

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Vodarstvo in
komunalno inženirstvo

Kandidat:

Miha Ulčar

Meritve na vodovodnih sistemih in ocena merilne negotovosti

Diplomska naloga št.: 50

Mentor:

prof. dr. Franc Steinman

Somentor:

doc. dr. Primož Banovec

Ljubljana, 27. 1. 2006

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji smeri Vodarstva in komunalnega inženirstva UL, FGG:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	531.7:628.1(043.2)
Avtor:	Miha Ulčar
Mentor:	Prof. dr. Franci Steinman
Somentor	Doc. dr. Primož Banovec
Naslov:	Meritve na vodovodnih sistemih in ocena merilne negotovosti
Obseg in oprema:	89 str., 12 preg., 32 sl., 8 graf., 7 pril., 58 en.
Ključne besede:	meritve, vodovodni sistem, merilna negotovost, merilne naprave, standard ISO -5168,

Izveček:

Cilj naloge je bila analiza merilnega sistema na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod za pridobitev podatkov o delovanju, o požarni varnosti in linijskih izgubah v sistemu. Obravnavana je tudi problematika reducirnih zasunov in postopki iskanja lokacij puščanja z akustičnimi instrumenti. Merilna negotovost, definirana z območjem vrednosti, v katerem naj bi se dejanska vrednost izmerjene količine nahajala, je bila določena po standardu ISO-5168, ki določa postopke za izračun negotovosti pri meritvah pretoka tekočin. Podrobneje so opisani principi delovanja merilnih naprav za merjenje tlaka in pretoka, ki jih pri meritvah uporablja Služba vzdrževanja omrežja javnega podjetja VO-KA. Opravljene so bile meritve tlaka na šestih točkah in meritve pretoka na treh točkah vodovodnega sistema Ljubljana-Brod. Rezultati meritev pretoka so pokazali veliko občutljivost merilnikov pretoka na pogosto neznane vhodne podatke o dejanskih, hidravličnih dimenzijah cevovoda, kar je lahko vzrok za neuspelo meritev. Meritve tlaka so bile uspešno izvedene in so potrdile pričakovanja o varnosti delovanja. V zaključku naloge so podane izboljšave obstoječega načina merjenja in predlog rešitve ugotovljenega problema reducirnega zasuna.

BIBLIGRAPHIC-DOKUMENTALISTIC INFORMATION

UDK:	531.7:628.1(043.2)
Author	Miha Ulčar
Supervisor	Prof. dr. Franci Steinman
Co-Supervisor	Doc. dr. Primož Banovec
Title	Measurements on water supply systems and evaluation of uncertainties
Obseg in oprema:	89 p., 12 tab., 32 fig., 8 gr., 7 add., 58 eq.
Ključne besede:	measurements, water supply system, evaluation of uncertainties, measurement instruments, standard ISO-5168

Abstract:

The aim of the project was to analyze a measuring system for the Ljubljana-Brod water supply system that would provide data about operation, fire safety, and head losses in the system. Problems associated with reduction valves and procedures used to find water-pipe leakage with acoustic instrumentation is also described. Uncertainty of measurement, defined by the interval of values, within the true value of data has been calculated in accordance with the ISO-5168 standard, which defines the procedures for the evaluation of uncertainties in measurement of fluid flow. The basic principles of operation with pressure and flow instruments used in the maintenance of the water supply system by the public company VO-KA are also described in the project. Measurement of pressure was made at six points in the system, while measurement of flow was made at three points in the system. The results of the measurement showed the large sensitivity of flow meters in relation to input data that caused a measurement failure. Measurements of flow were made successfully and confirmed the predicted results. In conclusion, some proposals for improvement of the measuring system and reduction valves are given.

ZAHVALA

Hvala mentorju prof. dr. Franciju Steinmanu in somentorju dr. Primožu Banovcu za strokovno pomoč in vzpodbudo pri nastajanju diplomske naloge.

Hvala Javnemu podjetju Vodovod-Kanalizacija Ljubljana za štipendijo in kolektivu Službe za vzdrževanje vodovodnih omrežij za pozitivno vzdušje, v katerem je nastajala diplomska naloga.

Zahvalil bi se tudi staršema, ki sta mi skozi vsa leta študija stala ob strani in me spodbujala.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Namen naloge	2
1.2	Osnovne definicije	2
2	MERITVE NA VODOVODNIH SISTEMIH	3
2.1	Merilna tehnika	3
2.1.1	Merilni standardi	4
2.1.2	Meritve pretoka tekočin - postopki za oceno merilne negotovosti po ISO-5168	5
2.1.2.1	Ocene negotovosti tipa A	7
2.1.2.2	Ocena napake tipa B	15
2.1.2.3	Koeficienti občutljivosti	18
2.1.2.4	Kombiniranje negotovosti	20
2.1.3	Merilniki tlaka	20
2.1.3.1	Vrste odjemnikov delujočih na principu tlaka	23
2.1.3.2	Negotovost pri delovanju odjemnikov	24
2.1.3.3	Osnovni nekompenzacijski odjemniki	25
2.1.3.4	Kompenzacija temperature	26
2.1.3.5	Umerjeni in temperaturno kompenzirani tlačni odjemniki	27
2.1.3.6	Vmesniki med odjemniki tlaka in mikroprocesorji	28
2.1.4	Ultrazvočni merilniki pretoka	29
2.2	Reducirni ventili	34
2.3	Meritve in modeliranje	38
2.4	Meritve na cevovodih	40
2.4.1	Meritve tlaka	40
2.4.2	Meritve pretoka	41
2.4.3	Preizkušanje hidrantnih omrežij s posebnimi testi	41
2.4.3.1	Test hidravličnih izgub	42
2.4.3.2	Požarni test	46
2.5	Iskanje lomov cevi	49
3	OBMOČJE VS LJUBLJANA-BROD	53
3.1	Opis vodovodnega sistema Ljubljana Brod	53
3.2	Merilna oprema JP VO-KA	54
3.2.1	Merilnik pretoka –Krohne – UFM 610 P	54
3.2.2	Merilnik tlaka Memmy NT	57
3.2.3	Naprava za lokalno odkrivanje šuma Sewerin-AQUAPHON	58
3.3	Reducirni ventil Hawle 1500	60

4	OBDELAVE IN ANALIZE MERITEV	62
4.1	Meritve	62
4.1.1	Zasnova meritev	62
4.1.2	Meritve za analize izmerjenih vrednosti tlaka in pretoka	63
4.1.2.1	Meritev pretoka na VS Ljubljana-Brod	64
4.1.2.2	Meritev tlaka na VS Ljubljana-Brod	65
4.1.2.3	Tridnevna meritev tlaka na VS Ljubljana-Brod	66
4.2	Ocene negotovosti meritev	67
4.2.1	Ocena negotovosti meritev pretoka	67
4.2.2	Ocena negotovosti meritve tlaka – tridnevna meritev tlaka	68
4.2.3	Ocena negotovosti meritve tlaka – test hidravličnih izgub	68
4.2.4	Ocena negotovosti meritve tlaka – Test požarne varnosti	70
4.3	Ugotovitve o sistemu	71
5	ZAKLJUČEK	73
6	VIRI	76

KAZALO SLIK

Slika 1:	Most s štirimi elementi, uporabljen v pizorezistivnemu tlačnemu odjemniku.	21
Slika 2:	Odjemnikom podoben tokokrog, Motorola MPX 2100	22
Slika 3:	Različne meritve tlakov	23
Slika 4:	Značilne krivulje napak tlačnih odjemnikov	24
Slika 5:	Zgradba električnega vezja odjemnika tovarne Motorola – serije MPX	25
Slika 6:	Shematski diagram merilnika tlaka - Motorola serija MPX 700	26
Slika 7:	Diagram odjemnika in kompenzacijska upornika	28
Slika 8:	Osnovni diagram vmesnika med odjemnikom in mikroprocesorjem	29
Slika 9:	Dopplerjev merilec pretoka	30
Slika 10:	Merilec delujoč na principu dveh oddajnikov in sprejemnikov	32
Slika 11:	Korelacijski ultrazvočni merilec hitrosti tekočine	34
Slika 12:	Reducirni zasun	35
Slika 13:	Vzdrževalni zasun	35
Slika 14:	Dva reducirna zasuna postavljena zaporedno	36
Slika 15:	Dva reducirna zasuna postavljena vzporedno	36
Slika 16:	Test hidravličnih izgub z dvema merilnikoma tlaka	43
Slika 17:	Osamitev merjenega odseka s stranskimi zasuni	45
Slika 18:	Požarni test	48
Slika 19:	Iskanje loma z instrumentom	50
Slika 20:	Točkovni lovilec šuma	51
Slika 21:	Shematski prikaz odkrivanja napak s pomočjo korelacije	51
Slika 22:	Merilnik pretoka Krohne-UFM 610 P	55
Slika 23:	Osnovna oprema merilnika pretoka Krohne UFM 610 P	55
Slika 24:	Priklop merilnika in smer pretoka medija	55
Slika 25:	Merilnik tlaka Memmy NT	57
Slika 26:	Merilnik postavljen na hidrant	57
Slika 27:	Sestavni deli naprave za odkrivanje šuma Sewerin- AUQAPHON	58
Slika 28:	AQUAPHON-ELW- zaslon in pomen vrednosti	59
Slika 29:	Zaznavanje šumov iztekajoče vode s napravo odkrivanje šuma AUQAPHON	60
Slika 30:	Reducirni zasun Hawle 1500	61
Slika 31:	Merilci pretoka in tlaka na območju meritev	62
Slika 32:	Meritve v reducirni postaji	63

KAZALO TABEL:

Tabela 1:	Tolerančni intervali vrednosti kt	13
Tabela 2:	Grubbsov test ekstremnih vrednosti	14
Tabela 3:	Način izračuna koeficienta občutljivosti	19
Tabela 4:	Primerjava med vzporedno in zaporedno vezanima zasunoma	37
Tabela 5:	Tehnični podatki o VS Ljubljana-Brod	54
Tabela 6:	Dimenzije lovilca nesnag	61
Tabela 7:	Seznam, namen in lokacije meritev	67
Tabela 8:	Ocena negotovosti meritve pretoka	67
Tabela 9:	Ocena negotovosti meritve tlaka - tridnevna meritev	68
Tabela 10:	Ocena negotovosti meritve tlaka – test hidravličnih izgub	69
Tabela 11:	Ocena negotovosti meritve tlaka – test požarne varnosti	70
Tabela 12:	Merilni list	71

KAZALO GRAFIKONOV:

Graf 1:	Negotovost meritve v odvisnosti od števila meritev	7
Graf 2:	Pravokotna verjetnostna porazdelitev	15
Graf 3:	Normalna verjetnostna porazdelitev	16
Graf 4:	Trikotna verjetnostna porazdelitev	17
Graf 5:	Nesimetrična verjetnostna porazdelitev	18
Graf 6:	Meritev pretoka	64
Graf 7:	Meritev tlaka	65
Graf 8:	Tridnevna meritev tlaka	66

PRILOGE

PRILOGA A: Slovar osnovnih pojmov v standardu ISO-5168

PRILOGA B: Količina vode, ki je predpisana za gašenje požarov v naseljih po Pravilniku o požarni varnosti

PRILOGA C: Situacija-Vodovodni sistem Ljubljana-Brod

PRILOGA D: Slika lovilca nesnag tipa 030-031, proizvajalca IMP

PRILOGA E: Shematski prikaz meritve tlaka za izvedbo požarnega testa

PRILOGA F: Primer izpisa iz merilca tlaka za določanje požarne varnosti

PRILOGA G: Lokacije merilnih jaškov na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod

PRILOGA H: Primer izračuna merilne negotovosti izpisa iz merilca tlaka za določanje požarne varnosti

1 UVOD

Urejena oskrba s pitno vodo je eden najpomembnejših pogojev za kakovostno in urejeno življenje v vsaki urbani sredini. Značilnost vodovodnih sistemov je, da so vgrajeni v prostor in imajo zato dokaj konzervativni značaj, ker se njihov proces delovanja spreminja zelo počasi. Vodovodne sisteme sestavljajo objekti in naprave za zbiranje, črpanje, obdelavo in transport vode, od vira do končnega uporabnika. Pri tem je pomembna stalna oskrba uporabnikov z ustrežno količino in kakovostjo vode, pod primernim tlakom. Zato je izjemno pomembna stalna distribucijskega omrežja, pri čemer se uporablja sodobne metode in opremo za izvajanje različnih meritev na vodovodnih sistemih.

Meritve na vodovodnih sistemih podajo pomembne podatke o delovanju samega sistema. Natančna in zanesljiva meritev je odvisna od instrumenta, uporabnika in matematične obdelave izmerjenih podatkov. Naloga uporabnika je pravilna uporaba instrumentov in interpretacija dobljenih rezultatov. Izbira prave opreme in njene ustrezne uporabe je odvisna od poznavanja postopkov merjenja in zmožnosti opreme. Na vodovodnih sistemih se merita tlak in pretok vode v ceveh. Za merjenje tlaka so najpopularnejši merilniki tlaka, ki delujejo na osnovi pizorezistivnega efekta, za merjenje pretoka pa se ponavadi uporablja ultrazvočne merilce pretoka.

Meritev je postopek, pri katerem primerjamo neznano količino s sprejeto standardno količino. Vse meritve so podvržene negotovosti, zaradi nenatančnosti instrumenta in človeške napake. Negotovost pomeni razliko med rezultatom meritve in resnično vrednostjo merjene količine. Čeprav negotovost vedno obstaja, pa njena natančna velikost ni znana. Kadarkoli je opravljena meritev pretoka tekočine, se pridobijo vrednosti, ki so najboljši približek dejanske vrednosti pretoka ali kake druge merjene količine. V praksi to pomeni, da ima dejanska količina malce višjo ali nižjo vrednost od izmerjene količine. Negotovost določa območje vrednosti v katerem naj bi bila prava vrednost izmerjene količine. Prvi korak pri oceni negotovosti je določitev postopka merjenja. Za meritev količin toka tekočine je ponavadi potrebno kombinirati vrednosti številnih vhodnih podatkov za pridobitev vrednosti izhodnih podatkov. Določitev procesa meritve mora vsebovati številčne vrednosti vhodnih podatkov. Postopek izračuna merilne negotovosti je podrobneje opredeljen v standardih.

1.1 Namen naloge

V nalogi bodo podrobneje predstavljeni postopki merjenja tlaka in pretoka na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod. Obravnavana bo problematika vodovodnega sistema pod različnimi pogoji delovanja in vloga meritev pri matematičnem modeliranju. Opisani bodo principi delovanja tlačnih odjemnikov in ultrazvočnih merilnikov pretoka, ki so bili uporabljeni pri meritvah. Na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod bo vzpostavljen merilni sistem za izvedbo testa požarne varnosti in linijskih izgub. Prav tako bo opravljena meritev pretoka v ceveh, katere naloga bo določitev vhodnih in izhodnih podatkov sistema. Namen meritev je pridobitev podatkov o delovanju in požarni varnosti vodovodnega sistema. Test požarne varnosti bo opravljen v skladu z veljavnim pravilnikom o požarni varnosti, ki je določen v uradnem listu (URL RS, št.22, 22.4.1995). Ocena merilne negotovosti bo izračunana po standardu ISO-5168. V zaključku naloge bo podan predlog izboljšav postopka meritev.

1.2 Osnovne definicije

Vodovodni sistem: Sistem cevi in objektov, ki zagotavljajo preskrbo s pitno vodo potrošnikom.

Merilni sistem: Komplet merilnih instrumentov in druge opreme, zbranih za izvedbo meritev.

Merilni standard: V znanosti in tehniki vsesplošno sprejet, napisan tehnični dokument.

ISO (International Organisation for Standardization): Mednarodna organizacija za standardizacijo je globalna mreža nacionalnih standardnih teles standardizacije, katerih delo priprave nacionalnih standardov opravljajo tehnični odbori teh teles.

Merilna negotovost: Parameter, povezan z rezultati meritev, ki določa razpršenost vrednosti merjene količine.

Merilna točnost: Ujemanje merilnega rezultata s dejansko vrednostjo merjene veličine.

2 MERITVE NA VODOVODNIH SISTEMIH

V tem poglavju so podrobneje opisani principi delovanja tlačnih odjemnikov, merilnikov pretoka in ocena merilne negotovosti po standardu ISO-5168, kateri obravnava merilno negotovost pri meritvah pretoka tekočin. Opisani so tudi obtežbeni primeri delovanja vodovodnega sistema in vrste testov za preizkus hidrantnega omrežja. Obravnavana je problematika reduciranih ventilov in postopek uporabe meritev na vodovodnih sistemih za matematično modeliranje.

2.1 Merilna tehnika

Natančna in zanesljiva meritev je odvisna od instrumenta, uporabnika in matematične obdelave izmerjenih podatkov. Naloga uporabnika je pravilna uporaba instrumentov in interpretacija dobljenih rezultatov. Izbira prave opreme in njene ustrezne uporabe je odvisna od poznavanja postopkov merjenja, zmožnosti in omejitev opreme.

Meritev je postopek, pri katerem primerjamo neznano količino s sprejeto standardno merjeno količino. Vse meritve so izvedene z negotovostjo zaradi nenatančnosti instrumenta in človeške napake. Negotovost pomeni razliko med rezultatom meritve in resnično vrednostjo merjene količine. Poznamo dve vrsti pogreškov, in sicer naključne in sistematčne. Sistematični pogrešek¹ je določen s srednjo vrednostjo, ki bi jo dobili iz neskončnega števila meritev iste merjene veličine, pod pogoji ponovljivosti, če odštejemo pravo vrednost merjene veličine. Tako kot prava vrednost, tudi sistematični pogrešek in vzroki zanj ne morejo biti v celoti poznani. Naključni pogrešek pa je definiran kot razlika merilnega rezultata in srednje vrednosti, ki bi bila pridobljena iz neskončnega števila meritev iste merjene veličine pod pogoji ponovljivosti. Ker lahko izvedemo le končno število meritev, je možno dati samo ocenjeni naključni pogrešek. Čeprav napaka vedno obstaja, pa njena natančna velikost ni znana. V 1990-tih se je vzpostavil standard ISO 9000, kot sredstvo za zagotovitev kvalitete in enotnosti postopkov v industriji in posledično v merilni tehniki.

¹ Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja (Predlog)

2.1.1 Merilni standardi

Vsi instrumenti so umerjeni v skladu s standardi veljavni v času njihove izdelave. Standarde razvrstimo v štiri kategorije:

1. Mednarodni standardi
2. Primarni standardi
3. Sekundarni standardi
4. Delovni standardi

Mednarodni standardi² so določeni z mednarodnim dogovorom. Standardi so kontrolirani periodično z absolutnimi meritvami. Predstavljajo določene postopke meritev z najboljšo možno natančnostjo, ki jo še dopuščajo znanost in tehnologija. Primarni standardi so vzdrževani v laboratorijih za standardizacijo posameznih držav in niso na voljo za uporabo zunaj teh laboratorijev, čeprav jih lahko uporabimo za umerjanje sekundarnih standardov, katere predhodno pošljemo v te laboratorije. Sekundarne standarde vzdržujemo v različnih laboratorijih v industriji. Njihova glavna vloga je preverjanje in umerjanje delovnih standardov. Umerjanje sekundarnih standardov opravljajo laboratoriji primarnih standardov.

