MODELIRANJE HIDRAULIČKIH KARAKTERISTIKA VENTILA SA RAVNIM SEDIŠTEM VRETENA

MODELING OF HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF VALVES WITH FLAT SPINDLE SEAT

Dr Dragan Knežević, dipl. inž.,
Vojnotehnički institut VJ, Beograd

Pri projektovanju hidrauličkih instalacija, projektanti se vrlo često opredeljuju za koeficijente lokalnog otpora većih vrednosti, što se pravda pozivanjem na literaturni izvor. Velika je šarolikost literaturnih podataka o koeficijentima hidrauličkih lokalnih otpora istih komponenata. Za ventile sa ravnim sedištem vretena ti podaci se brojčano razlikuju i do pet puta. U cilju iniciranja normativnog sređivanja problematike vezane za hidrauličke koeficijente otpora i otpora, u radu su definisani: opitna instalacija, metod eksperimentalnog određivanja otpora ventila, metode pronalaženja i ocene modela ventila. Problem regulacije protoka vode kroz slične ventile definisan je, u radu, postavljenim analitičkim izrazima koeficijenata otpora ventila i otpora ventila.

When designing hydraulic systems, designers frequently choose local resistance coefficients of higher values, which is justified by quoting reference sources. There are versatile reference data on hydraulic local resistance coefficients for the same components. For valves with the flat spindle seat these data numerically differ, sometimes even 5 times. In order to initiate norm setting related to hydraulic resistance coefficients and resistance, the paper provides definition of a trial installation, method of experimental determination of valve resistance, methods of finding and assessing of the valve model. Water flow control through the similar valves is defined herein by set analytical expressions of valve resistance coefficients and valve resistance.

Ključne reči: hidraulika; armatura; regulacija; ventil; sistem; modeliranje; modeli; ocena modela
Key words: hydraulics; armature; control; valve; system; modeling; models; model assessment

Korišćene oznake i simboli

ξ_v – koeficijent otpora ventila je funkcija parametara
D_s – prečnik sedišta ventila

h – hod vretena ventila
t_v – temperatura vode
ρ – gustina vode
d – nazivni prečnik ventila
Δp – pad pritiska u ventilu
v – brzina vode ispred ventila
Q – protok vode kroz ventil.
N – broj eksperimentalnih jedinica iznosi
n_{Ds} – broj nivoa prečnika sedišta ventila
n_h – broj nivoa hoda vretena ventila
n – broj ponovljenih očitavanja
A, a, b – konstante
a_0, a_1, b_1 – konstante
A_1, e_1, e_2 – rešenja sistema jednačina
R_{i12} – koeficijent višestruke korelacije funkcionalne veze, oblika $\xi_i = AD_{s1}{}^a h^b{}_2$
B(0)– B(2) – članovi matrice sistema jednačina
r_{i21}, r_{i12} – karakteristični koeficijenti parcijalne korelacije
$r_{i1}, r_{i2}, r_{i12}, r_{i21}$ – koeficijenti parcijalne korelacije.

Uvod

Sistem daljinskog grejanja ima funkcionalnu i radnu sposobnost. Funkcionalna sposobnost se formira u procesu projektovanja sistema, a radna u procesu izbora materijala, delova, podsklopova, sklopova, uređaja i podsistema, montaže i regulisanja tokom izgradnje sistema.

U [1] tretira se podsistem za predaju toplote potrošaču (podstanici), specifičnom potrošaču – porodičnoj kući, uticaj lokalnih hidrauličkih otpora na ukupan pad pritiska, sa osvrtom na sistem daljinskog grejanja u Kragujevcu.

Podstanica se priključuje na magistralni vod preko odgovarajućeg ogranka, na mestu, na kojem postoji rezerva kapaciteta i zadovoljavajući raspoloživi pritisak. Priključenje podstanice ne sme da remeti radnu sposobnost postojećeg sistema, ni ispred, niti iza mesta priključenja. Evidentan je problem neujednačenog režima pritiska podstanice, što za posledicu ima obaranje nivoa pritiska i gubitak energije.

Svaka hidraulička instalacija kao i podstanica sadrži obavezne i izborne komponente i grupu razne armature. Armatura može biti zatvarajuća, regulaciona, merna, sigurnosna i pokazna. Svaka komponenta kroz koju protiče fluid (nosilac toplote) predstavlja određen otpor strujanju i uzrokuje gubitak pritiska, odnosno energije.

