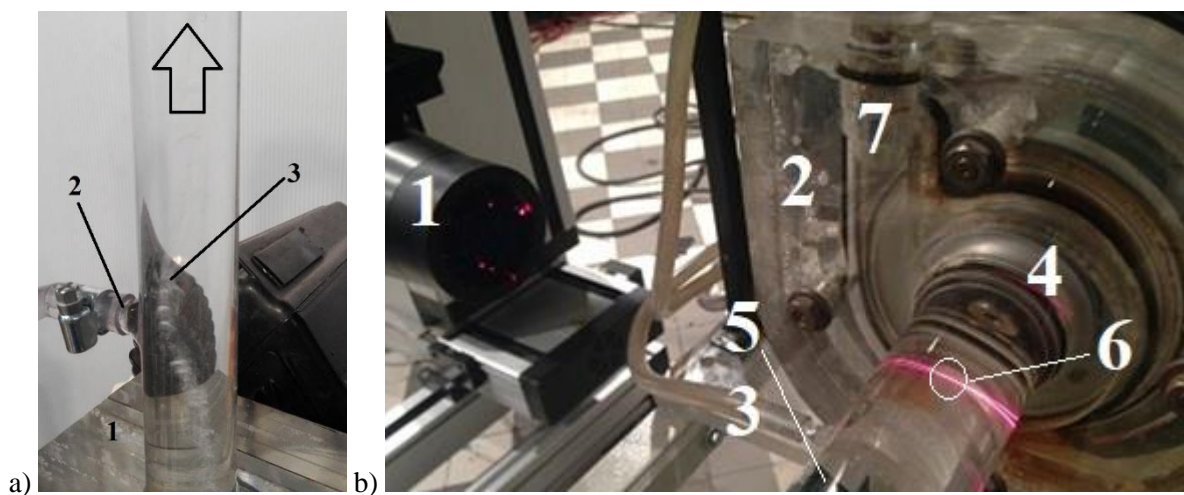
gde su mereni pritisci na potisu (presek „I“) i usisu (presek „II“) pumpe, odnosno njihova razlika pomoću diferencijalnog davača pritiska. Razlika kinetičkih energija je određena na osnovu izmerenog protoka i poznatih unutrašnjih prečnika cevovoda $D_I = 56,2$ mm i $D_{II} = 30$ mm na sledeći način:

$$c_l = Q / A_l = 4Q / (D_l^2 \pi), \quad (12)$$

gde je $l = I, II$, a Q zapreminski protok pumpe, određen eksperimentalno pomoću Venturimetra, koji na osnovu slike 1. iznosi $Q = Q_1$. Geodezijske visine težišta mernih preseka na usisu i potisu pumpe su za pokazno-obrazovnu instalaciju konstantne veličine i u okviru jednačine (11) se obeležavaju sa z_I i z_{II} , redom.

Cirkulacija na izlazu iz pumpe, određena na osnovu jednačine (9), se održava od izlaza iz spiralnog kućišta, ukoliko je ono projektovano po zakonu slobodnog vihora. Tako formiran vrtlog se zove slobodni ili potencijalni vrtlog. Međutim, kod turbomašina je češći slučaj formiranja Rankinovog ili kombinovanog vrtloga na izlazu iz pumpe, koji se sastoji od prinudnog vrtloga u blizini ose cevi i potencijalnog vrtloga u oblasti većih prečnika. On se pokazuje kao dosta otporan i žilav, i umanjuje energetska efikasnost postrojenja. Na slici 8.a je uočljiva jedna takva vrtložna struktura uz pomoć parno-gasnih mehurova koji su „preživeli“ samu pumpu i nisu implodirali. Na istoj slici je prikazan smer strujanja u instalaciji.

Za potrebe provere uniformnosti brzinskog polja na usisu pumpe korišćen je jednodimenzionalni laser Doppler sistem za merenje brzine (eng. laser Doppler velocimetry, LDV). Na slici 8.b prikazana je eksperimentalna postavka, gde je 1 - laser, 2 - spiralno kućište, 3 - priključak za merenje pritiska na usisu pumpe, 4 - obrtno kolo pumpe, 5 - ispravljač fluidne struje, ugrađen iza kolena na usisnom cevovodu pumpe, 6 - merna zapremina LDV sistema i 7 - izlaz iz spiralnog kućišta pumpe. LDV sistem je postavljen tako da meri aksijalnu komponentu brzine.



Slika 8. Vizualizacija turbulentnog vrtložnog strujanja u potisnom cevovodu pumpe: a) 1 - spiralno kućište, 2 - priključak za merenje pritiska i 3 - helikoida vizualizovana sa parno-gasnim (kavitacijskim) mehurovima; b) merenje brzine strujanja na usisu pumpe pomoću jednodimenzionalnog LDV sistema.