Delovni standardi so osnovno orodje merilnih laboratorijev. Te standarde se uporablja za preverjanje in umerjanje instrumentov, uporabljenih v laboratorijih, ali pa za primerjave meritev z industrijo. Delovne standarde se nenehno kontrolira s sekundarnimi standardi. Standardi v elektrotehniko obstajajo za električni tok, upornost, kapacitivnost in napetost.

ISO (International Organisation for Standardization) je globalna mreža nacionalnih standardizacijskih teles. Delo priprave nacionalnih standardov opravljajo tehnični odbori teh teles. O pripravljenih standardih nato glasujejo vsa telesa, ki so člani ISO. Oznako mednarodni standard dobi vsak standard, ki je potrjen z vsaj 75% vseh glasov. Standard ISO-5168 določa postopke za oceno negotovosti izmerjene vrednosti toka tekočine.

² Kuralatna, 2003

2.1.2 Meritve pretoka tekočin - postopki za oceno merilne negotovosti po ISO-5168

Kadarkoli se opravi meritev pretoka tekočine, se pridobijo vrednosti, ki so najboljši približek dejanske vrednosti pretoka ali kake druge merjene količine. V praksi to pomeni, da ima dejanska količina malce višjo ali nižjo vrednost od izmerjene količine. Negotovost določa območje vrednosti v katerem naj bi bila prava vrednost izmerjene količine. Ocena negotovosti meritev, ki so bile opravljene na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod, bo izvedena v skladu s standardom ISO-5165: Meritve pretoka tekočin - postopki za oceno negotovosti, v nadaljevanju ISO-5168, sprejetim 16.06.2005, ki pa še ni privzet v slovenske standarde SIST. Standard je sestavljen iz desetih poglavij in enajstih prilog, v katerih nazorno predpisuje različne postopke ocene negotovosti, ki se v grobem delijo na dva dela, in sicer na oceno merilne negotovosti tipa A in oceno merilne negotovosti tipa B. Postopki izračuna obeh vrst ocene negotovosti so podani v nadaljevanju. Prednost standarda ISO-5168 je v poenotenju postopkov merilne negotovosti, saj različni viri navajajo različne postopke ocene. Tako je omogočena primerjava meritev. Slovar najpogosteje uporabljenih izrazov v standardu je podan v prilogi (A).

Prvi korak pri oceni negotovosti je določitev postopka merjenja, kjer je potrebno upoštevati, da je pri meritvah količin toka tekočine ponavadi potrebno kombinirati vrednosti številnih vhodnih podatkov za pridobitev vrednosti izhodnih podatkov. Določitev procesa meritve mora vsebovati številčne vrednosti vhodnih podatkov. Slovar najpogosteje uporabljenih izrazov je podan v prilogi (1). Viri napak se delijo na:

- Kalibracijska negotovost: Vsaka merilna naprava je lahko povzročitelj napake. Glavni razlog umerjanja naprave je zmanjšanje napake na zadovoljiv nivo.
- Negotovost pri pridobivanju podatkov: Negotovost pri sistemu pridobivanja podatkov se lahko pojavi pri signalu odjemnika, sistemu za shranjevanju podatkov naprave, itd.. Najboljši postopek za zmanjšanje vpliva tovrstnih napak je izvedba umerjanja celotnega sistema. Ocena negotovosti pri pridobivanju podatkov se lahko pridobi s primerjavo znanih vhodnih količin z njihovimi izmerjenimi količinami. V primeru, da

to ni mogoče, je potrebno oceniti vse posamezne negotovosti posebej in jih združiti. Tako se pridobi celotna negotovost sistema.

- Negotovost pri obdelavi podatkov: V tem primeru pride do napak pri uporabi eksperimentalno določenih enačb, pridobljenih pri umerjanju merilnih naprav. Večja količina meritev poda malce drugačno enačbo od manjše količine meritev. Zato ima vsak koeficient v enačbi določeno napako.
- Negotovost glede na metodo: Določena je z dodatnimi viri napak, ki nastanejo zaradi različnih načinov in metod uporabljenih v procesu merjenja. Ti viri napak vplivajo na merilno negotovost končnih podatkov. V modernih merilnih sistemih je ta vrsta napak veliko manjša od napake pri umerjanju naprave, napake pri pridobivanju podatkov in napake pri obdelavi podatkov.

Ta kategorizacija napak velja samo takrat, ko so upoštevani vsi viri negotovosti v postopku merjenja. Tovrstni postopek ocene negotovosti je primeren, če so viri napak medsebojno neodvisni kar pomeni, da napaka enega vira ne bo vplivala na napako drugega vira. V primeru medsebojne odvisnosti virov napak je potrebna drugačna obravnava, saj je v tem primeru potrebno ugotoviti povezanost oz. vpliv napak med viri. Če je funkcijsko razmerje med vhodnimi količinami X_1, X_2, \dots, X_n in izhodno količino Y v meritvah toka tekočine določeno z enačbo (1):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (1)$$

potem je pričakovana vrednost Y , označena z y , pridobljena iz enačbe (1) z uporabo pričakovanih vhodnih količin x_1, x_2, \dots, x_N določena z enačbo (2):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (2)$$

V primeru da so vhodni podatki X_i medsebojno neodvisni, je celotna napaka postopka določena z izračunom in združitvijo posameznih napak v enačbi (3)

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2}, \quad (3)$$

kjer je:

$u_c(y)$ = kombinirana relativna standardna negotovost v povezavi z izhodno pričakovano vrednostjo y ,

c_i = koeficient občutljivosti; izraža vpliv negotovosti vhodnega podatka na izhodno (izmerjeno) količino,

$u(x_i)$ = standardna negotovost podatka x_i ,

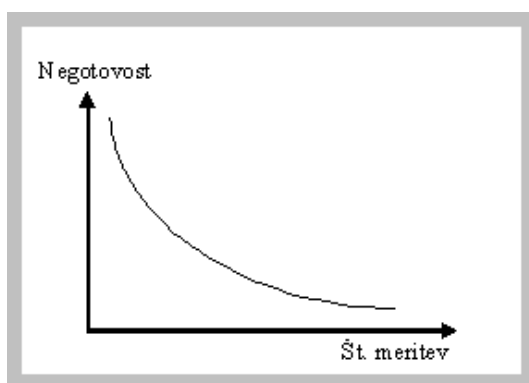
$n = n (i = 1 \dots n)$ = število niza podatkov

Vsaka od posameznih komponent negotovosti $u(x_i)$ je ocenjena z eno izmed sledečih metod:

- Ocena negotovosti tipa A: izračunana iz serije izmerjenih količin z uporabo statističnih metod.
- Ocena negotovosti tipa B: izračunana z uporabo metod, kot je inženirska presoja.

2.1.2.1 Ocene negotovosti tipa A

Ocene negotovosti tipa A uporabljajo statistične metode za obdelavo podatkov pri večji količini meritev. Negotovost meritve se progresivno zmanjšuje v odvisnosti od števila meritev (Graf 1):



Graf 1: Negotovost meritve v odvisnosti od števila meritev

V pogostih primerih merjenja ni praktično opravljati veliko število meritev. Zato se v teh primerih komponente negotovosti lahko določi na podlagi predhodnih ocen negotovosti tipa A, ki so bile dobljene iz večjega števila meritev, ki so potekale pod podobnimi pogoji (isti

merilni instrument, isto merilno mesto). Pri tem je potrebna določena mera previdnosti, saj vedno obstaja negotovost pri domnevi, da so predhodne meritve potekale pod resnično podobnimi pogoji. Na vodovodnem sistemu Ljubljana – Brod so bile opravljene krajše (1-4 urne) meritve tlaka in pretoka, s katerimi so bili pridobljeni številni podatki o delovanju sistema. Predhodno je bila opravljena tridnevna meritev tlaka na istem območju, ki je potekala pod podobnimi pogoji (isto merilno mesto in merilna naprava). Negotovost tridnevne meritve bo pripomogla k oceni negotovosti časovno krajših meritev. Ocena negotovosti meritev, opravljenih na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod bo potekala v skladu z oceno tipa A. V nadaljevanju so predstavljene osnovne statistične definicije, ki so uporabljene pri oceni negotovosti tipa A.

a) Srednja vrednost \bar{x}

Srednja vrednost vrste podatkov \bar{x} je definirana kot aritmetično povprečje vseh vrednosti v vzorcu meritev in je izražena z enačbo (4):

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_m, \quad (4)$$

kjer je:

x_m = m-ta vrednost v vzorcu,

n = število vrednosti v vzorcu.

b) Eksperimentalni standardni odmik (standardna deviacija), s , vrste podatkov

V vsakem vzorcu eksperimentalnih podatkov je vedno prisoten tudi njihov raztros podatkov. Eksperimentalni standardni odmik za niz n meritev iste merjene količine s , ki označuje raztros podatkov, je določen z enačbo (5):

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{m=1}^n (x_m - \bar{x})^2} \quad (5)$$

Včasih je uporabno izraziti raztros podatkov kot delež srednje vrednosti. To se lahko opravi z uporabo koeficienta raztrosa C_V , definiranega v enačbi (6):

$$C_v = \frac{s}{x} \quad (6)$$

c) Stopnja svobode ν , v povezavi z raztrosom vzorca ali standardnim odklonom

Stopnja svobode ν , je število neodvisnih meritev pod določenimi omejitvami. Ko se računa standardni odklon je omejitev ta, da mora biti vsota odklonov enaka nič (tj. odklonov od srednje vrednosti). Tako ima lahko prvih $n-1$ odklonov poljubno vrednost, vendar pa mora biti zadnja vrednost taka, da je vsota odklonov enaka nič. Če je $n-1$ neodvisnih meritev, potem je $n-1$ stopenj svobode.

d) Standardna negotovost $u_{\bar{x}}$ srednje vrednosti vzorca, ki temelji na standardnem odmiku vzorca

Srednja vrednost \bar{x} vzorca podatkov predstavlja zgolj približek srednje vrednosti celotne populacije. V primeru, ko je vzet drug vzorec iz iste populacije, je izračunan drugačen približek srednje vrednosti. Večji kot je raztros podatkov, manjša je natančnost srednje vrednosti in več meritev poda natančnejšo srednjo vrednost. Meritev negotovosti vzorca podatkov se imenuje standardna negotovost ki je definirana z enačbo (7):

$$u_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

e) Standardna negotovost $u_{\bar{x}}$ vzorca podatkov glede na standardni odmik, ki je bil pridobljen na preteklih izkušnjah

Pogosto se zgodi, da je na voljo manjši vzorec podatkov in da obstajajo informacije o raztrosu podatkov iz preteklih izkušenj, ko je bil obdelan večji vzorec podatkov. V tem primeru je dovoljeno povezati standardno negotovost srednje vrednosti manjšega vzorca podatkov s standardno negotovostjo s_{pe} večjega vzorca podatkov. Srednja vrednost \bar{x} in število meritev n se izračunata za manjši vzorec podatkov, izračun stopnje svobode ν pa se vzame iz vzorca z večjim številom podatkov. Tako je nova standardna negotovost $u_{\bar{x}}$ izračunana po enačbi (8):

$$u_{\bar{x}} = \frac{s_{pe}}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

f) Standardna negotovost u_{sm} , posamezne vrednosti glede na pretekle izkušnje

Uporaba standardnega odmika, pridobljenega iz preteklih podatkov omogoča, da je ocenjena negotovost, za eno samo meritev. Ta ocena se uporabi, ko ni mogoče ponavljati meritve. V tem primeru srednja vrednost \bar{x} postane sama meritev in število meritev $n = 1$. Stopnja svobode je ponovno vezana na zunanji standardni odmik s_p . tako je standardna negotovost u_{sm} določena z enačbo (9):

$$u_{sm} = s_{pe} \quad (9)$$

Primerjava enačb (9) in (10)³ pokaže, da je bolje, če je le mogoče, pridobiti srednjo vrednost iz dveh ali več meritev, saj je standardna negotovost pri eni meritvi za 41%⁴ večja od tiste, kjer je bila srednja vrednosti pridobljene pri dveh meritvah. Pri treh meritvah pa je standardna negotovost ene meritve za 73% večje od tiste, ki je bila izračunana za tri meritve. Kadarkoli je možno je potrebno upoštevati srednjo vrednost izračunano pri več meritvah in ne tiste, ki je bila pridobljena z eno samo meritvijo.

g) Združen standardni odmik s_{po} iz več nizov podatkov

Podatki iz preteklih meritev ne tvorijo vedno kontinuiran niz podatkov, saj so bili lahko pridobljeni v različnem času pod različnimi pogoji. V primeru, ko razlike med različni pogoji, v katerih so bile opravljene meritve, niso vplivale na variabilnost podatkov, se lahko združi podatke iz različnih nizov in določi združen standardni odmik z veliko več stopnjami svobode.

Pomembno je upoštevati, da so bili združeni le standardni odmiki nizov podatkov in ne sami nizi podatkov. Združena je variabilnost nizov podatkov okoli njihove povprečne vrednosti z razlogom, da se pridobi boljši približek variabilnosti merilne tehnike.

³ Enačba (10) je podana v nadaljevanju

⁴ ISO-5168, 2005

Združeni standardni odmik s_{po} je definiran z enačbo (10):

$$s_{po} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m'} v_j s_j^2}{\sum_{j=1}^{m'} v_j}}, \quad (10)$$

kjer so:

- s_j = standardni odmik j-tega niza podatkov,
- v_j = stopnja svobode v povezavi z j-tim nizom podatkov,
- m' = število nizov podatkov, ki so bili združeni.

Standardna negotovost srednje vrednosti vzorca podatkov je izračunana z enačbo (11):

$$u_{\bar{x}} = \frac{s_{po}}{\sqrt{n}} \quad (11)$$

Standardna negotovost ene same vrednosti podatka pa je izračunana po enačbi (12):

$$u_{sm} = s_{po} \quad (12)$$

h) Stopnja svobode v_{po} v povezavi z združenim standardnim odkikom

Združen standardni odmik predstavlja boljši približek populacijskega standardnega odmika, kot standardni odmik, ki je bil pridobljen na enem samem podatku, ker je povezan z več stopnjami svobode. Kombinirana stopnja svobode se pridobi enostavno z dodajanjem stopenj svobode, ki so v povezavi z vsakim od pripadajočih standardnih odmikov v skladu z enačbo (13):

$$v_{po} = \sum_{j=1}^{m'} v_j \quad (13)$$

i) Razširjena negotovost $U_{\bar{x}}$ srednje vrednosti vzorca osnovana na standardnem odkiku vzorca

Standardna negotovost srednje vrednosti vzorca poda območje, v katerem naj bi bila dejanska srednja vrednost vzorca. Meje območja so pogosto nelinearne in obstaja velika verjetnost, da

leži prava srednja vrednost vzorca zunaj tega območja. Pri standardnem odmiku in pri z njim povezani standardni negotovosti, ki temelji na dveh stopnjah svobode je 42% možnost⁵, da dejanska srednja vrednost leži izven območja, določenega z standardno negotovostjo. Tudi pri stotih stopnjah svobode obstaja 32% verjetnosti, da dejanska srednja vrednost leži izven območja, določenega z standardno negotovostjo. Zato se razširi meje območja in s tem zagotovi večjo stopnjo zaupanja, da dejanska srednja vrednost leži v mejah tega območja. Meje območja se ponavadi izračuna za pridobitev 95% stopnje zaupanja. To se doseže z uvedbo faktorja obsega delovanja k v enačbo standardne negotovosti:

$$U_{\bar{x}} = k \cdot u_{\bar{x}} \quad (14)$$

Vrednost faktorja obsega delovanja je odvisna od stopnje svobode v povezavi s standardno negotovostjo v primeru, ko standardna negotovost temelji na standardnem odmiku vzorca podatkov.

j) Razširjena negotovost $U_{\bar{x}}$ srednje vrednosti vzorca osnovana na standardnem odmiku pridobljenim iz preteklih izkušenj

Enačba razširjene negotovosti je enako uporabna, ko je standardna negotovost pridobljena iz standardnega odmika osnovanega na preteklih izkušnjah iz enega ali kombinacije več nizov vzorcev. V tem primeru mora biti faktor obsega delovanja izbran za stopnje svobode pripadajoče standardnim odmikom iz preteklih izkušenj. Enačba za razširjeno negotovost je uporabna tudi v primeru enojne vrednosti ene same meritve. Tudi v tem primeru je potrebno izbrati faktor območja delovanja za stopnjo zaupanja v povezavi s standardnim odmikom, ki je bil uporabljen.

k) Interval tolerance za posamezno meritev

Razširjena negotovost srednje vrednosti definira za dano stopnjo zaupanja območje, v katerem naj bi ležala dejanska srednja vrednost merjene količine. Kljub temu bodo posamezne vrednosti ležale izven tega območja, zato je potrebno določiti mejo, v kateri bo ležal določen odstotek izmerjenih podatkov. Za standardni odmik te meje definira normalna porazdelitev.

⁵ ISO-5168, 2005

Pri majhnih vzorcih pa je sam standardni odmik podvržen negotovosti in zato morajo biti meje zaupanja postavljene na interval, ki vsebuje določen procent podatkov. Te meje določa interval tolerance, ki je definiran z enačbo (15):

$$\bar{x} \pm k_t s, \tag{15}$$

kjer so:

\bar{x} = srednja vrednost vzorca,

s = standardni odmik vzorca,

k_t = koeficient vzet iz tabele (1).

Tabela 1: Tolerančni intervali vrednosti k_t (ISO-5168, 2005, str. 28)

Velikost vzorca	Interval zaupanja					
	95%			99%		
	Odstotek vrednosti znotraj intervala			Odstotek vrednosti znotraj intervala		
	90%	95%	99%	90%	95%	99%
3	8,38	9,92	12,86	19,93	22,40	29,06
5	4,28	5,08	6,63	6,61	7,85	10,26
7	3,31	4,01	5,25	4,61	5,49	7,19
9	2,97	3,53	4,63	3,82	4,55	5,97
12	2,66	3,16	4,15	3,25	3,87	5,08
14	2,53	3,01	3,96	3,03	3,61	4,74
18	2,37	2,82	3,70	2,75	3,28	4,31
20	2,31	2,75	3,62	2,66	3,17	4,16
30	2,14	2,55	3,35	2,39	2,84	3,73
40	2,05	2,45	3,21	2,25	2,68	3,52
50	2,00	2,38	3,13	2,16	2,58	3,39

Vrednosti k_t iz table (1) so podane za različne velikosti vzorca in ne za stopnje svobode povezane s standardnim odkom in so oprte na predpostavko, da je bil vzorec vzet iz normalne ali Gaussove porazdelitve.