1. Koeficijenti hidrauličkih otpora armature

Koeficijenti hidrauličkih otpora armature su od posebnog značaja za uspostavljanje radne sposobnosti instalacije sistema. Proračun pada pritiska u primarnom delu instalacije, provera raspoloživog pritiska na mestu priključenja instalacije na magistralni vod, neujednačenost u potrošnji toplote i izmenjivost temperaturnog režima, čine posao projektanta složenim i unose stepen rizika u ispunjenju osnovnog zadatka formiranja funkcionalne sposobnosti sistema. Vrlo često, projektanti se opredeljuju za koeficijente većih vrednosti, što se pravda pozivanjem na literaturni izvor, pošto postoji mnogo izvora podataka sa različitim brojnim vrednostima. Ilustracija toga nalazi se u tabeli 1 [1].

Tabela 1. Rezultati za koeficijent otpora ventila ξ_v

Prečnik sedišta ventila, D_s [mm]	Hod vretena ventila, h [mm]	Koeficijent otpora ventila ξ		
		Merenje		
		1.	2.	3.
11	1,46	592	588	590
	2,90	105	108	105
	6,60	12	16	14
13	1,46	406	389	402
	2,90	70	74	72
	6,60	9,30	10,50	9,50
15	1,46	293	287	290
	2,90	51	53,60	52,30
	6,60	6,80	7,30	7,05
18	1,46	185	195	190
	2,90	33	36	34,50
	6,60	4,50	4,47	4,70

Na slici 3 [1] grafički je prikaz pada pritiska protočnog ventila u funkciji brzine fluida računat prema podacima iz nekoliko literaturnih izvora, a na slici 4 [1] je grafički prikaz uticaja vrste, izvedbe i veličine karakteristične armature na koeficijente lokalnog otpora.

Podaci ilustrovani na slikama 3 i 4 [1] dovode projektanta pred dilemu: kojem literaturnom izvoru verovati i koje podatke koristiti.

Zbog šarolikosti i nepouzdanosti literaturnih podataka, u [1] ukazuje se na uočene specifičnosti, od kojih navodimo:

– koeficijent lokalnog otpora za protočne ventile sa pravim sedištem vretena ventila, u literaturi se brojčano razlikuje i do pet puta;

– osetljivo je i otvoreno pitanje promenljivosti stvarne vrednosti koeficijenta lokalnog otpora hvatača nečistoća tokom eksploatacije.

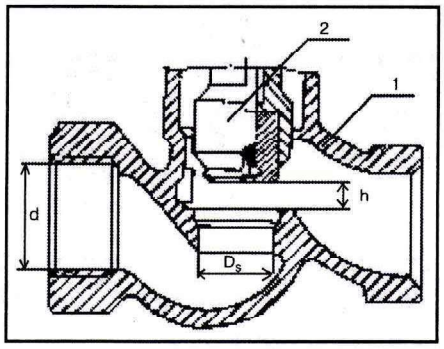
Na osnovu iznetih činjenica proizlazi da bi trebalo normativno urediti stvarne koeficijente lokalnog otpora svake vrste armature. Za izvršena merenja izdati odgovarajući atest, koji će sadržati sve bitne podatke armature potrebne projektantu.

Da bi se pristupilo normativnom sređivanju problematike vezane za koeficijente lokalnog otpora svake vrste armature, potrebno je definisati: opitnu instalaciju, metode eksperimentalnog određivanja koeficijenata otpora armature u funkciji radnih i geometrijskih karakteristika, ocene saglasnosti dobijenih modela i rezultate eksperimenta.

2. Cilj i sadržaj istraživanja

Cilj istraživanja je da se definišu metode modeliranja koeficijenta otpora ventila za regulaciju protoka vode sa ravnim sedištem vretena ventila, ocene nivoa saglasnosti dobijenih modela i rezultata eksperimenta. Da bi se postigao postavljeni cilj, potrebno je definisati:

– opitnu instalaciju i plan prikaza rezultata eksperimenta,



Slika 1. Ventil za regulaciju protoka vode; 1 – telo ventila, 2 – vreteno ventila

– metod eksperimentalnog određivanja koeficijenta otpora ventila,

– metod pronalaženja analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila, i

– metod provere adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila.