LDV sistem je model Flow Explorer, proizvođača Dantec sa softverom BSA Flow Software, koji je korišćen za akviziciju i obradu podataka. Signal procesor je BSA F30 sa 8-bitnim uzorkovanjem. Laser je crvene boje, talasne dužine 660 nm i snage 35 mW. Laser radi sa rasejanjem unazad, ali je i takva postavka dala dobre rezultate prilikom merenja. Korišćene su kuglice za prosejavanje fluidne struje prečnika 8-12 μm i gustine 1.1 g/cc (model 10089, proizvođača TSI, SAD). Laser je montiran na linearnoj ISEL vodiči, kako bi se ostvarilo pomeranje merne zapremine duž prečnika. Kontrolna merenja su urađena i u upravnom pravcu, kako bi se proverilo da li postoji ta komponenta brzine. Ova merenja

su ostvarena rotacijom lasera za 90°. Eksperimentalni rezultati su pokazali da je strujanje uniformno i da na usisu pumpe ne postoji cirkulacija, odnosno predrotacija, što opravdava uvedenu pretpostavku u jednačini (8).

Prilikom sprovedenih LDV merenja potrebno je obratiti pažnju na dislokaciju merne zapremine, s obzirom da su zidovi kroz koje prolaze zraci lasera zakrivljeni, kao i da je indeks prelamanja svetlosti za staklo i vodu različit. Razmatranje ovoga je sprovedeno za slučaj strujanja vazduha u zakrivljenim cevima u [12, 13] i slično razmatranje može da se primeni i na merenja u pokazno-obrazovnoj instalaciji.

Sve ovo pokazuje da razvijena instalacija predstavlja dobro nastavno sredstvo, ali ima i mogućnosti za izučavanje i važnih strujnih fenomena u turbomašinama i pripadajućim sistemima.

5 Zaključna razmatranja

Razvijena pokazno-obrazovna instalacija pruža brojne mogućnosti za demonstraciju rada jednog pumpnog sistema. On može da radi sa jednom ili dve pumpe u rednoj srpezi, sa jednostavnim, kao i sa složenim cevovodom.

Korisnički interfejs razvijene aplikacije u softverskom paketu LabView prikazan je u poglavlju 3. Na panelu se vide sve komande potrebne za upravljanje pokazno-obrazovnom instalacijom. Omogućen je rad u laboratoriji, kao i preko interneta.

Može se zaključiti da je prikazanom pokazno-obrazovnom instalacijom moguće ostvariti sledeće planirane ciljeve:

1. Prikaz rada centrifugalne pumpe pri transportu vode na određenu geodezijsku visinu. – Prvi primer jednostavnog cevovoda, kada je zatvoren ventil V2.
2. Prikaz rada pumpe prilikom cirkulacije tečnosti. – Drugi primer jednostavnog cevovoda, kada je zatvoren ventil V3.
3. Analiza rada pumpi, pojedinačno i u rednoj sprezi, sa jednostavnim, kao i sa složenim hidrauličkim sistemom kada su otvoreni svi, osim ventila V5.
4. Demonstracija uticaja promene brzine obrtanja pumpe na radnu tačku pumpe i hidrauličkog sistema. Razmatranje uštede u energiji prilikom regulisanja promenom brzine obrtanja u odnosu na regulacijom ventilima.
5. Prikaz pojave kavitacije u pumpi tokom rada. Analiza različitih stadijuma kavitacije.
6. Prikaz kalibracije Venturimetra, nestandardne geometrije, na osnovu međunarodnog standarda ISO 8316:1987 [11].
7. Određivanje radnih krivih ispitivane pumpe za različite brzine obrtanja.
8. Razmatranje prikazivanja eksperimentalno određenih radnih karakteristika pumpi u dimenzionom obliku, koji zavisi od brzine obrtanja pumpe, kao i u bezdimenzionom obliku na osnovu značica protoka i napora pumpe, a koji ne zavisi od brzine obrtanja pumpe.
9. Određivanje kavitacijskih karakteristika pumpe.
10. Razmatranje korišćenja zapreminskog metoda, kako za kalibraciju protokomera (što je navedeno pod tačkom 5.), tako i za merenje zapreminskog protoka u hidrauličkom sistemu.
11. Vizuelno posmatranje fenomena kavitacije, kao i turbulentnog vihornog strujanja na potisu pumpe.
12. Merenje brzinskog polja na usisu i potisu pumpe pomoću optičkih mernih metoda I to laser Dopler anemometra i snimanjem čestica (particle image velocimetry).
13. Demonstracija prvog nalivanja pumpe vodom, kako bi se ostvarilo adekvatno startovanje.