1) Odkrivanje vrednosti, ki ležijo zunaj intervala zaupanja

Ponavadi, ko se pridobi rezultate meritev, določene vrednosti izstopajo in so veliko večje ali manjše od ostalih vrednosti. Včasih imajo določene ekstremne vrednosti poznan vzrok, oziroma se ponavadi predpostavi, da so napačne. Ekstremna vrednost vpliva tako na srednjo vrednost kot tudi na standarden odmik vzorca. Ti dve vrednosti sta lahko dosti bolj reprezentativni za vzorec, če ekstremne vrednosti izločimo iz obdelave. Vendar pri tem vedno obstaja možnost izločitve pravilne vrednosti. Eden izmed testov za izločitev tovrstnih

vrednosti je Grubbsov test, ki primerja razdaljo med ekstremno vrednostjo in povprečno vrednostjo s standardnim odmikom celotnega niza podatkov. Če imamo niz podatkov (x_1, x_2, \dots, x_n) s srednjo vrednostjo \bar{x} , standardnim odmikom s in podatek, ki ima ekstremno vrednost x_m , potem je Grubbsov statistični test določen z enačbo (16):

$$Z_n = \frac{|x_m - \bar{x}|}{s} \quad (16)$$

Tabela 2: Grubbsov test ekstremnih vrednosti (ISO-5168, 2005, str. 29)

Število meritev	Stopnja zaupanja		Število meritev	Stopnja zaupanja	
	95%	99%		95%	99%
4	1,48	1,50	14	2,51	2,76
5	1,71	1,76	16	2,59	2,85
6	1,89	1,97	18	2,65	2,93
7	2,02	2,14	20	2,71	3,00
8	2,13	2,27	30	2,91	3,12
9	2,21	2,39	40	3,04	3,38
10	2,29	2,48	50	3,13	3,48
12	2,41	2,64	100	3,38	3,75

Vrednost Z_n se primerja z vrednostjo, podano v tabeli (2) za stopnjo zaupanja in število vzorcev. Če Z_n preseže tabelarično vrednost, je meritev x_m uvrščena med ekstremno vrednost z navedeno stopnjo zaupanja in se jo lahko izloči.

m) Postopek izračuna ocene negotovosti tipa A

Posamezne enačbe so podrobneje opisane v prejšnjih točkah. Standardna negotovost izmerjene količine x_i je izračunana iz vzorca meritev $x_{i,m}$ v skladu z enačbami (17) do (21):

1. Izračun srednje vrednosti izmerjenih količin z enačbo (17); glej tudi enačbo (4):

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_{i,m} \quad (17)$$

2. Izračun standardnega odmika vzorca z enačbo (18); glej tudi enačbo (5):

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{m=1}^n (x_{i,m} - \bar{x}_i)^2} \quad (18)$$

Standardna negotovost enega samega vzorca je enaka standardnemu odmiku in je podana v enačbi (19):

$$u(x_i) = s(x_i) \quad (19)$$

3. Izračun standardnega odmika srednje vrednosti z enačbo (20); glej tudi enačbo (7)

$$s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (20)$$

Standardna negotovost srednje vrednosti je podana z enačbo (21)

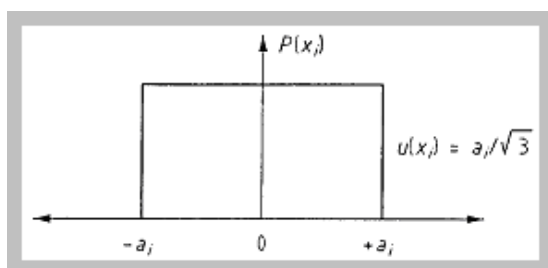
$$u(\bar{x}_i) = s(\bar{x}_i) \quad (21)$$

2.1.2.2 Ocena napake tipa B

Ocene napak tipa B so izpeljane iz postopkov, ki niso predmet statističnih analiz serije meritev. Pri oceni napake tipa B je potrebno zagotoviti podobno stopnjo zaupanja, da se lahko primerja in združi različne metode. Ocena napake tipa B zahteva poznavanje verjetnostnih porazdelitev v povezavi z negotovostjo, katere bodo podrobneje predstavljene v nadaljevanju.

a) Pravokotna verjetnostna porazdelitev

Tipični primeri pravokotne porazdelitve so na primer tolerančne meje proizvajalca merilne naprave. Napaka nastane zaradi omejene ločljivosti ekrana merilne naprave in določa maksimalno obdobje delovanja merilne naprave med dvema umerjanjema.



Graf 2: Pravokotna verjetnostna porazdelitev (ISO-5168, 2005, str.20)

Standardna negotovost izmerjene vrednosti x_i je izračunana iz enačbe (22) Območje merjenih vrednosti leži med $x_i - a_i$ in $x_i + a_i$:

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{3}}, \quad (22)$$

kjer je:

a_i = ocenjeno pol-območje dela negotovosti odvisno od vhodnega podatka x_i

b) Normalna verjetnostna porazdelitev

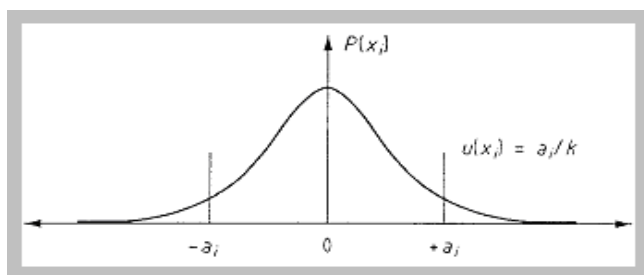
Tipičen primer normalne verjetnostne porazdelitve vsebujejo kalibracijski certifikati pri navajanju stopnje zaupanja ali faktorja območja zaupanja z razširjeno negotovostjo. Standardna negotovost je v tem primeru izračunana iz enačbe (23):

$$u(x_i) = \frac{U}{k}, \quad (23)$$

kjer je:

U = razširjena negotovost,

k = faktor območja zaupanja.

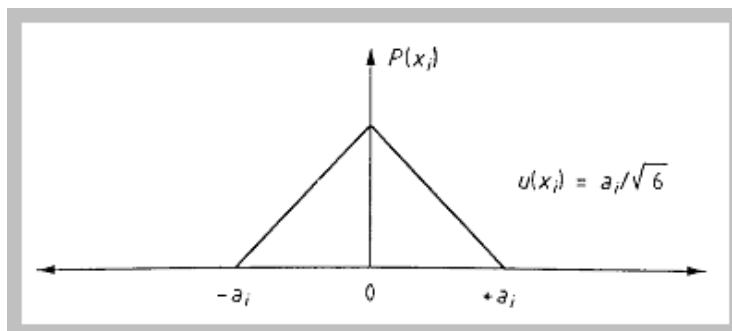


Graf 3: Normalna verjetnostna porazdelitev (ISO-5168, 2005, str.20)

V primeru, da je faktor območja zaupanja določen razširjeni porazdelitvi, je potrebno izbrati pravilno vrednost k . Pri 95% stopnji zaupanja je vrednost k enaka 2.

c) Trikotna verjetnostna porazdelitev

Nekatere negotovosti so podane kot maksimalne meje, v katerih naj bi ležale vse vrednosti merjene količine.



Graf 4: Trikotna verjetnostna porazdelitev (ISO-5168, 2005, str.20)

Vrednosti, ki so bližje mejam, so manj verjetne od tistih, ki so bližje sredini. V tem primeru bi bila predpostavka s pravokotno porazdelitvijo preveč pesimistična. Trikotna porazdelitev je kompromis med normalno in pravokotno porazdelitvijo. Standardna negotovost je določena z enačbo (24):

$$u(x_i) = \frac{a_i}{\sqrt{6}} \quad (24)$$

d) Bimodalna verjetnostna porazdelitev

Bimodalna verjetnostna porazdelitev je uporabna takrat, ko je napaka vedno ekstremna vrednost izmerjene količine. Primeri tovrstne porazdelitve so pri meritvah toka tekočin izjemno redki. Standardna negotovost je podana z enačbo (25):

$$u(x_i) = a_i \quad (25)$$

e) Nesimetrična verjetnostna porazdelitev

Zgoraj opisani primeri veljajo za simetrične porazdelitve. V določenih primerih zgornja in spodnja meja vhodne količine X_i nista simetrični glede na najboljši približek x_i . V primeru, ko ni znana informacija o porazdelitvi, je priporočljiva uporaba pravokotne verjetnostne porazdelitve s celotnim območjem, ki je podobno območju med zgornjo in spodnjo mejo.

Primer asimetrične porazdelitve je naraščajoče trenje v ležajih turbinskega merilnika hitrosti toka vode. Standardna negotovost je podana z enačbo (26):

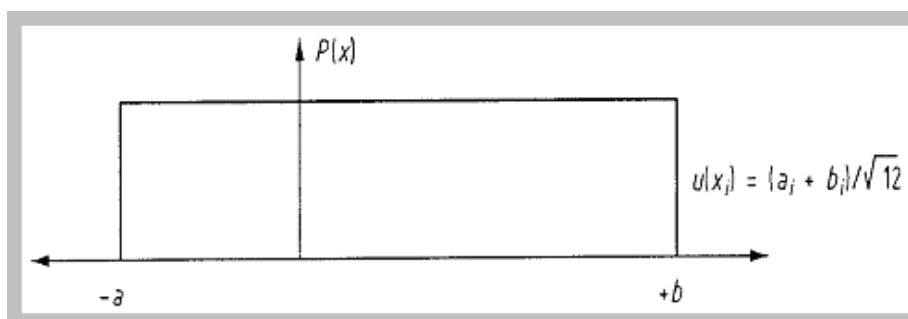
$$u(x_i) = \frac{a_i + b_i}{\sqrt{12}}, \quad (26)$$

kjer so:

a_i = ocenjeno pol-območje dela negotovosti odvisno od vhodnega podatka x_i ,

b_i = širina območja, odvisna od a_i .

Pri pogoju, da je $(x_i - a_i) < X_i < (x_i + b_i)$:



Graf 5: Nesimetrična verjetnostna porazdelitev (ISO-5168, 2005, str.21)

Bolj konzervativna možnost bi bila pravokotna porazdelitev, pri kateri bi bila za standardno negotovost vzeta večja od obeh vrednosti meja območja ($a_i / \sqrt{3}$ ali $b_i / \sqrt{3}$).

2.1.2.3 Koeficienti občutljivosti

Poleg velikosti posameznih komponent negotovosti vstopnih količin je potrebno določiti tudi učinek, ki ga ima vsaka izmed teh komponent na končni rezultat. V tem podpoglavju bo podrobneje predstavljen koeficient občutljivosti (občutljivost izhodne količine na občutljivost vhodne količine). Koeficient občutljivosti vsake vhodne količine je lahko pridobljen analitično ali numerično.

a) Analitična rešitev

V primeru, ko je funkcijsko razmerje definirano kot v enačbi (1), je koeficient občutljivosti določen kot razmerje spremembe izhodne količine y z vhodno količino x_i . Vrednost koeficienta občutljivosti c_i je pridobljena s parcialnim odvodom in je definirana v enačbi (27):

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (27)$$

Ko so uporabljene brezdimenzijske negotovosti (npr. odstotna negotovost), je prav tako potrebna uporaba brezdimenzijskega koeficienta v skladu z enačbo (28):

$$c_i^* = \frac{\partial y}{\partial x_i} \frac{x_i}{y} \quad (28)$$

b) Numerična rešitev

Kadar ni na voljo nobenega matematičnega razmerja ali pa je funkcijsko razmerje zelo zapleteno, je lažje pridobiti koeficiente občutljivosti numerično z izračunom učinka majhne spremembe v vhodni količini x_i na izhodno količino y . Najprej je treba izračunati y z uporabo x_i in potem preračunati vse skupaj še z $x_i + \Delta x$, kjer je Δx majhna sprememba vhodne količine x_i . Rezultat preračuna je tako izražen kot $y + \Delta y$, kjer je Δy majhna sprememba y , ki nastane zaradi Δx_i . Koeficienti občutljivosti so izračunani z enačbo (29):

$$c_i \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i} \quad (29)$$

Koeficienti občutljivosti so izračunani v brezdimenzijski ali relativni obliki z enačbo (30):

$$c_i \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i} \frac{x_i}{y} \quad (30)$$

Tabela 3: Način izračuna koeficienta občutljivosti (ISO-5168, 2005, str. 13)

Koeficient občutljivosti	Prirastek	x_1	x_2	...	x_i	x_N	y	c	c^*
—	—	x_1	x_2	...	x_i	x_N	$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) = y_{\text{nom}}$	—	—
c_1	$\Delta x_i \approx 10^{-6} \cdot x_1$	$x_1 + \Delta x_i$	x_2	...	x_i	x_N	$y_i = f(x_1 + \Delta x_i, x_2, \dots, x_N)$	$\frac{(y_1 - y_{\text{nom}})}{\Delta x_1}$	$c_1 \cdot \frac{x_1}{y_{\text{nom}}}$

Tabela (3) prikazuje način izračuna določenega koeficienta občutljivosti za vsako funkcijo, kjer je $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$. Analitična rešitev izračuna gradient izhodne vrednosti y glede na x_i pri nominalni vrednosti x_i , medtem ko numerična metoda poda povprečen gradient intervala z x_i na $(x_i + \Delta x_i)$. Povečanje Δx_i naj bo tako majhno kot tudi praktično možno in ne sme biti večje od negotovosti v parametru x_i .

2.1.2.4 Kombiniranje negotovosti

Ko je standardna negotovost vhodnih količin in njim pripadajočih koeficientov občutljivosti določena z metodo ocene negotovosti A ali B, je skupna negotovost izhodnih količin določena z enačbo (31):

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2} \quad (31)$$

V primeru uporabe relativne negotovosti je potrebno upoštevati relativne koeficiente občutljivosti z enačbo (32):

$$u_c^*(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i^* u^*(x_i)]^2} \quad (32)$$

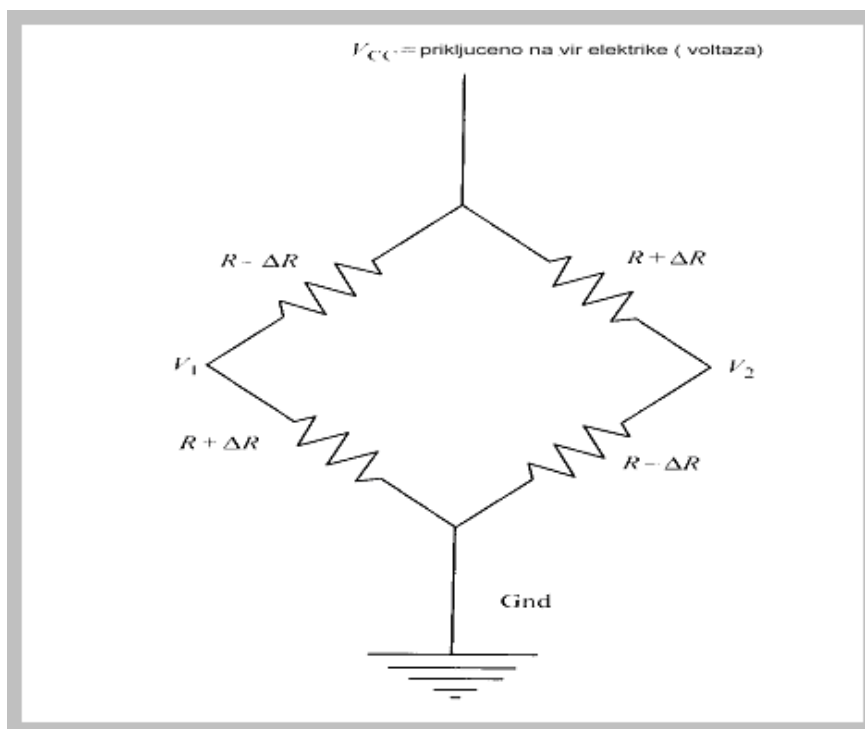
Pri uporabi enačb (31) in (32) je potrebno upoštevati, da morajo biti vhodne količine medsebojno nepovezane. Povezanost med količinami nastopi takrat, ko je ena merilna naprava uporabljena za izvedbo več različnih meritev.

2.1.3 Merilniki tlaka

V tem podglavju bodo opisani principi delovanja merilnikov tlaka. Večina jih deluje na osnovi pizorezistivnega efekta, ki ustvari razliko v upornosti materiala polprevodnika (silicij ali germanij) kot odgovor na nanj delujočo silo.

Najpopularnejši silicijevi tlačni odjemniki so piezorezistivni mostovi, kateri proizvedejo napetost zaradi tlaka delujočega na tanko silicijevo diafragmo. Občutljiv element tlačnega odjemnika je sestavljen iz štirih skoraj enakih upornikov, ki ležijo malce pod gladino tanke krožne silicijeve diafragme (Slika 1). Sila tlaka povzroči upogib tanke diafragme, s tem

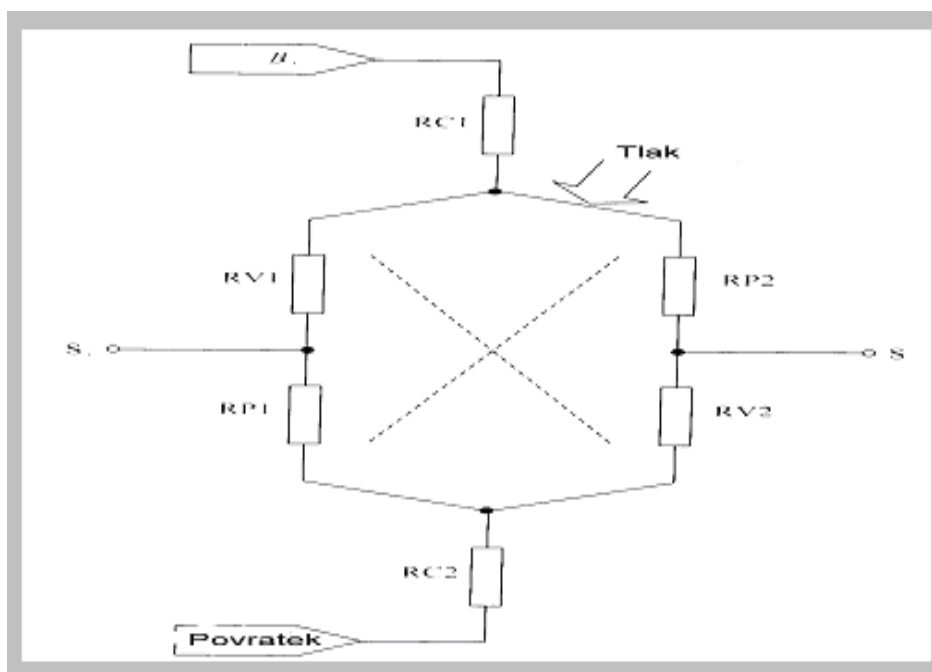
inducira napetost v diafragmi in upornikih v njej. Vrednosti upornikov se spremenijo odvisno od napetosti, kateri so podvrženi, ta pa je odvisna od delujoče sile na diafragmo. Tako je razlika tlakov prevedena v razliko upornosti. Upornike lahko povežemo z polovičnim mostom ali pa s celim Wheastonovim mostom.



Slika 1: Most s štirimi elementi, uporabljen v pizorezistivnem tlačnem odjemniku. (Nihal Kularatna, Digital and Analog Instrumentation, 2003, str. 555)

Za tlak ali delujočo silo na diafragmo je uporaba celega mostu teoretično prikazana na sliki (2), brez prikazane enote za ojačitev. Razpon $R + \Delta R$ in $R - \Delta R$ predstavljata dejansko vrednost upornika pri delujoči sili ali tlaku. R predstavlja vrednost upornika, ko je tlak enak nič. Kjer imajo vsi štirje uporniki skoraj enako vrednost, ΔR predstavlja razliko v upornosti, ko deluje tlak. Vsi štirje uporniki se bodo spremenili za približno enake vrednosti. Napetost signala, proizvedena s celim mostom, je proporcionalna napetosti vira (V_{cc}) in velikosti tlaka ali sile, ki povzroči razliko upornosti ΔR . Kot primer iz prakse je podan tlačni odjemnik Motorola MPX 2100 z Wheatstonovim mostom (Slika 2). Mostni uporniki RP1, RP2, RV1 in RV2 so postavljeni na tanki silikatni diafragmi tako, da ko deluje tlak na RP1 in RP2, se jima

poveča vrednost, medtem ko se RV1 in RV2 zmanjšata za podobno vrednost, kot je tista, za katero sta se RP1 in RP2 povečala.