Analiziran je uticaj prečnika sedišta D_s ventila za regulaciju protoka vode (u daljem tekstu: ventil) i hoda vretena ventila h na koeficijent otpora ξ_v ventila. Shematski izgled ventila za regulaciju protoka vode vidi se na slici 1. Vreteno ventila može da se pomera u aksijalnom pravcu pomoću navoja. Hod vretena ventila može da se reguliše od nule (kada je ventil zatvoren), do svoje maksimalne vrednosti. U otvorenom položaju omogućen je protok vode kroz ventil, čime se obezbeđuje slobodan protok vode kroz mrežu instalacije.

Koeficijent otpora ventila je funkcija parametara [2–8]:

$$\xi_v = f(D_s, h, t_v, \rho) \tag{1}$$

pri čemu su:
D_s – prečnik sedišta ventila,
h – hod vretena ventila,
ρ – gustina vode,
t_v – temperatura vode.

Pri eksperimentu su parametri (ρ i t_v) konstantni. Želja je da se planiranim eksperimentom dođe do funkcije, koja kvalitativno i kvantitativno iskazuje uticaj prečnika sedišta ventila (D_s) i hoda vretena ventila (h) na koeficijent otpora ventila (ξ_v).

3. Opis eksperimentalnih istraživanja

Pad pritiska u ventilu (Δp) proporcionalan je dinamičkom pritisku [7, 9–12]:

$$\Delta p = \xi_v \rho v^2 / 2 \tag{2}$$

pri čemu je v brzina strujanja vode ispred ventila.

Ako se brzina strujanja vode ispred ventila izrazi preko protoka Q vode kroz ventil i prečnika posmatranog preseka d, dobija se izraz oblika:

$$v = 4Q / \pi d^2 \tag{3}$$

Kombinacijom izraza (2 i 3), rešenjem dobijenog izraza po ξ_v, dobija se izraz koeficijenta otpora ventila za fiksirani položaj vretena ventila, oblika:

$$\xi_v = \pi^2 d^4 \Delta p / 8\rho Q^2 \tag{4}$$

pri čemu su:
d [m] – nazivni prečnik ventila,

Δp [Pa] – otpor strujanju kroz ventil,
ρ [kg/m^3] – gustina vode,
Q [m^3/s] – zapreminski protok vode kroz ventil.

Analizom jednačine (4) lako je uočiti da su pri fiksnom hodu vretena ventila koeficijent otpora ventila (ξ_v) i odnos ($\Delta p/Q^2$) konstantni za bilo koju vrednost protoka. Promenom hoda vretena ventila neposredno se utiče na otpor (pad pritiska) ventila, definisan izrazom:

$$\Delta p = 8\rho\, \xi_v\, Q^2 / \pi^2\, d^4 \qquad (5)$$

Analizom jednačine (5) nije moguća kvalitativna ni kvantitativna ocena uticaja hoda vretena ventila h na otpor ventila, budući da ne figuriše u izrazu (5). Cilj istraživanja o kojem je reč u ovom radu je pronalaženje analitičke veze, koja bi kvalitativno iskazala uticaj prečnika sedišta ventila D_s i hoda vretena ventila h na koeficijent otpora ventila. U tom smislu bilo je potrebno izvršiti eksperimentalna istraživanja. Eksperiment se sastoji u tome da se za četiri geometrijski slična ventila nazivnog prečnika 13 mm pri $n_{Ds} = 4$ nivoa prečnika sedišta ventila i $n_h = 3$ nivoa hoda vretena ventila, meri otpor ventila (Δp) i dinamički pritisak ($p_d = \rho v^2/2$), odnosno protok vode (Q) kroz ventil. Merenja su obavljena na instalaciji prikazanoj na slici 2, saglasno VD/VDE2173 i DIN1952. Otpor ventila meren je živinim diferencijalnim manometrom (6), a protok Venturijevom cevi. Na osnovu izmerenih podataka za otpor ventila (Δp) i protoka vode kroz ventil (Q), po jednačini (4) računate su odgovarajuće vrednosti za koeficijente otpora (ξ_v) ventila.