Za razliku od većine dostupnih eksperimenata na daljinu, prikazana instalacija je složena i pripada grupi najkompleksnijih. Pokazno-obrazovna instalacija, svojom fleksibilnošću, pruža još veliki broj mogućnosti rada u nastavi, kao i u istraživanjima fenomena strujanja u turbomašinama i pripadajućim sistemima. Radom, kako u laboratoriji, tako i preko interneta, studenti i inženjeri mogu da testiraju svoje znanje iz hidrauličkih mašina i mehanike fluida.

Zahvalnica

Ovde su prikazani rezultati istraživanja podržanog strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (MPNTR) kroz projekte: Bilateralni projekat MPNTR-a sa NR Kinom (Hydropower Engineering Technology Research Center of Ministry of Water Resources in China and Renewable Energy and Rural Electrification Zhejiang International Science and Technology Cooperation Base), Joint Research on the Development Technology of Low-head Run-of-the-river Hydropower ipu Ugovoru 451-03-9/2021-14/200105 od 05.02.2021. godine, kao i SCOPES projektom "Enabling Web-based Remote Laboratory Community and Infrastructure".

Literatura

1. Cantrak Dj.S., Jankovic N.Z., Nedeljkovic M.S., Matijevic M.S., Ilic D.B. (2018) Lectures in rotodynamic pumps - from design and simulations to testing, Proceedings, 2018 International Conference on Interactive Mobile Communication, Technologies and Learning (IMCL2018), McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, October 11-13, ID 1165, 358-369, Springer.
2. Čantrak S. (1992.) *Termotehničar, Priručnik za termotehniku, termoenergetiku i procesnu tehniku*, Tom 1, poglavlje *Primenjena mehanika fluida*, str. 78-195., Poslovna politika, Beograd.
3. Čantrak D.S., Janković N.Z., Ilić D.B., Nedeljković M.S. (2021) Educational centrifugal pump test rig, 6th IAHR Europe Congress, Warsaw, Poland, No. 62131228719, Abstract Book, 850-851, ISBN 978-83-66847-01-9, Special Session KS6: Measurement techniques and demonstration test rigs in hydraulic research.
4. Čantrak Đ., Nedeljković M., Janković N., Ilić D. (2019) Demonstrational pump system, Industrial Energy and Environmental Protection in Southeastern Europe, VII Regional conference, June 19-22, Zlatibor, Serbia, Conference Proceedings, Chief Editor: M. Radovanović, R-10.1, 395-402.
5. ISO 9906 Rotodynamic Pumps - Hydraulic Performance Acceptance Tests - Grades 1, 2 and 3 (2012)
6. Nedeljkovic M.S., Cantrak D., Jankovic N., Ilic D., Matijevic M. (2019) Virtual instrumentation used in engineering education set-up of hydraulic pump and system. In: Auer M., Langmann R. (eds) Smart Industry & Smart Education. REV 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 47. Springer, Cham, 686-693.
7. Nedeljkovic M.S., Cantrak D.S., Jankovic N.Z., Ilic D.B., Matijevic M.S. (2018) Virtual instruments and experiments in engineering education lab setup with hydraulic pump, Proceedings, 2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), April 17-20, Santa Cruz de Tenerife, Canary Islands, Spain, 1145-1152.
8. Nedeljkovic M.S., Jankovic N., Cantrak D., Ilic D., Matijevic M. (2019) Poster: Remote engineering education set-up of hydraulic pump and system. In: Auer M., Langmann R. (eds) Smart Industry & Smart Education. REV 2018. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 47. Springer, Cham, 304-311.
9. Nedeljkovic M.S., Jankovic N.Z., Cantrak D.S., Ilic D.B., Matijevic M.S. (2018) Engineering education lab setup ready for remote operation - Pump system hydraulic performance, Proceedings, 2018 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), April 17-20, Santa Cruz de Tenerife, Canary Islands, Spain, 1175-1182.
10. Protić Z., Nedeljković M. (2006) *Pumpe i ventilatori – Problemi, rešenja, teorija*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd.
11. ISO 8316:1987 Measurement of liquid flow in closed conduits — Method by collection of the liquid in a volumetric tank (1987).
12. Ristić S.S., Ilić J.T., Čantrak D.S., Ristić O.R., Janković N.Z. (2012) Estimation of laser-Doppler anemometry measuring volume displacement in cylindrical pipe flow, Thermal Science, vol. 16. no. 4, 1027-1042.
13. Ilić J., Ristić S., Čantrak Đ., Janković N., Srećković M. (2013) The comparison of air flow LDA measurement in simple cylindrical and cylindrical tube with flat external wall, FME Transactions, vol. 41 no. 4, 333-341.