Slika 2: Odjemnikom podoben tokokrog, Motorola MPX 2100 z Wheatstonovim mostom. (Nihal Kularatna, Digital and Analog Instrumentation, 2003, str. 556)

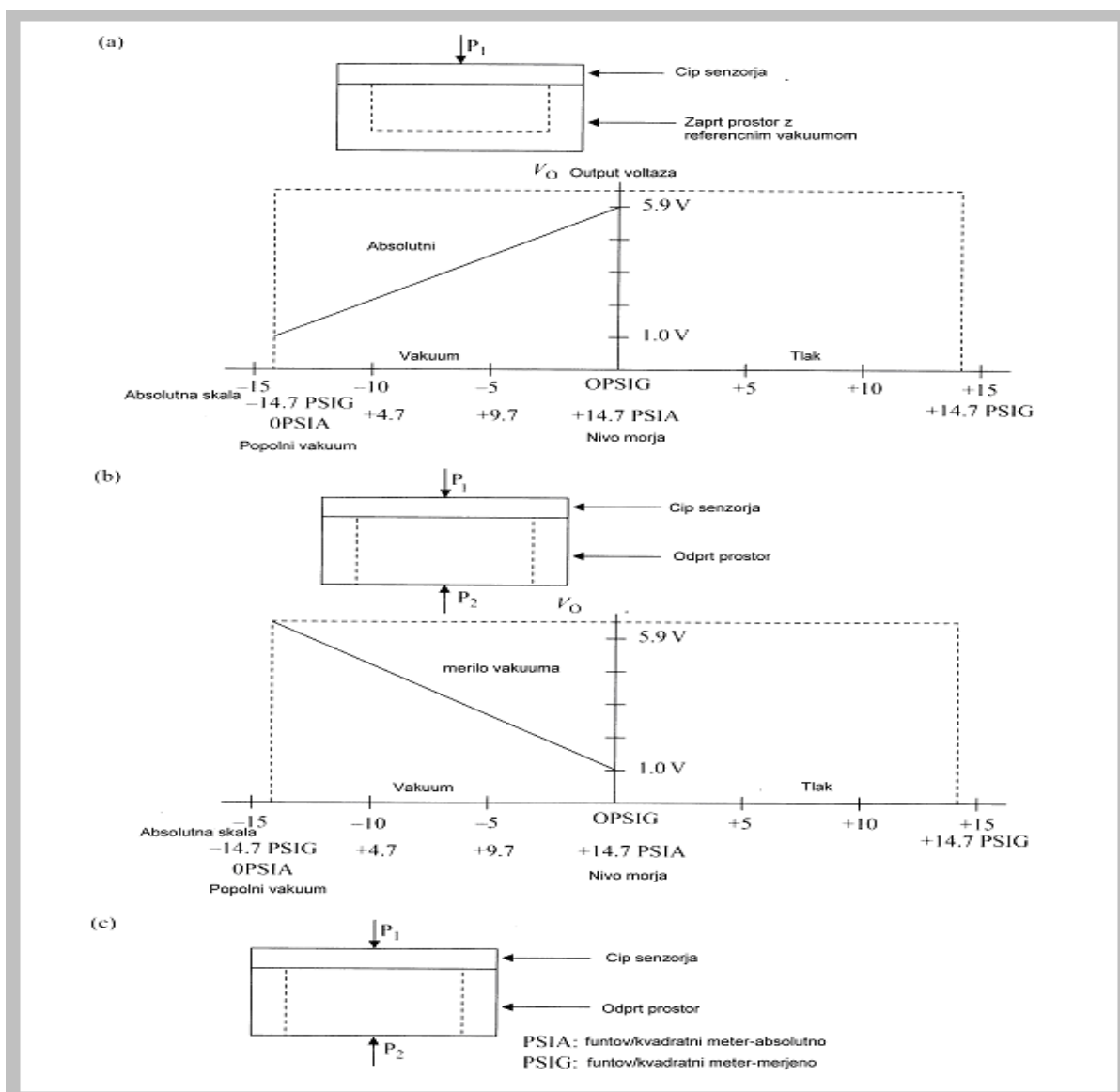
Tlak na diafragmi poruši ravnotežje mostu in proizvede drugačen signal. Glavna lastnost tega vezja je, da je diferencialna proizvedena napetost neposredno proporcionalna usmerjeni napetosti B+. Ta lastnost nam pove, da je natančnost tlačnih meritev odvisna neposredno od tolerance usmerjenosti.

Zgoraj navedeni uporniki podajo tudi priročno sredstvo za kompenzacijo temperature. Mostni uporniki so silikatni uporniki, ki imajo pozitivne temperaturne koeficiente. Zato, kadar so postavljeni v vrste z ničnima Tc temperaturno kompenzacijskima upornikoma, se količina napetosti ki deluje na most, poveča. To povečanje napetosti povzroči povečanje električne občutljivosti in je nadomestilo za negativne temperaturne koeficiente, povezane z piezorezistenco. Ker sta RC1 in RC2 približno enaka, je proizvedena napetost približno enaka 0,5 B+. V tipičnih MPX 2100 odjemnikih imajo mostni uporniki nominalno vrednost 425Ω;

RC1 in RC2 imata nominalno vrednost 680Ω . S temi vrednostmi in 10 V za $B+$, $\Delta R = 1,8 \Omega$ proizvede 40 mV diferencialne napetosti.

2.1.3.1 Vrste odjemnikov delujočih na principu tlaka

Večina proizvajalcev tlačnih odjemnikov podpira tri vrste meritev tlaka: absolutni tlak, diferencialni tlak in manometer (Slika 3).



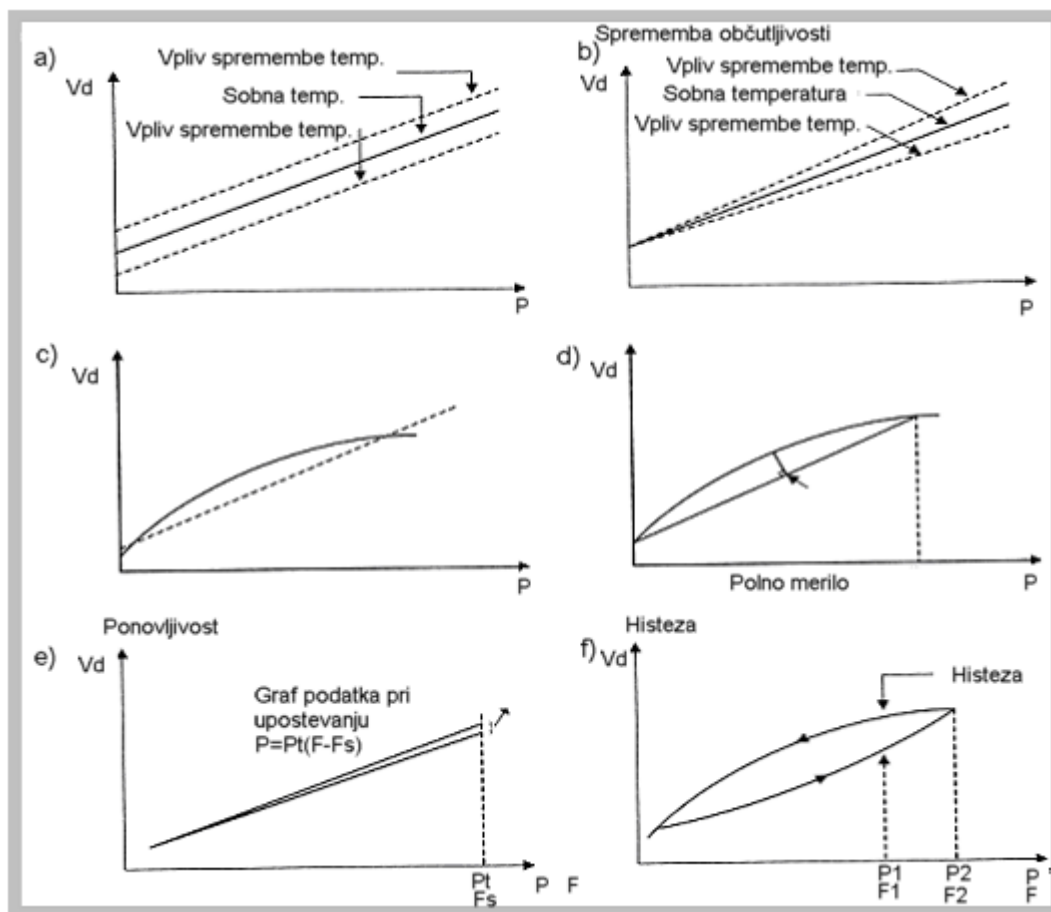
Slika 3: Različne meritve tlakov: a) Absolutni, b) Diferencialni, c) Manometer (Nihal Kularatna, Digital and Analog Instrumentation, 2003, str. 558)

Absolutni tlak je merjen glede na vakuum, katerega primer je meritev barometriškega tlaka. V absolutnih napravah je priključek P2 zapečaten z vakuumom in predstavlja nepomično referenco.

Razlika tlakov med referenčnim vakuumom in izmerjeno količino povzroči upogib diafragme in s tem spremembo napetosti. (Slika 3-a) Diferencialni tlak je razlika med dvema tlakoma. V napravah, ki merijo diferencialni tlak se meritev opravlja na obeh priključkih (Slika 3-b). Manometriška meritev je oblika diferencialne meritve, v kateri je atmosferski tlak uporabljen za primerjavo. Primer je meritev tlaka v avtomobilski gumi, saj mora biti ta večji od atmosferskega. V manometru je priključek P1 vezan na atmosferski tlak, merjeni pa na P2 (Slika 3-c).

2.1.3.2 Negotovost pri delovanju odjemnikov

Glavni faktor, ki vpliva na delovanje je temperaturna odvisnost od karakteristik tlaka. Slika (4) prikazuje nekaj parametrov napak.



Slika 4: Značilne krivulje napak tlačnih odjemnikov (Nihal Kularatna, Digital and Analog Instrumentation, 2003, str. 559)

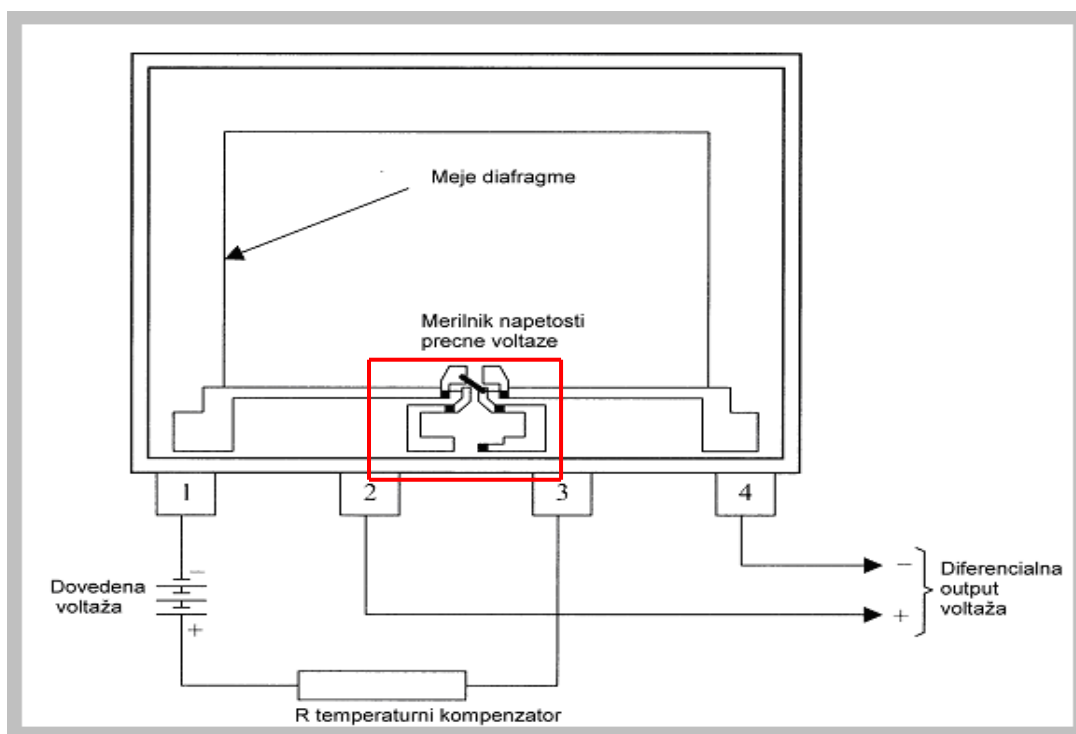
Negotovost v linearnosti je definirana kot odklon izhodne krivulje odjemnika od določene premice na želenem območju merjenega tlaka in jo prikazujeta sliki (4.c in 4.d). Negotovost v linearnosti se izračuna po metodi najmanjših kvadratov. Slika (4.e) prikazuje negotovost izhodnih podatkov, kljub temu, da so vhodni podatki konstantni, kar je posledica sistemske napake⁶. Temperaturna histereza je definirana z odklonom izhodne krivulje pri določenih vhodnih podatkih pred in po temperaturnem krogu in jo prikazuje slika (4.f).

2.1.3.3 Osnovni nekompenzacijski odjemniki

Večina naprav nekompenzacijskih tlačnih odjemnikov deluje na silicijevi piezorezistivni osnovi. Te naprave vsebujejo klasičen prevodnik. Slika (5) prikazuje silicijev čip tlačnega odjemnika in upornik, položen diagonalno na rob diafragme. Napetost je dovedena čez točki

⁶ Pojem *sistemska napaka* je razložen v poglavju 2.1

1 in 3 medtem, ko so tipala, ki zaznajo razliko napetosti, povezana prečno čez upornik občutljiv na tlak, na terminala 2 in 4.



Slika 5: Zgradba električnega vezja odjemnika tovarne Motorola–serije MPX (Nihal Kularatna, Digital and Analog Instrumentation, 2003, str. 562)

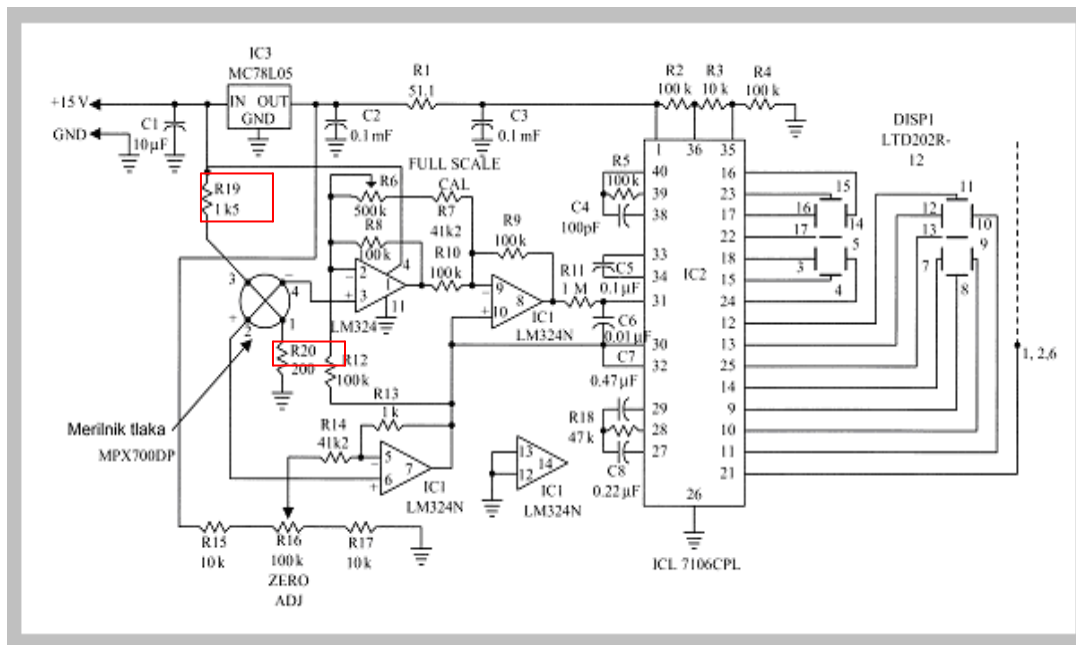
Priporočena gonilna napetost (Slika 5) je 3 V in ne sme biti večja od 6 V. Diferencialna izhodna napetost odjemnika, ki se pojavi med terminaloma 2 in 4 bo pozitivna, ko bo tlak na tlačni strani odjemnika večji kot tlak na vakuumski strani. Nominalen razpon prevodnika je 60 mV, ko ga poganjamo s konstantno napetostjo 3V.

Ko ni delujočega tlaka na odjemnik, se vseeno pojavi nekaj izhodne napetosti. Podana je iz strani proizvajalca (ponavadi med 0 in 40 mV). Izničimo jo lahko s primernim ojačevalcem instrumenta.

2.1.3.4 Kompenzacija temperature

Značilnost merilnika napetosti je temperaturna odvisnost, zato se pojavi zahteva, da je naprava temperaturno kompenzirana, če je uporabljena nad ali pod določenim temperaturnim

območjem. Kompenzacijo temperature in nične napetosti (napetosti, ko ni tlaka) lahko dosežemo z dodatnimi upornimi elementi. Slika (6) prikazuje klasičen tokokrog digitalnega tlačnega merilnika.



Slika 6: Shematski diagram merilnika tlaka - Motorola serija MPX 700 (Nihal Kularatna, Digital and Analog Instrumentation, 2003, str. 564)

Najenostavnejša metoda kompenzacije je, da se postavi upornike (R19 in R20) v vrsto z gonilno napetostjo odjemnika. Ta metoda da dobre rezultate v temperaturnem območju 0 – 80° C. Ker je zaželen gonilna napetost okoli 3 V se, s postavitvijo temperaturno kompenzacijskih upornikov v vrsto z mostnim tokokrogom, doseže tudi zmanjšanje prvotne, gonilne napetosti 15 V, na zaželenih 3 V.