4. Rezultati eksperimentalnih istraživanja

Sređeni rezultati merenja koeficijenata otpora ventila ξ_v nazivnog prečnika 13 mm, prečnika sedišta ventila D_s od 11; 13; 15 i 18 mm, pri hodu vretena ventila od 1,50; 3,0 i 6,50 mm nalaze se u tabeli 1.

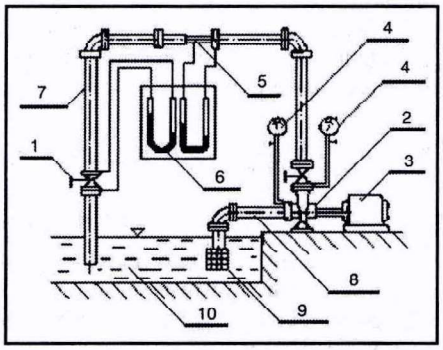
5. Metod definisanja analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila

U opštem slučaju, koeficijent otpora sličnih ventila ξ_i, za razmatrani nivo istraživanja, funkcija je dva parametra i može da se napiše u obliku [7–12]:

$$\xi_i = A D_s^{\,a} h^b \qquad (6)$$

Analitički izraz koeficijenta otpora sličnih ventila ξ_v, u zavisnosti od parametara (D_s, h) nalaze se regresionom analizom, metodom najmanjih kvadrata, na osnovu eksperimentalnih rezultata za ξ_i.

Ako se jednačina (6) logaritmuje, uvedu smene, u obzir uzme greška ε eksperimenta, dobija se jednačina linearne regresije, oblika:



Slika 2. Instalacija za merenje otpora ventila; 1 – ventil, 2 – pumpa, 3 – elektromotor, 4 – manometar, 5 – Venturijeva cev, 6 – živin manometar, 7 – potisni cevovod, 8 – usisni cevovod, 9 – rešetka, 10 – rezervoar sa vodom

$$Y_i = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \varepsilon \tag{7}$$

Određivanje konstanti (a_0, a_1, a_2) vrši se obradom eksperimentalnih rezultata, metodom najmanjih kvadrata [7–21]. Metoda se sastoji u minimiziranju odstupanja eksperimentalnih rezultata od regresionog polinoma:

$$|\varepsilon (Y_i - a_0 - a_1 X_{1i} - a_2 X_{2i}|_{\min} = (\varepsilon^2)_{\min} \tag{8}$$

Minimalna odstupanja nalaze se diferenciranjem polinoma (9) po traženim parametrima i izjednačavanjem izvoda sa nulom. Nakon sređivanja dobija se sistem jednačina linearne regresije prikazan u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} N & \Sigma X_{1i} & \Sigma X_{2i} \\ \Sigma X_{1i} & \Sigma X_{1i}^2 & \Sigma X_{2i} X_{1i} \\ \Sigma X_{2i} & \Sigma X_{1i} X_{2i} & \Sigma X_{2i}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B(0) \\ B(1) \\ B(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma Y_i \\ \Sigma X_{1i} Y_i \\ \Sigma X_{2i} Y_i \end{bmatrix} \tag{9}$$

Posle obrade eksperimentalnih podataka sređenih prema tabeli 1, rešenja sistema jednačina, dobija se analitički izraz koeficijenta otpora ventila:

$$\xi_i = AD_{s1}{}^{e1} h_2{}^{e2} \tag{10}$$

Potrebno je izvršiti proveru adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila.

6. Metod provere adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila

Provera adekvatnosti analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila izvodi se na osnovu numeričkih iznosa koeficijenata višestruke korelacije R_{i12} i koeficijenata parcijalne korelacije r_{i12} i r_{i21} funkcionalne zavisnosti (11) koje je potrebno analitički definisati.