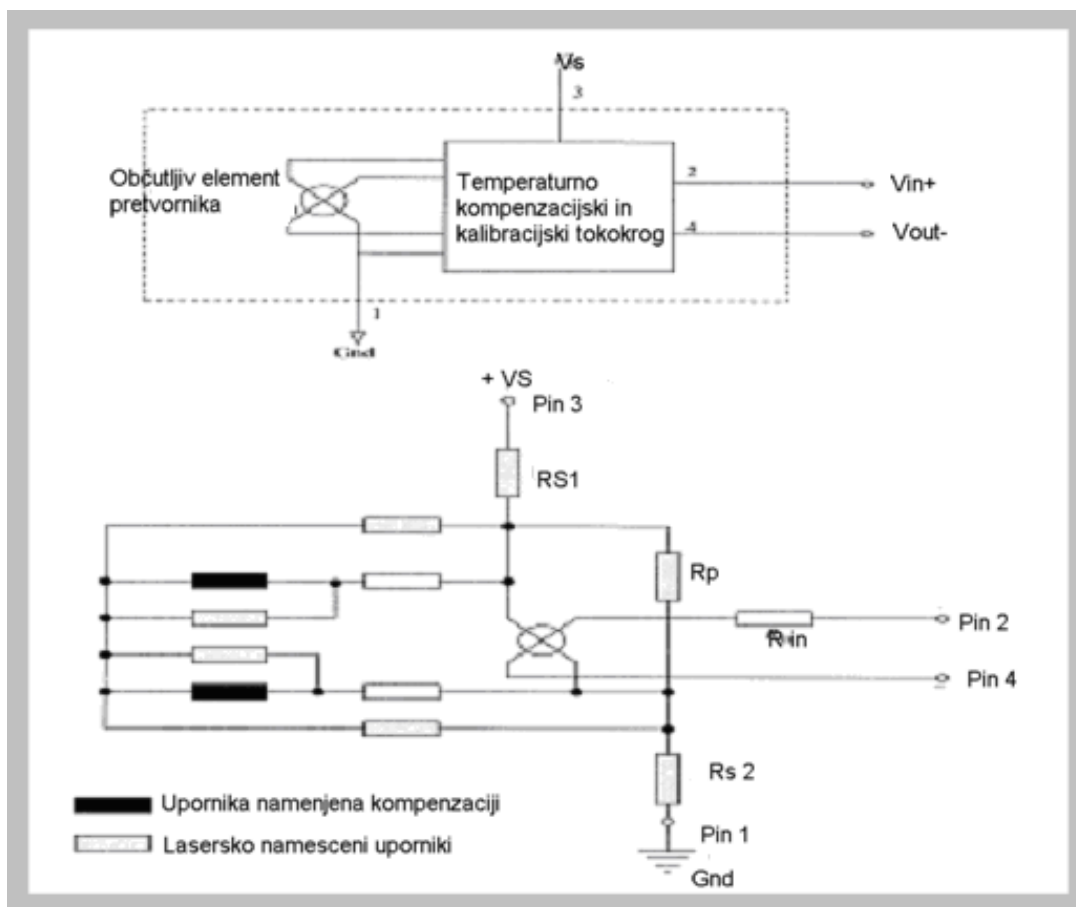
Metoda kompenzacije s serijami upornikov zahteva upornike, ki so enaki 3,577-krat mostnemu vhodnemu uporu pri temperaturi 25° C. Območje upora prevodnika je med 400Ω in 550Ω, zato ima kompenzacijska mreža med 1431Ω in 1967Ω upora. V tokokrogu na sliki (6) je kompenzacijska mreža sestavljena iz dveh upornikov, da se zagotovi stabilno napetostjo 2,5V odjemnikov v točkah 1 in 4 analognega ali digitalnega tokokroga, ki jima sledi. Za ojačitev izhodne napetosti prevodnika (60mV pri 0,7bar) na uporaben nivo, da lahko poganja tokokrog, se pogosto uporablja ojačevalnike, kot je LM 324.

Tokokrog (Slika 6) prikazuje zgradbo, ki dovoljuje sredstva za izničenje nične napetosti prevodnika. Danes ima večina neojačanih odjemnikov izhodno napetost nekaj deset milivoltov. Zato je potrebna vmesna stopnja, da se pridobi dovolj močan signal za nadaljnjo obdelavo. Ojačevalec instrumenta mora imeti veliki vhodni valovni upor in majhen izhodni valovni upor glede na izhodno napetost zaradi tlaka, in visok izkoristek.

2.1.3.5 Umerjeni in temperaturno kompenzirani tlačni odjemniki

Da je zagotovljena natančna povezava in umerjena napetost, ko ni tlaka in temperaturne kompenzacije, se uporabi odjemniške elemente s posebnim tokokrogom nameščenim z odjemnikom.

Kot primer je podan odjemnik Motorole serije MPX 2000. Slika (7) je prikaz tega odjemnika in prikazuje ureditev sedem lasersko nameščenih upornikov in dveh dodatnih, ki skrbita za umerjanje odjemnika zaradi nične napetosti, simetrije in temperaturne kompenzacije.



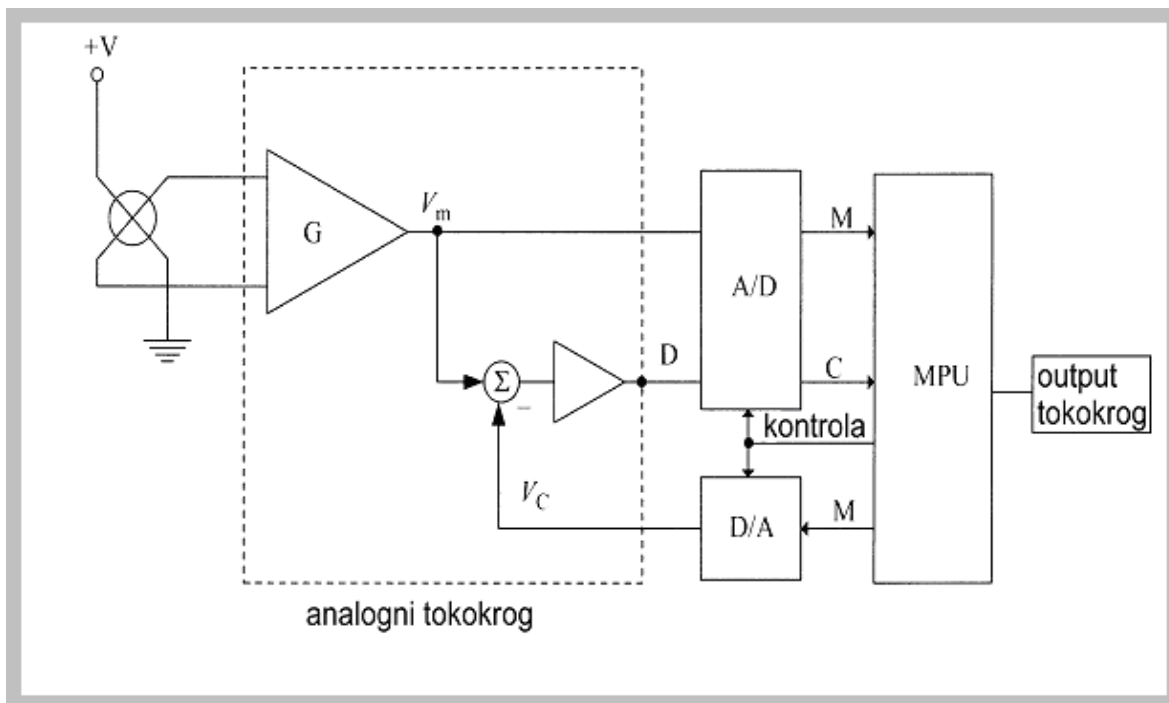
Slika 7: a) Diagram odjemnika, b) Kompenzacijska upornika in lasersko nameščeni uporniki (Nihal Kularatna, Digital and Analog Instrumentation, 2003, str. 568)

2.1.3.6 Vmesniki med odjemniki tlaka in mikroprocesorji

Velikokrat se zgodi, da moramo zagotoviti vmesnik med odjemnikom tlaka in mikroprocesorjem ali mikrokontrolerjem. V takih primerih je potrebno upoštevati nivo priprave signala ali kompenzacije temperature pri oblikovanju sistema. Pri odjemnikih s vgrajenim umerjanjem in kompenzacijo temperature, je osnovni diagram prikazan na sliki (8).

Če ni na voljo umerjanja, vgrajenega v odjemniku niti temperaturene kompenzacije, je potrebno uporabiti vmesne stopnje, ki ju zagotovijo. Pri usklajevanju silicijevih odjemnikov tlaka s mikroprocesorji, lahko uporabimo razmerje obeh funkcij, da minimiziramo potrebo po

datnih komponentah. Razmerja funkcij teh elementov izničijo nihanja napetosti vira elektrike.



Slika 8: Osnovni diagram⁷ vmesnika med kompenziranim odjemnikom in mikroprocesorjem (Nihal Kularatna, Digital and Analog Instrumentation, 2003, str. 571)

2.1.4 Ultrazvočni merilniki pretoka

Pri ultrazvočnih merilcih pretoka je potrebno poznavanje zakonitosti toka vode v zaprtih ceveh. Režim toka, pri katerem se tok giblje v vzporednih slojih, se imenuje laminarni tok. Režim toka, pri katerem pa se pojavijo pulzacije hitrosti, in zaradi tega premeščanje delcev tekočine v prečni smeri, pa se imenuje turbulentni tok. Laminarni tok v ceveh naj bi imel Reynoldsovo število manjše od 2000, prehodni tok med 2000 in 4000, turbulentni pa več kot 4000. Tekočina v gibanju ima potencialno, kinetično in toplotno energijo. Skupna energija je vsota vseh teh energij. Pri ultrazvočnih meritvah toka gre za merjenje dejanske hitrosti toka v

⁷ V oznake v sliki: A-analogo, D-digitalno, G-odjemnik, MPU-mikroprocesor

določeni točki v prostoru, v katerem se giblje tekočina. Obstaja več vrst ultrazvočnih merilcev pretoka.

a) Dopplerjev merilec pretoka

Slika (9) prikazuje osnovni princip delovanja Dopplerjevega merilca pretoka. Oddajnik pošlje ultrazvočni signal s frekvenco ν_{oddana} in hitrostjo c v tekočino. Signal se odbije od mehurčkov, vrtincev ali delcev, ki se gibljejo s hitrostjo tekočine v . Hitrost ultrazvočnih valov relativno glede na delce je:

$$c_{uv} = (c + v \cdot \cos \Theta), \quad (33)$$

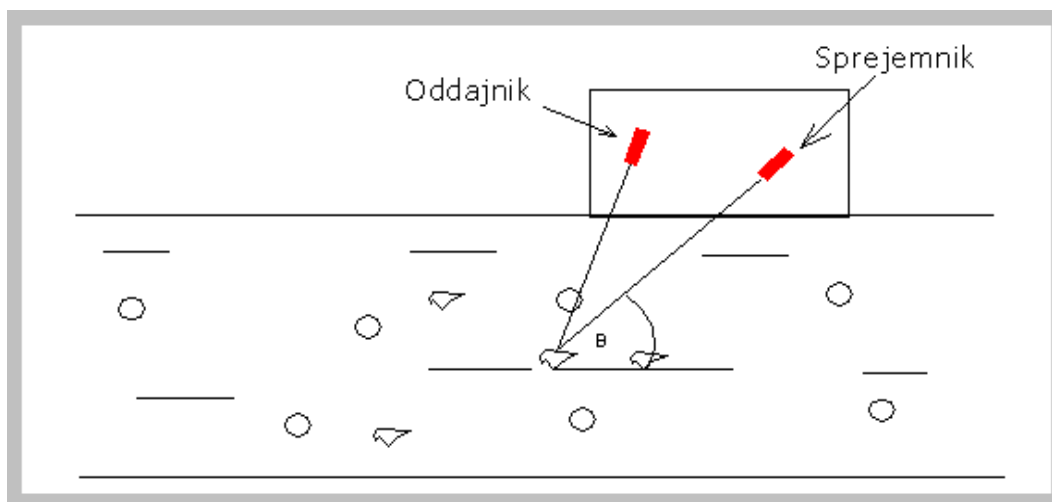
kjer je:

c_{uv} = hitrost ultrazvočnih valov glede na plavajoče delce,

c = hitrost ultrazvočnega signala,

v = hitrost tekočine,

Θ = kot med signalom oddajnika in sredino cevi.



Slika 9: Shema merilca, delujočega na principu Dopplerjevega efekta (W. Boltona, Instrumentation & Measurement, 1996, str.208)

Pripadajoča frekvenca ultrazvočnih valov je v tem primeru:

$$\nu = \frac{(c + v \cdot \cos \Theta) \nu_{oddana}}{c}, \quad (34)$$

kjer je:

v = pripadajoča frekvenca ultrazvočnih valov,

v_{oddana} = frekvenca ultrazvočnih valov.

Relativna hitrost teh valov glede na sprejemnik in sprejeta frekvenca se izračuna po enčbi:

$$c_{r,v} = (c - v \cdot \cos \Theta) \quad (35)$$

$$v_{\text{sprejeta}} = \frac{v_{\text{oddana}} \cdot (c + v \cdot \cos \Theta)}{(c - v \cdot \cos \Theta)}, \quad (36)$$

kjer je:

$c_{r,v}$ = relativna hitrost valov,

v_{sprejeta} = frekvenca ultrazvočnih valov, ki jo sprejme sprejemnik.

Ker je količnik med hitrostjo ultrazvočnih valov in hitrostjo delcev ki plavajo v toku zanemarljivo majhen, se lahko zgornjo enačbo poenostavljeno napiše:

$$v_{\text{sprejeta}} - v_{\text{oddana}} = \frac{2 \cdot v_{\text{oddana}} \cdot v}{c} \cos \Theta \quad (37)$$

Hitrost toka tekočine je:

$$v = \frac{\Delta v \cdot c}{2 \cdot v_{\text{oddana}} \cdot \cos \Theta} \quad (38)$$

Merilci, delujoči na principu Dopplerjevega efekta so razmeroma poceni in dosežejo merilno točnost 5%. Zato se jih ponavadi uporablja zgolj kot indikatorje toka.

b) Merilci pretoka, ki delujejo na principu dveh oddajnikov in sprejemnikov

Druga vrsta merilcev pretoka so merilci, ki delujejo na principu dveh ultrazvočnih sprejemnikov in oddajnikov, ki sta postavljena na vsaki strani cevi, skozi katero teče tekočina (Slika 10). Hitrost ultrazvočnega valovanja v eno smer se tako opiše z enačbo (parametri enačbe so opisani v točki (a)):

$$c_{s1} = (c + v \cdot \cos \Theta), \quad (39)$$

kjer je:

c_{s1} = hitrost valovanja v eno smer,

- c = hitrost valovanja skozi tekočino ki miruje,
- v = frekvenca valovanja,
- Θ = kot med smerjo valovanja in robom cevi.

Hitrost ultrazvočnega valovanja v drugo smer pa se opiše z enačbo:

$$c_{s2} = (c - v \cdot \cos \Theta) \quad (40)$$

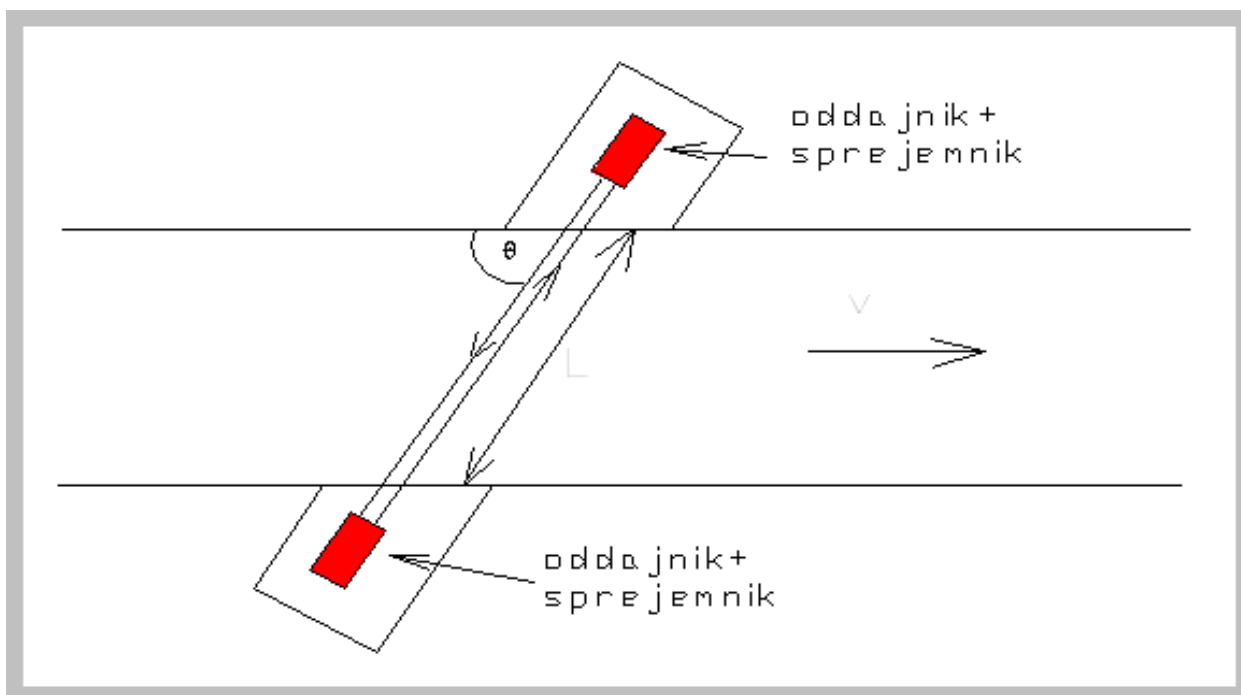
Čas, ki ga potrebuje ultrazvočno valovanje v eno smer je tako:

$$t_{uv} = \frac{L}{c + v \cos \Theta}, \quad (41)$$

kjer je:

t_{uv} = čas, ki ga potrebuje ultrazvočno valovanje v eno smer (Slika 10),

L = razdalja med robovoma cevi odvisna od kota Θ (Slika 10).



Slika 10: Merilec delujoč na principu dveh oddajnikov in sprejemnikov (W. Boltona, Instrumentation & Measurement, 1996, str.209)

V primeru, ko sprejem signala sproži oddajo signala drugega oddajnika, potem sta frekvenci, s katero signali potujejo v obe smeri:

$$v_1 = \frac{(c + v \cos \Theta)}{L} \quad \text{in} \quad v_2 = \frac{(c - v \cos \Theta)}{L} \quad (42)$$

Razlika med frekvencama je:

$$\Delta v = \frac{(c + v \cos \Theta)}{L} - \frac{(c - v \cos \Theta)}{L} = \frac{2v \cos \Theta}{L}, \quad (43)$$

kjer je:

Δv = razlika med frekvencama

Razlika med frekvencama je uporabljena za izračun hitrosti tekočine:

$$v = \frac{\Delta v \cdot L}{\cos \Theta} \quad (44)$$

Tovrstne merilnike hitrosti tekočine se uporablja za cevi s premeri od 75mm do 1500mm in za hitrosti tekočin med 0,2m/s in 12m/s z natančnostjo okoli 1%. Lahko se jih uporablja tudi za merjenje hitrosti pri toku s prosto gladino.

c) Korelacijski ultrazvočni merilniki pretoka

Poznani so tudi korelacijski ultrazvočni merilniki pretoka v tekočinah, v katerih prihaja do pogostih turbulenc, izločanja mehurčkov in plavajočih delcev. Slika (11), podana v nadaljevanju, prikazuje obliko naprave, kjer se s pomočjo ultrazvočnih valov meri hitrost tekočine. Vsaka nepravilnost v tekočini (mehurček, itd), ki potuje med sprejemnikom in oddajnikom, vpliva na sprejemni signal. Signal, ki je bil sprejet z sprejemnikoma potuje, skozi ojačevalec in filter na korelator, kateri oceni korelacijsko funkcijo za dva signala. Korelacijska funkcija ima maksimalno vrednost takrat, ko je največja podobnost med obema signaloma. Časovna razlika Δt med obema signaloma je s to razliko določena in se lahko izračuna hitrost tekočine po enačbi (41):

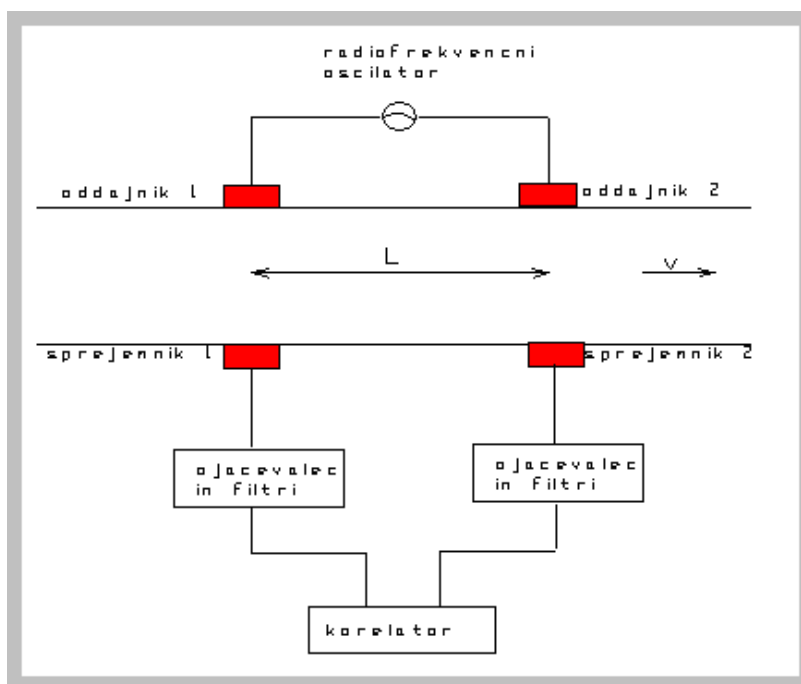
$$v = \frac{L}{\Delta t}, \quad (45)$$

kjer je:

v = hitrost tekočine,

L = razdalja med oddajnikom 1 in 2,

Δt = časovna razlika med dvema signaloma.



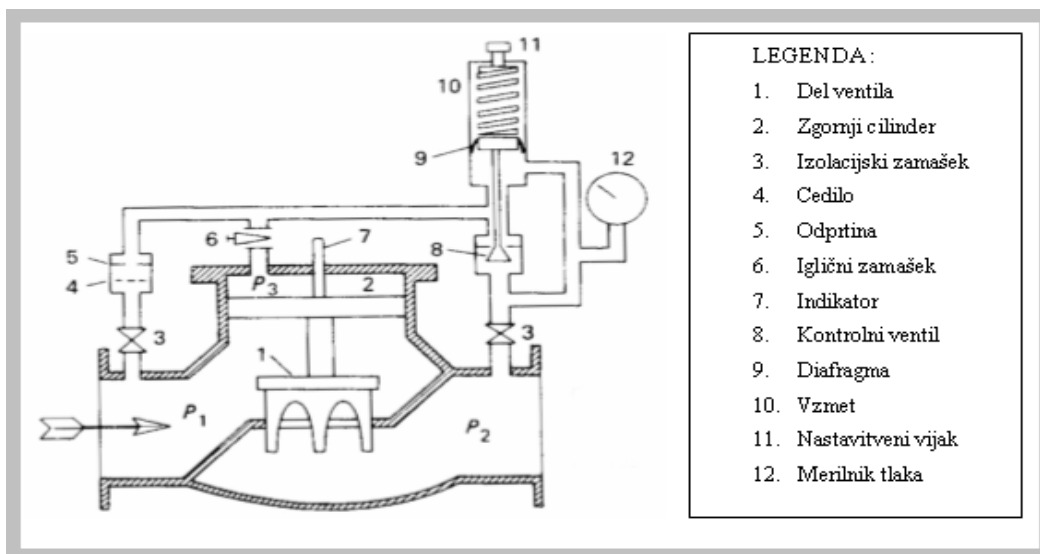
Slika 11: Korelacijski ultrazvočni merilec hitrosti tekočine (W. Boltona, Instrumentation & Measurement, 1996, str.210)

Največji problem tovrstnih merilnih sistemov je v dolgem odzivnem času, kar onemogoča spremljanje količine pretoka v realnem času.

2.2 Reducirni ventili

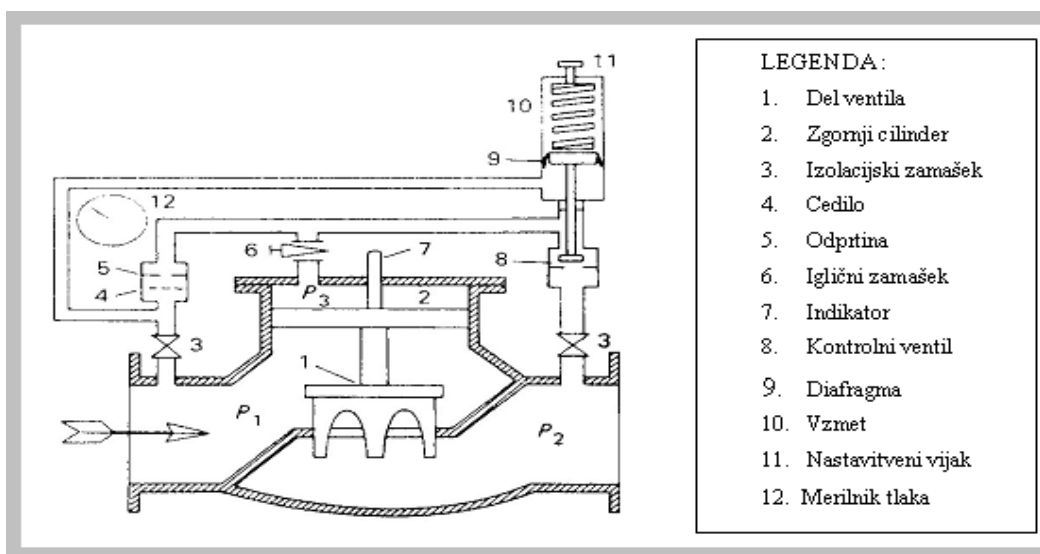
Ventili so pomemben del vodooskrbnega sistema. Poznanih je več vrst ventilov kot so zaporni ventili, nepovratni ventili, ventili za kontrolo pretoka, ventili za kontrolo tlaka, reducirni ventili, vzdrževalni ventili, itd.. Nadzoruje se jih lahko ročno ali pa daljinsko preko računalnika. Vodovodni sistem Ljubljana – Brod dobiva vodo iz vodovodnega sistema Ljubljana – Vižmarje, preko reducirnega ventila, ki zmanjšuje tlak iz 6,5 na 3,6 bara. Opažena je bila problematika reducirnega ventila, saj deluje le na 10 % celotne zmogljivosti. V primeru hipnega povečanja tlaka, bi lahko prišlo do okvare ventila in poškodbe cevovoda dolvodno od ventila. V tem poglavju bosta podrobneje predstavljena reducirni in vzdrževalni ventil in rešitev problema reducirnega ventila v reducirni postaji Brod. Naloga reduciranih ventilov je zmanjšanje tlaka tekočine dolvodno od ventila. Potrebni so povsod tam, kjer je tlak vode v cevi prevelik in bi lahko poškodoval vodovodni sistem. Delovanje reducirnega ventila se

najbolje opiše na praktičnem primeru (Slika 12). V primeru povišanega tlaka P_2 se ventil 8 zapre, povečanje tlaka P_3 pa povzroči zaprtje glavnega ventila 1 in obratno. V primeru da je tlak v tekočini dolvodno od ventila ustrezen se ventil odpre in prepusti tekočino. Reducirni ventili morajo biti zasnovani tako, da ob maksimalnemu odprtju prepustijo maksimalni želeni pretok. Na ventilih pride do lokalnih izgub, velikosti katerih pa so odvisne predvsem od vrste ventila.



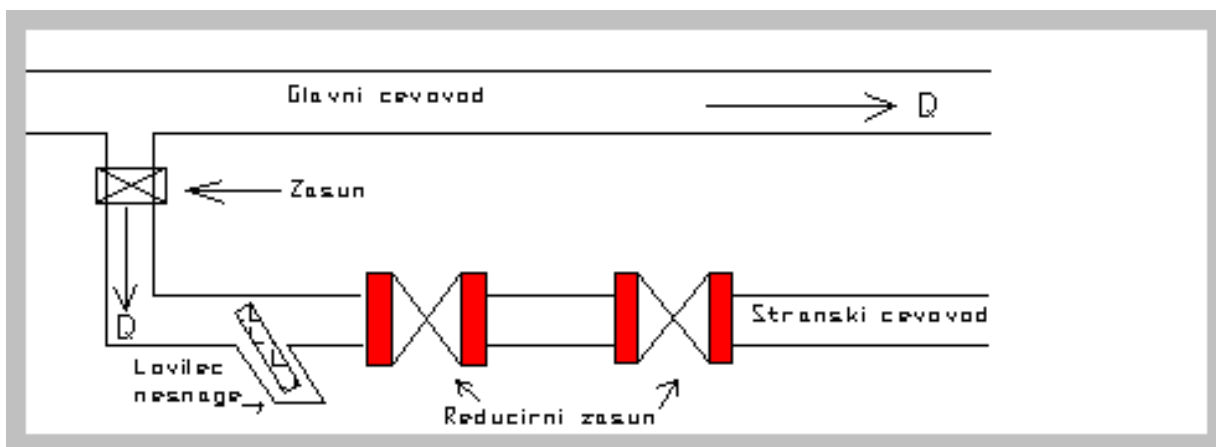
Slika 12: Reducirni ventil (Water Supply, Alan C. Tworth, 2000, str. 602)

V nadaljevanju bo opisan še ventil, katerega naloga je vzdrževanje določenega tlaka v sistemu gorvodno od ventila (Slika 13).

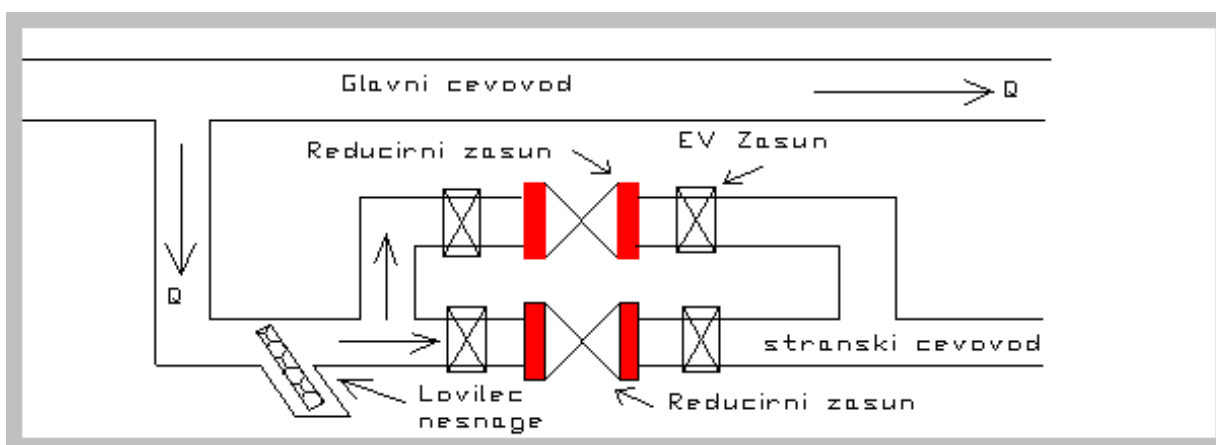


Slika 13: Vzdrževalni ventil (Water Supply, Alan C. Tworth, 2000, str. 602)

Uporablja se ga v primeru, ko neko območje A napaja drugo območje B. Z vzdrževalnim ventilom v napajalnem cevovodu območja A se lahko vzdržuje primeren tlak na tem območju ne glede na napajano območje B. V primeru, ko tlak P_1 naraste se ventil št. 8 odpre. Zmanjšanje tlaka P_3 pa povzroči odprtje glavnega ventila 1 in obratno. Problem se pojavi, ko pride do okvare reducirnega ventila in ta spusti visok tlak v cevi dolvodno od ventila, kateri poškoduje cevi. Do okvare pride zaradi rje, ki uniči vzmet ventila, tehnološke napake pri sami izdelavi ventila, trdih delcev, ki pridejo v cev pri lomu cevi in poškodujejo zaporno loputo ventila ter zaradi ostalih nepredvidenih razlogov. Zato je pomembna varnost pri dimenzioniranju reducirnih ventilov. Obstaja več vrst varnostnih mehanizmov (Slika 14 in slika 15).



Slika 14: Dva reducirna ventila postavljena zaporedno



Slika 15: Dva reducirna ventila postavljena vzporedno

Pomembno je, da projektant predvidi lovilnik nesnag pred reducirnim ventilom in s tem zmanjša nevarnost poškodb ventila, ki bi ga povzročilo kamenje v cevovodu. Prav tako se v zadnjem času v vodovodne sisteme vključujeta po dva reducirna ventila, od katerih ima eden varnostno funkcijo, vendar pa je potrebno pri tem upoštevati več različnih scenarijev, da se pridobi optimalna rešitev.

Pri dveh ventilih postavljenih vzporedno se voda dobavlja uporabnikom preko enega ventila, medtem ko drugi služi kot varnostni ventil. V primeru, ko pride za prvim ventilom do porasta tlaka nad določeno mejo, se ta zapre in začne delovati drugi varnostni ventil.

Pri zaporedno postavljenih ventilih pa teče voda skozi oba zaporedna ventila in v primeru okvare enega ventila drugi prevzame celotno obremenitev. Obe vrsti rešitev (Slika 14 in 15) imata svoje prednosti in slabosti, katere so predstavljene v tabeli (4).

Tabela 4: Primerjava med vzporedno in zaporedno vezanima ventiloma

Zaporedno vezana reducirna ventila	Vzporedno vezana reducirna ventila
PREDNOSTI	
Manjši stroški montaže	Večja varnost
Zavzameta manj prostora	Kljub okvari enega ventila je možna dobava vode uporabnikom
SLABOSTI	
Manjša varnost	Potrebno daljinsko krmiljenje ventilov
Med popraviljanjem ventila so odjemniki brez vode	Višji stroški montaže
Potrebna neprestana kontrola ventila	Zavzame več prostora

Pri vzporedno vezanih ventil je zagotovljena večja varnost in kontinuirana oskrba s pitno vodo. V praksi⁸ se ta možnost izkaže za optimalno, kljub višjim stroškom in prostorskim omejitvam.

⁸ Vir: Dr. Boris Kompare

2.3 Meritve in modeliranje

Vodovodni sistem je domena vsake moderne civilizacije. Njegova naloga je, da dostavlja vodo potrošnikom, ki jo uporabljajo za zagotavljanje njihovih potreb po vodi, kot na primer za gospodinjsko in industrijsko porabo. Moderni vodovodni sistemi vsebujejo objekte za zbiranje, črpanje, obdelavo, transport in dostavo vode uporabnikom. Pri tem je pomembna kontinuirana oskrba z vodo pod primernim tlakom v ustrezni količini in kakovosti. Modeliranje vodovodnega sistema je zapleteno. Potrebno je poznavanje hidravlike, delovanja resničnega sistema in programske opreme za modeliranje.

Meritve predstavljajo pomemben vir podatkov za modeliranje in verodostojen prikaz hidravličnih razmer v vodovodnem sistemu. Tlaki in pretoki se merijo po celotnem vodovodnem omrežju na primernih mestih, zbrani podatki v meritvah pa se uporabijo za umerjanje modela. Ponavadi se meritve tlakov izvajajo na požarnih hidrantih oziroma vodovodnih jaških, ki so primerni za namestitev merilne naprave. Meritve pretoka pa se izvaja na ključnih mestih v sistemu in se tako zagotovi vpogled v delovanje sistema in pridobitev velikosti pretokov za umerjanje modela. Čeprav so velikosti in kompleksnosti vodovodnih sistemov različne, pa imajo vsi isti namen – dostavo vode od vira do potrošnika.

Program Epanet je računalniški program za simuliranje hidravlike in kvalitete vode v zaprtih vodovodnih sistemih in deluje v okolju MS Windows, ki ga je razvila ameriška agencija za okolje. Mreža vodovodnega sistema je lahko sestavljena iz cevi, vozlišč, črpalk, ventilov, vodnih virov in vodohranov. S pomočjo Epaneta se lahko izvajajo tako statične kot tudi razširjene časovne simulacije. Poglavitne lastnosti programa so naslednje (Diplomska naloga, Orel, 2004):

- ni omejitev pri velikosti omrežja,
- za račun linijskih trenjskih izgub obstaja možnost izbiranja med različnimi enačbami (Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ali Chezy-Manning),
- upoštevanje lokalnih izgub v sistemu,
- možno je modeliranje črpalk s stalno ali spremenljivo hitrostjo,
- možen je izračun porabljene energije črpalk in stroškov črpanja,

- vključeni so različni tipi ventilov (zaporni ventili, nepovratni ventili, ventili za kontrolo pretoka, ventili za kontrolo tlaka, reducirni ventili in vzdrževalni ventili),
- dopušča upoštevanje različnih oblik vodohranov preko $V(h)$ krivulje,
- možna je nastavitvev različnih vrst porab v vozliščih, vsake s svojo krivuljo nihanja porabe,
- možno je modeliranje odtokov, ki so odvisni od tlakov (izgube v sistemih),
- dobro je podprta možnost upravljanja sistema s sestavo kontrolnih nastavitvev,
- uporaba objektne knjižnice omogoča prilagajanje programske opreme lastnim potrebam,
- za simulacije in analize, ki so vezane na kakovost pitne vode pa program omogoča upoštevanje vrste drugih parametrov in lastnosti, ki so za omenjene analize potrebni.

Reševanje matematičnih modelov je zasnovano na podlagi » *Demand – Driven* » analize, ki narekuje spremljanje hidravličnih razmer v vodovodnem sistemu glede na potrebe porabnikov po vodi. Poleg modeliranja fizičnih komponent vodovodnega sistema program Epanet nudi tudi upoštevanje številnih krivulj, časovnih korakov in različnih kontrol, s katerimi se opiše delovanje samega sistema. Epanet omogoča tudi umerjanje hidravličnega modela z vključitvijo na vodovodnem sistemu zbranih meritev hidravličnih veličin, katere se primerja s podatki meritev. Matematično modeliranje s programom Epanet ne bo vključeno v nalogi, vendar je navedeno zaradi meritev, katerih namen je tudi zbiranje podatkov za matematično modeliranje.

V samem vodovodnem sistemu prihaja do različnih obremenitev. Tako so poznani trije obtežni primeri, ki se jih uporablja tudi v modeliranju in sicer: običajni obtežni primer, izjemni obtežni primer in ekstremni obtežni primer. Za umerjanje hidravličnega modela za vsak obtežni primer se izvajajo različni postopki zajema meritev hidravličnih veličin. V nadaljevanju bodo predstavljene teoretične osnove merjenja tlaka in pretoka na vodovodnih sistemih, postopek za opravljanje požarnega testa, ki zagotavlja požarno varnost vodovodnega sistema in postopek izračuna linijskih trenjskih izgub na cevovodu.