Za potrebe definisanja koeficijenata parcijalne i koeficijenta višestruke korelacije funkcionalne veze oblika $\xi_i = AD_{s1}{}^a h_2{}^b$ uvedeni su indeksi: prečniku sedišta ventila D_s dodeljen je indeks „1", hodu vretena ventila h indeks „2":

$$\xi_i = AD_{s1}{}^a h_2{}^b \tag{11}$$

6.1. Koeficijent višestruke korelacije R_{i12} funkcionalne veze, oblika $\xi_i = AD_{s1}{}^a h_2{}^b$

Koeficijent višestruke korelacije R_{i12} definiše nivo saglasnosti između dobijenog modela koeficijenta otpora ventila (11) i rezultata eksperimenta. Koeficijent višestruke korelacije R_{i12} izražen pomoću koeficijenata parcijalne korelacije definiše se izrazom [10]:

$$R_{i21} = \sqrt{1 - [(1 - r_{i1}^2)(1 - r_{i21}^2)]} \tag{12}$$

Koeficijente parcijalne korelacije koji figurišu u izrazu (13) potrebno je analitički definisati.

6.1.1. Koeficijent parcijalne korelacije r_{i21}

Koeficijent parcijalne korelacije r_{i21} definiše korelaciju između zavisno promenljive ξ_i i nezavisno promenljive h pri D_s = const. Koeficijent parcijalne korelacije r_{i21} funkcionalne veze (11) definiše i verovatnoću prevođenja trodimenzionalnog modela (11) u model u ravni $\xi_i h$, pri D_s = const.Koeficijent parcijalne korelacije r_{i21} definiše se analitičkim izrazom [14]:

$$r_{i2\cdot1} = \frac{r_{i2} - r_{i1} \cdot r_{21}}{\sqrt{(1-r_{i1}^2)(1-r_{21}^2)}} \tag{13}$$

6.1.2. Koeficijenti parcijalne korelacije r_{i1}, r_{i2} i r_{12}

Koeficijenti parcijalne korelacije r_{i1} i r_{i2} definišu korelaciju između zavisno promenljive ξ_i i nezavisno promenljivih D_s i h. Koeficijenti parcijalne korelacije r_{i1} i r_{i2} definišu se analitičkim izrazima [10, 15]:

$$r_{i1} = \frac{\Sigma Y_i X_{1i}}{\sqrt{(\Sigma X_{1i}^2)(\Sigma Y_i^2)}} = \frac{B(1)}{\sqrt{X(1,1)C(0)}} \tag{14}$$

$$r_{i2} = \frac{\Sigma Y_i X_{2i}}{\sqrt{(\Sigma X_{2i}^2)(\Sigma Y_i^2)}} = \frac{B(2)}{\sqrt{X(2,2)C(0)}} \tag{15}$$

Koeficijent parcijalne korelacije r_{12} definiše korelaciju između nezavisno promenljivih D_s i h, definiše se analitičkim izrazom [10 i 15]:

$$r_{12} \equiv r_{21} = \frac{\Sigma X_{1i} X_{2i}}{\sqrt{(\Sigma X_{1i}^2)(\Sigma X_{2i}^2)}} = \frac{X(1,2)}{\sqrt{X(1,1)X(2,2)}} \tag{16}$$

6.2. Koeficijent parcijalne korelacije r_{i12}

Koeficijent parcijalne korelacije r_{i12} definiše korelaciju između zavisno promenljive ξ_i i nezavisno promenljive D_s pri h = const. Koeficijent parcijalne korelacije r_{i12} funkcionalne veze (11) definiše i verovatnoću prevođenja trodimenzionalnog modela (11) u model u ravni $\xi_i D_s$, pri h = const. Koeficijent parcijalne korelacije r_{i12} definiše se izrazom [10]:

$$r_{i1\cdot2} = \frac{r_{i1} - r_{i2} \cdot r_{12}}{\sqrt{(1-r_{i1}^2)(1-r_{12}^2)}} \tag{17}$$

7. Analitički izraz koeficijenta otpora ventila

Za funkcionalnu vezu, oblika $\xi_i = AD_{s1}{}^a h_2{}^b$, na osnovu eksperimentalnih rezultata otpora ventila za regulaciju protoka vode, navedenih u tabeli 1, pomoću programa „KNEZ-I" [10], nađeni su analitički izraz koeficijenta otpora ventila ξ_v i nume-

rički iznosi koeficijenata parcijalne korelacije i koeficijenta višestruke korelacije za ocenu saglasnosti dobijenog analitičkog izraza sa eksperimentalnim podacima. Analitički izraz koeficijenta otpora ventila ima oblik:

$$\xi_v = 340872{,}87\, D_s^{-2{,}2685}\, h^{-2{,}46736} \tag{18}$$

koji verovatnoćom 98%, (odnosno 85,50% u ravni $h\xi_i$ pri D_s = const. i 96,50% u ravni $D_s\xi_i$ pri h = const.) korelira eksperimentalne podatke za ξ_i, date u tabeli 1, pri čemu su koeficijenti parcijalne korelacije i koeficijent višestruke korelacije:

$r_{i1} = 0{,}922$; $r_{i2} = 0{,}642$; $r_{12} = r_{21} = 0{,}8721$;
$r_{i21} = 0{,}855$; $r_{i12} = 0{,}965$ i $R_{i12} = 0{,}980$.