2.4 Meritve na cevovodih

Meritve na cevovodih dajo številne podatke o delovanju samega vodovodnega sistema. V primeru, da vodovodni sistem deluje nemoteno pod običajnimi hidravličnimi razmerami, in ko tlaki in pretoki izkazujejo najpogostejše vrednosti, govorimo o običajnem obtežbenem primeru. Vključene so tudi izgube vode, ki nastanejo zaradi puščanja tako elementov v glavnem vodovodnem sistemu kot tudi pri potrošniku, saj predstavljajo standardno komponento porabe na vodovodnih sistemih. Običajno se izvajajo meritve tlaka, pretoka in gibanja nivojev vode na objektih s prosto gladino. Uradni list republike Slovenije obravnava le mikrobiološke in kemične lastnosti pitne vode in ne hidravličnih lastnosti vodooskrbnih sistemov. Te lastnosti so ponavadi zapisane v internih pravilnikih podjetji, katerih dejavnost je oskrba s pitno vodo. Standardi o hidravličnih lastnostih vodovodnih sistemov zaenkrat še niso sprejeti.

2.4.1 Meritve tlaka

Tlaki se merijo po celotnem vodovodnem sistemu za nadzorovanje kvalitete oskrbe s pitno vodo in za zbiranje podatkov, kateri se kasneje uporabljajo za umerjanje modela. Tlak se ponavadi meri na požarnih hidrantih, lahko pa tudi na črpalnih postajah in na različnih ventilih. V primeru, da se meritve izvajajo na merilnih mestih⁹, ki niso neposredno priključeni na glavni vodovodni sistem je potrebno upoštevati hidravlične izgube med glavnim vodovodnim sistemom in merilnim mestom. Upoštevanju izgub se izognemo, če nimamo pretoka med glavnim vodovodnim sistemom in merilnim mestom. Pri merjenju tlaka pride do rahlih nihanj na merilnikih zaradi samega nihanja pretoka, zato se lahko uporablja merilnike, napolnjene z vodo, ki ta nihanja ublažijo. Merilniki tlaka dosežejo največjo natančnost, ko merimo tlake v razponu od 50% do 75% maksimalne vrednosti merilne skale merilnika. Priporočena je uporaba merilnikov, ki merijo v različnih merilnih območjih. Ponavadi se uporabljajo tisti, ki merijo v območju od 0 do 690 kPa. Za merjenje tlaka na črpalnih postajah in na mestih, kjer nastopajo povečani tlaki, je priporočljiva uporaba merilnikov z merilnim območjem do 1,380 kPa. Za izvajanje meritev na sesalni strani črpalke se uporablja posebne vakuumske merilce. Pri merjenju tlaka je potrebno upoštevati višino merilnika.

⁹ Npr.: Ventil v hiši

2.4.2 Meritve pretoka

Z meritvami pretoka, merjenih na ključnih mestih v vodovodnem sistemu, se pridobijo pomembni podatki o delovanju celotnega sistema in podatki, ki so uporabljeni pri umerjanju modela. Obstaja veliko različnih merilcev pretoka, kot so npr. venturi metri, magnetni merilci pretoka in ultrazvočni merilci. Vse vrste merilcev je potrebno sproti umerjati. Ponavadi se pretok neprestano meri na črpalnih in čistilnih postajah, redkeje pa na samem omrežju. Začasne meritve pretoka so cenovno bolj ugodne in se v praksi pogosto izvajajo za preverjanje učinka črpalk. Pogoste so tudi terenske meritve z uporabo palčnih merilcev tlaka, ki podajo višino absolutne in tlačne črte iz katere se izračuna hitrost vode v cevi¹⁰. V nalogi bodo uporabljeni ultrazvočni merilci pretoka

Položaj merilne naprave je pomemben, saj je za točnost meritve potrebno izničiti motnje, ki jih povzročajo priključki in robovi v cevi. Velja pravilo, da mora biti merilna naprava oddaljena od vira motnje (npr. koleno) vsaj za dolžino, ki ustreza desetkratnemu premeru cevi, na kateri merimo.

2.4.3 Preizkušanje hidrantnih omrežij s posebnimi testi

V tem poglavju bodo opisani testi požarne varnosti, testi linijskih trenjskih izgub, pravilnik o preizkušanju hidrantnih omrežij in postopki iskanja lomov cevi z akustičnimi instrumenti.

Pravilnik o preizkušanju hidrantnih omrežij (uradni list RS, št.22-IV.1995) obravnava vodovodne sisteme, ki delujejo kot hidrantna omrežja, in seveda tudi čista hidrantna omrežja, ki pa niso namenjena oskrbi s pitno vodo. Pravilnik določa pogoje, ki jih morajo izpolnjevati certificirane pravne osebe, ki preizkušajo hidrantna omrežja in izdajajo potrdila o njihovem brezhibnem delovanju, obseg preizkusa hidrantnih omrežij, način pridobitve pooblastila za preizkušanje hidrantnih omrežij, postopek preizkusa hidrantnih omrežij in redni tehnični nadzor nad hidrantnimi omrežji. Tako pravilnik določa, da lahko hidrantna omrežja

¹⁰ Walski, 1984a

preizkušajo fizične in pravne osebe, ki izpolnjujejo določene pogoje. Registrirani morajo biti za tehnične preizkuse in analize, zaposlenega morajo imeti vsaj enega delavca z ustrežno izobrazbo, imeti morajo ustrežno tehnično opremo, določeno s pravilnikom in pooblastilo Uprave Republike Slovenije za zaščito in reševanje za preizkus hidrantnih omrežij. Hidrantna omrežja lahko preizkuša izvajalec, če ima naslednjo opremo:

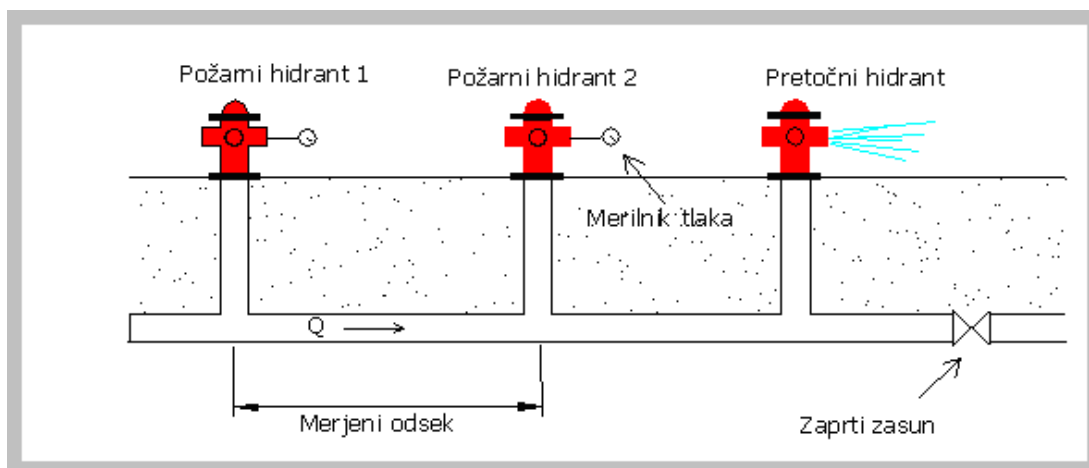
- Prehodni kos z dvema B-spojčkama in s priključkom za manometer v sredini-2 kosa
- Orodje za delo s podzemnim hidrantom (ključ za hidrant, nastavek z enim B-iztokom, ključ za spojke)-2kompleta
- Slepo spojko C-2kosa
- Ročnik s pipo-navadni C-1 kos
- Ustnike za ročnike $\Phi 8$, $\Phi 10$, $\Phi 12$, $\Phi 16$, $\Phi 18$, $\Phi 20$
- Tabelo za določanje iztoka iz ročnika pri izmerjenem tlaku pri različnih šobah
- Manometer za vodo; 0-15 bar, razred natančnosti 1

Pri tem je potrebno upoštevati, da lahko pride pri meritvah in preizkušanju do občasnih motenj v oskrbi z vodo. V izogib nevšečnostim je potrebno odjemnike predhodno obvestiti o nameravanih posegih v vodovodni sistem.

2.4.3.1 Test hidravličnih izgub

V tem poglavju je opisan postopek izračuna hrapavosti cevi na podlagi opravljenih meritev. Namen testa je neposredno določanje hidravličnih izgub in pretoka v cevi ter pridobitev podatkov za izračun hrapavosti cevi. Merjen odsek cevi je ponavadi med dvema hidrantoma. Med testom so zaprti ventili dolvodno od merjenega odseka. S tem dosežemo, da je merjeni odsek izoliran. Celotni pretok je tako usmerjen na dolvodni hidrant, kjer se meri pretok. V primeru, da vodovodni sistem ni krožen, kar pomeni, da uporabniki dobivajo vodo le iz enega dela vodovodnega sistema, pride do prekinitve oskrbe z vodo dolvodno od zaprtega ventila. Ob predpostavki, da sta poznana notranji premer in dolžina cevi, se lahko izračuna hidravlično izgubo in količino pretoka. Za izračun hrapavosti cevi sta uporabljena Hazen-Williamsov faktor C in Darcy-Weisbachov faktor.

V praksi se pogosto uporablja test z dvema merilnikoma (Two-Gage Test, angl.), kjer je merjeni odsek med dvema požarnima hidrantoma. Ventil dolvodno od merjenega odseka je zaprt.



Slika 16: Test hidravličnih izgub z dvema merilnikoma tlaka (Haestad, Walski, Chase, Savič, Water Distribution Modeling, 2001, str. 175)

Za izračun hrapavosti cevi je uporabljen Hazen-Williamsov faktor C:

$$C = \left(\frac{C_f L Q^{1,852}}{h_L D^{4,87}} \right)^{1/1,852}, \quad (46)$$

kjer je:

- C = Hazen-Williamsov faktor C,
- L = dolžina merjenega odseka cevi (m),
- Q = pretok skozi testni odsek (m³/s),
- h_L = izguba zaradi hrapavosti cevi (m),
- D = premer cevi (m),
- C_f = faktor pretvorbe enot (10,7 SI, 4,73 Angl.).

Lahko pa se uporabi tudi Darcy-Weisbachov faktor:

$$f = h_L \cdot \frac{D 2g}{L v^2}, \quad (47)$$

kjer je:

- f = Darcy-Weisbachov faktor,
- g = težnostni pospešek (9,81 m²/s),
- v = hitrost v merjenem odseku (m/s).

Hitrost je določena iz pretoka in premera cevi po enačbi:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (48)$$

Za priredbo faktorja trenja ostalim cevem je potrebno pretvoriti Darcy-Weisbachov faktor v absolutno hrapavost, za kar se uporabi izpeljava iz enačbe Colebrook-White:

$$\frac{\varepsilon}{D} = 3,7 \left[\exp \left(\frac{1}{-0,86\sqrt{f}} \right) - \frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right], \quad (49)$$

kjer je:

- ε = absolutna hrapavost,
- Re = Reynoldsovo število.

Pri gladkih ceveh nam lahko zgornja enačba poda negativne vrednosti, kar se lahko vzame kot nično trenje. To velja za hidravlično gladke cevi. Tlaki, kateri so pretvorjeni v hidravlične gradiente, so na obeh hidrantih merjeni s standardnimi merilniki tlaka. Hidravlična izguba je izračunana iz razlike gradientov tlaka med obema hidrantoma.

$$h_L = \text{HGL}_G - \text{HGL}_D, \quad (50)$$

kjer je:

- HGL_G = tlačna črta na gor-vodnem hidrantu (m),
- HGL_D = tlačna črta na dol-vodnem hidrantu (m).

Hidravlični gradient lahko enostavneje opišemo z uporabo razlike tlakov in višin med gorvodnim in dolvodnim hidrantom:

$$h_L = (P_G - P_D) + (Z_G - Z_D), \quad (51)$$

kjer je:

- P_G = tlak na gorvodnem požarnem hidrantu (kPa),
- P_D = tlak na dolvodnem hidrantu (kPa),
- Z_G = nadmorska višina gorvodnega požarnega hidranta (m.n.m),

Z_D = višina dolvodnega požarnega hidranta (m),

C_f = pretvorbeni faktor enot (0,102 SI, 2,31 Angl.).

V primeru, da nista poznani višini merilnikov na dolvodnem in gorvodnem hidrantu, se uporablja spodaj opisana enačba. V tem primeru je potrebno opraviti meritve takrat, ko je tretji pretočni hidrant odprt in takrat ko je zaprt.

$$h_L = C_f ((P_{GT}-P_{DT})-(P_{GS}-P_{DS})) \quad , \quad (52)$$

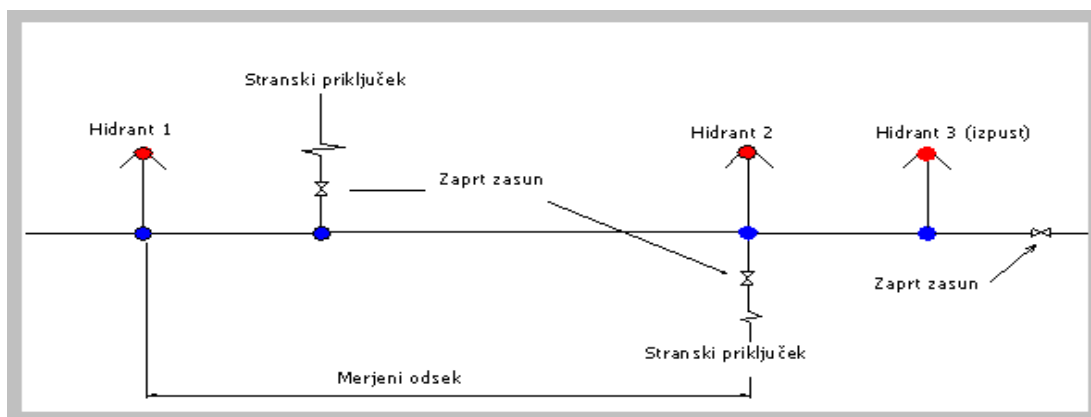
kjer je:

P_{GT} = tlak na gorvodnem hidrantu, v cevi je pretok (kPa),

P_{DT} = tlak na dolvodnem hidrantu, v cevi je pretok (kPa),

C_f = pretvorbeni faktor enot (2,31 Angl, 0,102 SI).

V skladu z metodami, ki so uporabljene za merjenje hidravličnih izgub, se celotni pretok skozi merjeni odsek odvaža skozi požarni hidrant na katerem je ventil odprt, saj je ventil dolvodno zaprt. Ko se izvaja meritve na krožnih sistemih, je potrebna podrobna analiza sistema, saj je potrebno najti alternativne poti, po katerih se bo dostavljala voda uporabnikom, ki bi sicer zaradi zaprtih ventilov ostali brez vode (Slika 17). Med meritvami so uporabniki pogosto priključeni na merjeni odsek cevi. Za zagotovitev ustreznih rezultatov mora biti poraba vode uporabnikov na merjenem odseku zanemarljivo majhna v primerjavi s pretokom skozi merjeni odsek.



Slika 17: Osamitev merjenega odseka z stranskimi ventili (Haestad, Walski, Chase, Savič, Water Distribution Modeling, 2001, str. 175)

Test hidravličnih izgub da podatke o hrapavosti cevi, katere se lahko uporabi v matematičnem modelu. Število meritev je odvisno od proračuna določenega projekta. Ponavadi se opravi meritve na manjšem številu reprezentativnih cevi, podatke pa interpolira za celoten sistem. Eden izmed načinov za zmanjšanje količine meritev je, da se opravi teste na ceveh različnih premerov, dolžin, vrst in starosti. Rezultate se predstavi v obliki diagramov, ki prikazujejo hrapavost cevi kot funkcijo starosti cevi in njene dolžine (Ormsbee in Lingireddy, 1997).

2.4.3.2 Požarni test

V primeru požara pride do ekstremnih pogojev delovanja vodovodnega sistema oziroma do ekstremnega obtežnega primera. Kljub temu je potrebno dovajati vodo pod še sprejemljivimi hidravličnimi razmerami. V tem primeru so tlaki v vodovodnem sistemu manjši od običajnih, hitrosti pa večje.

V pravilniku o tehničnih normativih za hidrantno omrežje za gašenje požarov (Uradni list SFRJ, Petek, 26. aprila 1991) so predpisani tehnični normativi za zunanje in notranje hidrantno omrežje za gašenje požarov, ki določajo zahteve za vire, zmogljivost, pretok in tlak vode v hidrantnem omrežju. Pravilnik določa, da je skupna količina vode, potrebna za gašenje požara količina vode, potrebna za najmanj 2-urno gašenje z zunanjim in notranjim hidrantnim omrežjem, in količino vode, potrebne za druge sisteme za gašenje požara za toliko časa, kolikor je predvideno za te sisteme. Za napajanje hidrantnega omrežja se uporablja vsak vir, katerega zmogljivost lahko zagotovi potrebno količino vode take kakovosti, da jo je mogoče uporabiti za gašenje požara. Razdalja med zunanjimi hidranti se določi v odvisnosti od namena, velikosti in podobnih karakteristik objekta, tako da je mogoče požar na vsakem objektu gasiti z najmanj dveh zunanjih hidrantov. Dovoljena razlika med hidrantoma je največ 80m. V naseljenih krajih, katerih so večinoma stanovanjski objekti, je razdalja med zunanjimi hidranti največ 150m. Cevi razdelilnega cevovoda v omrežju hidrantov in cevi za posamezen hidrant morajo imeti premer po izračunu, vendar ne manjši od 100mm. Potreben tlak v zunanjem hidrantnem omrežju se izračuna v odvisnosti od višine objekta in drugih pogojev, vendar ne sme biti manjši od 2,5 bar. Za požarno varnost je potrebna neprestana kontrola vodovodnega sistema, kar se zagotavlja s požarnim testom. Količina vode v sekundi za

gašenje požarov v naseljih mestnega značaja, v odvisnosti od števila prebivalcev in računskega števila istočasnih požarov, je navedena v prilogi (B).

a) Izračun požarnega testa po pravilniku (URL RS, št.22; 22.04.1995)

Izvajalec preizkuša hidrantno omrežje po naslednje postopku:

1. Izmeri in zapiše se statični tlak na rezidualnem (B) in pretočnem hidrantu (A) (Slika 21) – to je tlak p_s (bar).
2. Na hidrantu A se namesti ročnik s šobo premerov od 8mm do 20mm (izbere se tako šobo, da bo padel tlak na hidrantu A pri odprtju ročnika za približno 1 bar od prej izmerjenega p_s).
3. Ventil hidranta A se odpre do konca. Vodo se pusti teči eno minuto tako, da se tok umiri nato se odčita tlak na hidrantu A in hidrantu B. Tlak na hidrantu B se vpiše v razpredelnico (Merilni list) pod p_{rB} , tlak na hidrantu A pa pod p_{rA} .
4. Po tabeli se odčita količino vode (l/s), ki izteče iz ročnika pri tlaku p_{rA} . Ta količina se vpiše v razpredelnico v merilni list pod Q.
5. Z enačbo (50) se izračuna, za koliko bo padel tlak v mreži p_{rx} , če bo poraba vode večja od Q, pri čemer se izbere poljubno večjo porabo vode Q_x v l/s.

$$p_{rx} = p_s - \left[\frac{Q_x}{Q} \right]^2 \cdot [p_s - p_{rB}] \quad (53)$$

6. Če je treba se z enačbo (54) izračuna, koliko vode bo mreža dajala, če se pusti, da tlak pri iztekanju vode pade pod vrednost p_r .

$$Q_x = Q \cdot \sqrt{\frac{[p_s - p_{rx}]}{[p_s - p_{rB}]}} \quad \text{kjer je } p_{rx} \text{ – izbrani tlak, nižji od } p_r$$

(54)

7. Če so hidranti na slepem vodu, se pazi na smer vode, če pa so na krožnem vodu, naj bosta

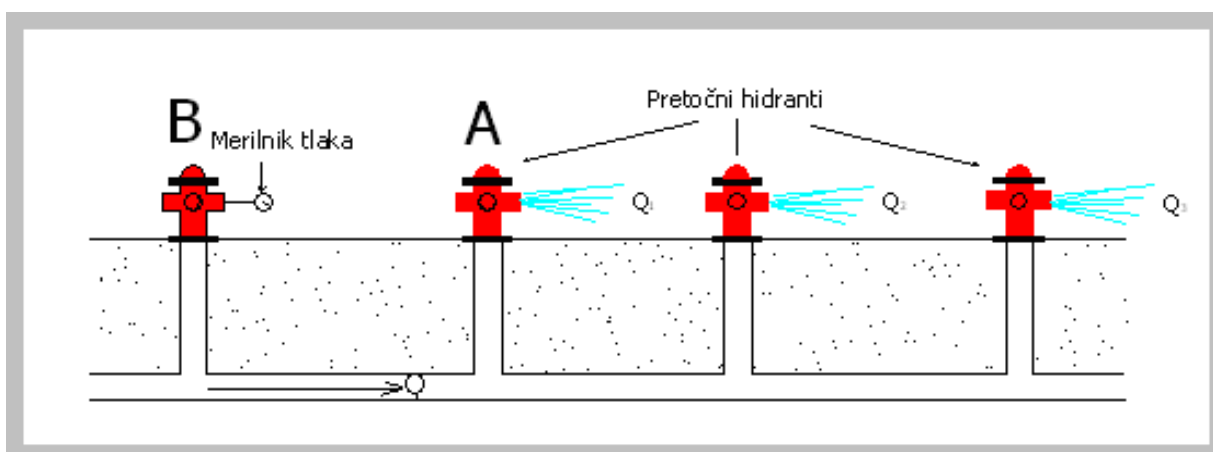
hidranta A in B čim bolj narazen. Izidi meritev se vpisujejo v merilni list.