7.1. Provera adekvatnosti dobijenog modela

Provera adekvatnosti dobijenog modela koeficijenta otpora ventila izvedena je na osnovu numeričkog iznosa koeficijenta višestruke korelacije R_{i12} i numeričkih iznosa koeficijenata parcijalne korelacije r_{i21} i r_{i12}. Analitički izraz koeficijenta otpora ventila (19) adekvatan je verovatnoćom od 98%.

8. Analitički izraz otpora ventila u funkciji protoka vode kroz ventile

Ako se u opšti izraz koeficijenta otpora ventila (4) uvrsti protok Q [m^3/h], dobija se jednačina oblika:

$$\xi_v = 3600^2\, \pi^2 d^4\, \Delta p \,/\, 8\, \rho Q^2 \tag{19}$$

Rešenjem jednačine (20) po Δp dobija se opšti oblik analitičkog izraza otpora ventila:

$$\Delta p = 8\, \rho\, \xi_v\, Q^2 \,/\, \pi^2 d^4\, 3600^2 \tag{20}$$

Koeficijent otpora ventila definisan je jednačinom (19). Problem regulacije protoka vode kroz ventil definisan je jednačinama (20) i (21). Kombinacijom izraza (20) i (21), rešenjem dobijenog izraza po Δp, dobija se izraz otpora ventila, oblika:

$$\Delta p = 622046{,}74\, D_s^{-2{,}2685}\, h^{-2{,}46736}\, Q^2 \tag{21}$$

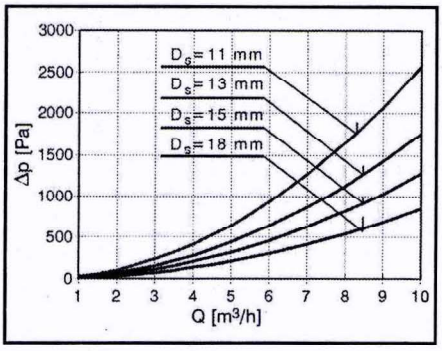
Analitički izraz otpora sličnih ventila pri maksimalnom hodu vretena ventila h = 6,60 mm, ima oblik:

$$\Delta p = 5911{,}709\, D_s^{-2{,}2685}\, Q^2 \tag{22}$$

Grafički prikaz analitičkog izraza (22) nalazi se na slici 3.

9. Zaključak

Definisane su metode modeliranja koeficijenta otpora ventila sa ravnim sedištem vretena ventila za regulaciju protoka vode, ocene saglasnosti modela $\xi_i = AD_{s1}{}^a\, h_2{}^b$ i eksperimentalnih rezultata istraživanja. Definisani su analitički izrazi karakterističnih



Slika 3. Zavisnost otpora ventila od protoka Q vode pri maksimalnom hodu vretena ventila h = 6,60 mm

koeficijenata parcijalne korelacije i koeficijent višestruke korelacije za kvalitativnu ocenu dobijenog modela.

Preko analitičkih izraza karakterističnih koeficijenata parcijalne korelacije r_{i12} i r_{i21}, na originalan način, definisane su verovatnoće uticaja karakterističnih veličina D_s i h sistema $\xi_i = AD_{s1}{}^a h_2{}^b$ na koeficijent otpora ventila. Definisana je opitna instalacija za merenje hidrauličkih otpora ventila.

Na osnovu regresione analize, metode najmanjih kvadrata, sistema normalnih jednačina, definisanih analitičkih izraza koeficijenata parcijalne korelacije i koeficijenta višestruke korelacije funkcionalne veze $\xi_i = AD_{s1}{}^a h_2{}^b$, izrađen je program za pronalaženje analitičkog izraza koeficijenta otpora ventila i kvalitativnu ocenu nivoa saglasnosti dobijenog modela sa eksperimentalno dobijenim podacima za ξ_i.

Primena izloženog algoritma prikazana je na primeru definisanja koeficijenta otpora ventila za regulaciju protoka vode, u zavisnosti od prečnika sedišta ventila i hoda vretena ventila. Definisani su analitički izrazi koeficijenta otpora ventila ξv i otpor ventila Δp na osnovu eksperimentalnih rezultata istraživanja. Problem regulacije protoka vode kroz ventil definisan je analitičkim izrazima koeficijenta otpora ventila i otpora ventila.

Na originalan način, definisane su verovatnoće prevođenja trodimenzionalnih modela, oblika $\xi_i = AD_{s1}{}^a h_2{}^b$ u modele u ravnima D_s ξ_i i h ξ_i pri h = const. i D_s = const.

Literatura

[1] **Šiljak, M.:** *Osnovi hidraulike podstanica malih snaga u sistemu daljinskog grejanja,* Klimatizacija, grejanje, hlađenje, Vol. XXVIII, broj 2–3, SMEITS, Beograd, 1999, str. 85–89.

[2] ***: *Klimatizacija, grejanje, hlađenje*, Vol. VIII, broj 2, SMEITS, Beograd, 1979.

[3] **Kraut, B.:** *Strojarski priručnik*, Tehnička knjiga, Zagreb, 1988.

[4] **Reknagel:** *Grejanje i klimatizacija*, Građevinska knjiga, Beograd, 1987.

[5] **Jeftović, V., M. Mikašinović:** *Priručnik o transportu fluida sa katalogom,* Privredni pregled, Beograd, 1971.

[6] **Wagner, W.:** *Stromung und Druckverlust, Vogel Buchverlag,* Würzburg, 1997.

[7] **Knežević, D.:** *Metod analitičkog definisanja otpora sličnih pneumatičkih ventila,* Naučno-tehnički pregled, Vol. XLIX, 1999, br. 2.

[8] **Knežević, D.:** *Metode matematičkog modeliranja ventila specijalne namene i analitičke ocene modela*, 28. međunarodni kongres o grejanju, hlađenju i klimatizaciji, zbornik radova, SMEITS, Beograd, 1997, str. 121–127.

[9] **Knežević, D., Z. Bjelogrlić, V. Knežević:** *Pronalaženje analitičkih izraza za koeficijent otpora ventila specijalne namene*, Procesna tehnika, br. 4, SMEITS, Beograd, 1998, str. 31–33.

[10] **Knežević, D.:** *Prilog analitičkom definisanju pneumatičkih karakteristika sistema ventila specijalne namene,* doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1994.
[11] **Pantelić, I.:** *Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta*, Radnički univerzitet „Radivoj Ćirpanov", Novi Sad, 1986.
[12] **Knežević, D.:** *Analitički metod definisanja vremena zatvaranja sličnih ventila usled dejstva impulsa pritiska vazdušno udarnih talasa*, Naučno-tehnički pregled, Vol. XLIX, 1999, br. 3.
[13] **Nenadović, M.:** *Metode optimizacije sistema,* SANU, Beograd, 1980.
[14] **Nenadović, M.:** *Matematička obrada podataka dobijenih merenjem*, SANU, posebno izdanje, knjiga DLXXII, Odeljenje tehničkih nauka, Beograd, 1988.
[15] **Vukadinović, S.:** *Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike,* drugo izmenjeno izdanje, Privredni pregled, Beograd, 1978.
[16] **Andonović, J.:** *Osnovi računa verovatnoće i teorije najmanjih kvadrata*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
[17] **Ferguson, S.:** *Mathematical statistics*, New York, 1967.
[18] **Freund, J. E.:** *Mathematical statistics,* New York, 1971.
[19] **Ivanović, B.:** *Teorijska statistika*, Naučna knjiga, Beograd, 1973.
[20] **Ivković, Z.:** *Matematička statistika,* Naučna knjiga, Beograd, 1980.
[21] **Duduković, B., Đ. Milosavljević:** *Planiranje eksperimenta i optimizacija procesa,* IHTM Centar za tehnoekonomiku i programiranje, Beograd, 1976.