Požarni test lahko poda zelo uporabne podatke za umerjanje modela. Za uporabo podatkov, ki so bili pridobljeni pri požarnem testu je potrebno pripisati enake karakteristike vozlišča na modelu, ki ustrezajo pretočnemu hidrantu v naravi. Po opravljeni računalniški simulaciji mora višina tlačne črte, ki predstavlja rezidualni tlak na vozlišču ustrezati višini tlačne črte, ki je bila izmerjena na rezidualnem hidrantu v testu.

b) Izvedba požarnega testa

Požarni test se opravlja tako za zagotovitev varnosti kot za simulacijo in analizo ekstremnih pogojev delovanja vodovodnega sistema. Tako se pridobijo podatki o tlakih v sistemu v statičnih pogojih in takrat, ko je pretok skozi požarni hidrant maksimalen.

Za izvedbo požarnega testa sta potrebna najmanj dva požarna hidranta (Slika 18). Na enem hidrantu se meri tlak, na ostalih pa pretok. Ko so pretočni hidranti zaprti, prvi, ti. rezidualen hidrant poda statični tlak. V primeru, ko pa so pretočni hidranti odprti, pa merilec tlaka na rezidualnem hidrantu poda rezidualni tlak. Število hidrantov, ki jih je potrebno uporabiti v požarnem testu določa padec tlaka na rezidualnem hidrantu. Ta naj bi bil najmanj 70 kPa. Na pretočnih hidrantih se uporabljajo posebni nastavki, ki preusmerijo tok vode stran od hidranta in s tem preprečijo erozijo.



Slika 18: Požarni test (Haestad, Walski, Chase, Savič, Water Distribution Modeling, 2001, str. 175)

Požarni testi so pomembno orodje za spremljanje gradienta tlaka po celotnem vodovodnem sistemu. Vendar pa je potrebno upoštevati določene probleme, ki se lahko pojavijo v procesu testiranja. Zato je priporočena uporaba raznovrstnih razpršilcev toka vode, s katerimi obvarujemo vegetacijo v smeri toka. Teste je priporočeno delati poleti, saj se s tem izognemo zaledenitvi poplavljenega cestišča. Potrebno je opozoriti uporabnike vode, saj zaradi povečanih hitrosti v cevi, v času testa lahko pride do odcepljanja oblog, ki so se nabrale tekom let v cevovodu, kar povzroči kalno vodo. Med samim testiranjem je potrebno poskrbeti, da je oskrba z vodo nemotena. Zato je priporočeno, da so rezidualni in pretočni hidranti karseda blizu.

2.5 Iskanje lomov cevi

V nekaterih primerih pride v vodovodnem sistemu do pogojev, ki niso bili predvideni v projektu. Taki primeri so na primer lom cevi, ki nastane zaradi potresa, lom cevi zaradi nepredvidene obremenitve cestišča, pod katerim je položena cev vodovoda, nepooblaščenega posega v objekte za dobavo pitne vode, nepooblaščen zlorabe požarnih hidrantov, itd. Lahko se tudi zgodi, da po opravljenih delih na cevovodu izvajalci preprosto pozabijo odpreti ventile in s tem povzročijo motnjo oskrbe s pitno vodo. Tovrstne obremenitve je težko predvideti in jih imenujemo izjemni obtežni primeri delovanja vodovodnih sistemov.

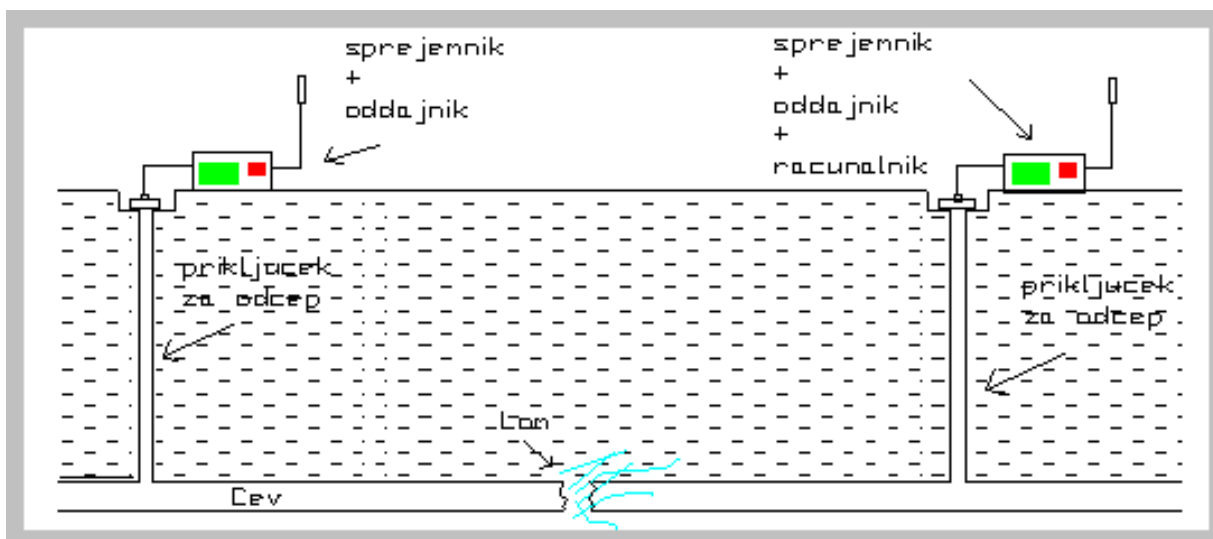
Lome cevi je potrebno poiskati z ustreznimi merilniki. Pokazatelji loma so ponavadi padci tlakov v cevovodih, do katerih pride zaradi puščanja cevi. V primeru, da pride do popolnega loma cevi, ostanejo odjemniki dolvodno od preloma cevi brez vode. Na območju, kjer obstaja sum o nepravilnosti delovanja vodovodnega sistema, je potrebno prvo opraviti meritve tlakov in pretokov¹¹, ki podajo približno lokacijo loma. Nato je potrebna natančna določiti lokacijo loma z natančnejšimi, točkovnimi iskalci loma, saj so posegi za dostop do cevovode povezani z velikimi stroški in je zato natančna lokacija loma zelo pomembna.

¹¹ Globalno določanje lomov cevi

Na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod se je izvedlo iskanja loma cevi pri izvajanju meritve, ker je meritev pretoka kazala na morebitno okvaro na glavnem cevovodu.

a) Iskanje lomov cevi z akustičnimi instrumenti

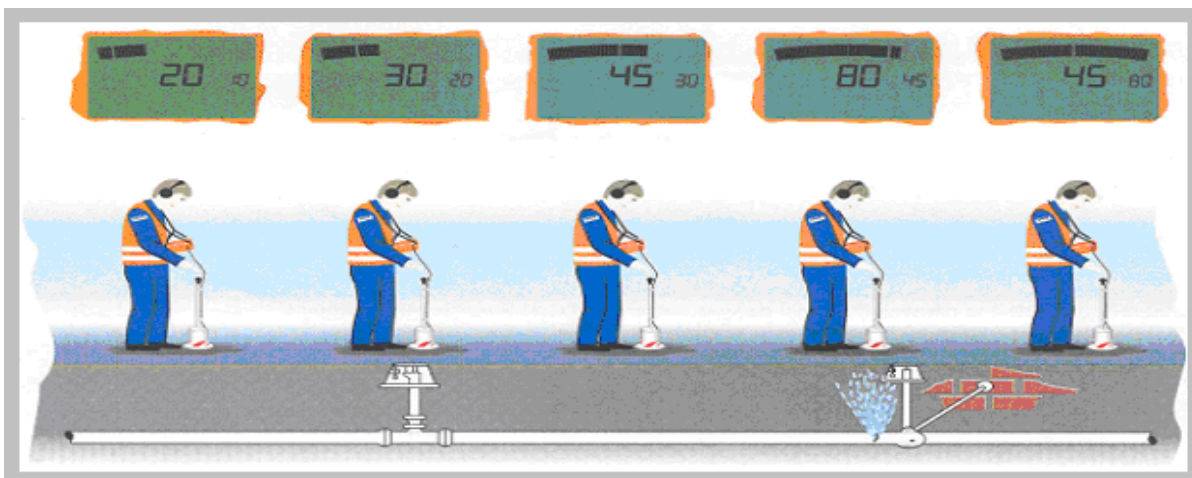
Do loma cevi prihaja zaradi različnih razlogov, kot so potres, tlačna preobremenjenost cevi, slaba namestitvev spojke med cevmi, itd. Lom cevi povzroči motnje v delovanju vodovodnega sistema, na katere ponavadi opozorijo uporabniki pitne vode. Manjši lom povzroči padec tlaka vode v cevi dolvodno, pri večjem lomu pa lahko pride do popolne prekinutve oskrbe s pitno vodo. Napako se odkriva na več različnih načinov, katere se lahko razdeli na instrumentalne načine in izkustvene načine.



Slika 19: Iskanje loma z instrumentom

Pokazatelji loma so daljše zadrževanje stoječe vode na cestišču nad počeno cevjo, taljenje snega pozimi nad lomom, itd. Instrumentalno se določa lom s pomočjo naprav za lovljenje šuma iztekajoče vode. Naprava za iskanje loma je ponavadi sestavljena iz dveh delov. Prvi del vsebuje sprejemnik in oddajnik, drugi del pa sprejemnik in oddajnik z računalnikom. Oba dela zaznavata šum vode na podlagi frekvence, ki jo ta oddaja. Boljše naprave imajo vgrajene filtre, ki ločijo šum vode od ostalih šumov, ki jih povzročajo avtomobili, pešci in ostali moteči dejavniki. Naprava ponavadi sporoči položaj loma oziroma dolžino odseka cevi, na kateri naj bi se šum nahajal. Lom je potrebno naknadno določiti s točkovnim lovilcem šuma.

Natančen položaj loma je zelo pomemben, saj je potrebno poškodovan odsek cevi odkopati, velikost odkopa pa je pogojena z velikimi stroški.

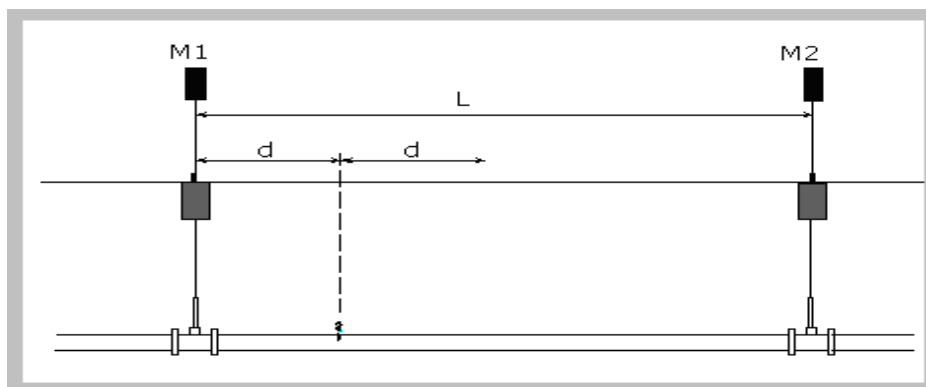


Slika 20: Točkovni lovilec šuma (Katalog proizvajalca Sewerin-Aquafon, str.2)

Pri poškodbah na vodovodnih ceveh voda pod velikim tlakom izteka v zemljo, zato pride do vibriranja cevi okoli mesta napake. Ta šum se prenaša tudi po cevi do kontaktnih mest, kot so armature in ostali elementi, kjer ga je mogoče zaznavati. Prav tako se šum iztekajoče vode pod zemljo širi na površje, kjer ga je z mikrofonom mogoče zaznati. Pri uporabi elektroakustičnega iskanja napak na cevovodih je zelo pomemben sluh operaterja. Ob ustreznem šolanju in izkušnjah se osebo lahko usposobi do te mere, da s pomočjo naprave brez problemov loči šum napake od ostalih šumov.

b) Odkrivanje napak s pomočjo korelacije

Korelacija je računalniško podprt postopek za odkrivanje napak na zakopanih cevovodih. Šum, ki ga ustvarja puščanje vode skozi razpoko v cevi se širi z enako hitrostjo na oba konca cevi (Slika 21).



Slika 21: Shematski prikaz odkrivanja napak s pomočjo korelacije.

Mikrofona, na vsakem koncu en, zaznata šum in preko brezžične povezave pošljeta podatke na korelator. Ker šum potuje po različno dolgih ceveh do mikrofonov različno dolgo, nastane med obema signaloma določena časovna razlika. Na osnovi te razlike korelator nato določi mesto napake.

Matematični zapis enačb korelacije je naslednji:

$$\Delta t = \frac{L - 2d}{v}, \quad (55)$$

$$d = \frac{L - v \cdot \Delta t}{2}, \quad (56)$$

kjer je:

v = hitrost zvoka,

Δt = zakasnitev zvoka,

M1 = merilna točka št. 1,

M2 = merilna točka št. 2,

d = razdalja napake do točke M1,

L = merilna razdalja.

Prednosti korelatorjev so objektivni rezultati, ki niso odvisni od slušnih sposobnosti slušatelja, ni motečih vplivov okolice, zato se lahko meritve izvajajo tudi podnevi. Globina cevi ter vrsta podlage v katero je cev zakopana za uspešnost meritve nista pomembni.

3 OBMOČJE VS LJUBLJANA-BROD

Na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod so bile opravljene meritve tlakov in pretokov ter izvedena testa hidravličnih izgub in požarni test. V tem poglavju bo opisan vodovodni sistem Ljubljana-Brod, strojna oprema za izvajanje meritev javnega podjetja Vodovod-Kanalizacija in reducirni ventil v reducirni postaji Brod.

3.1 Opis vodovodnega sistema Ljubljana Brod

Prebivalci mesta Ljubljane¹² in bližnjih primestnih naselij se s pitno vodo oskrbujejo iz centralnega vodovodnega sistema, ki kot razvejana mreža leži pod urbanimi površinami mesta. Nekatera manjša naselja v okolici mesta, ki so od osrednjega dela in tudi od črpališč centralnega sistema preveč oddaljena, da bi jih bilo mogoče navezati nanj, ali pa ležijo mnogo višje od črpališč centralnega sistema, se oskrbujejo s pitno vodo iz lokalnih vodovodnih sistemov.

Vodni vir centralnega vodovodnega sistema so prodni vodonosniki Ljubljanskega polja in Barja, kjer se podzemna voda izkorišča v petih vodarnah. Nadzor nad omrežjem se dnevno izvaja vizualno s pregledom trase vodovoda in ustreznosti delovanja zapiral in hidrantov, jaškov in naprav v njih in odzračevalnih ventilov. Z merilnimi napravami se spremlja pretok in tlak na posameznih točkah sistema, razlike med izmerjenimi in pričakovanimi ali

¹² Spletna stran javnega podjetja VO-KA

izračunanimi vrednostmi pa dokazujejo, da je potrebno območje, kjer je bila meritev opravljena, podrobneje pregledati.

Del vodovodnega sistema mesta Ljubljane je tudi vodovodni sistem Brod, kjer so bile opravljene meritve tlakov in pretokov. Vodovodni sistem Brod se preko reducirne postaje napaja iz vodovodnega sistema Vižmarje, ki dobiva vodo iz črpališča Šentvid. Naloga reducirnega ventila je, da zmanjša tlak 6,5 bar, ki pride iz Vižmarij, na 3,6 bar v naselju. Tehnični podatki so podani v tabeli (5):

Tabela 5: Tehnični podatki o VS Ljubljana Brod¹³

Število hišnih priključkov	864
Poraba vode	422,9 m ³ /dan
Št. oskrbovanih oseb	3361
Površina	1.075.384 m ²
Vodovarstveni pas	II. B
Skupna dolžina cevi	17.459 m

Vodovodni sistem Brod je krožni sistem, tako da vsak odjemnik dobi vodo iz dveh strani sistema. Cevi so zgrajene iz različnih materialov, od katerih prevladuje alkat. Premer cevi znotraj naselja je večinoma $\Phi 100\text{mm}$. Situacija vodovodnega sistema Ljubljana Brod je podana v prilogi (C).

3.2 Merilna oprema JP VO-KA

V tem poglavju bodo podrobneje predstavljeni merilni instrumenti javnega podjetja Vodovod-kanalizacija, ki so bili uporabljeni pri izvajanju meritev in testiranj hidrantnih omrežij na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod.

3.3.1 Merilnik pretoka –Krohne – UFM 610 P

Prenosni merilnik pretoka UFM 610 P proizvajalca Krohne je naprava za izvajanje meritev pretoka tekočin v ceveh. Prednosti naprave so, da nima neposrednega stika z merjeno

¹³ Vir: Arhiv JP VO-KA

tekočino, ne povzroča padca tlaka na merjenem mestu, električna prevodnost, tlak in gostota tekočine nimajo vpliva na meritve, je enostavna za uporabo, potrebuje malo vzdrževanja in energije ter ima majhne stroške obratovanja.

Deluje na principu dveh ultrazvočnih odjemnikov, ki se pritrdita na zunanjo ostenje cevi. Vsak odjemnik oddaja in sprejema ultrazvočne signale in jih pretvori v digitalno obliko. Napravi merila pretoka v različnih merskih enotah, kot so m^3/h , m^3/min , m^3/s , g/min , kg/h , l/min in l/s .

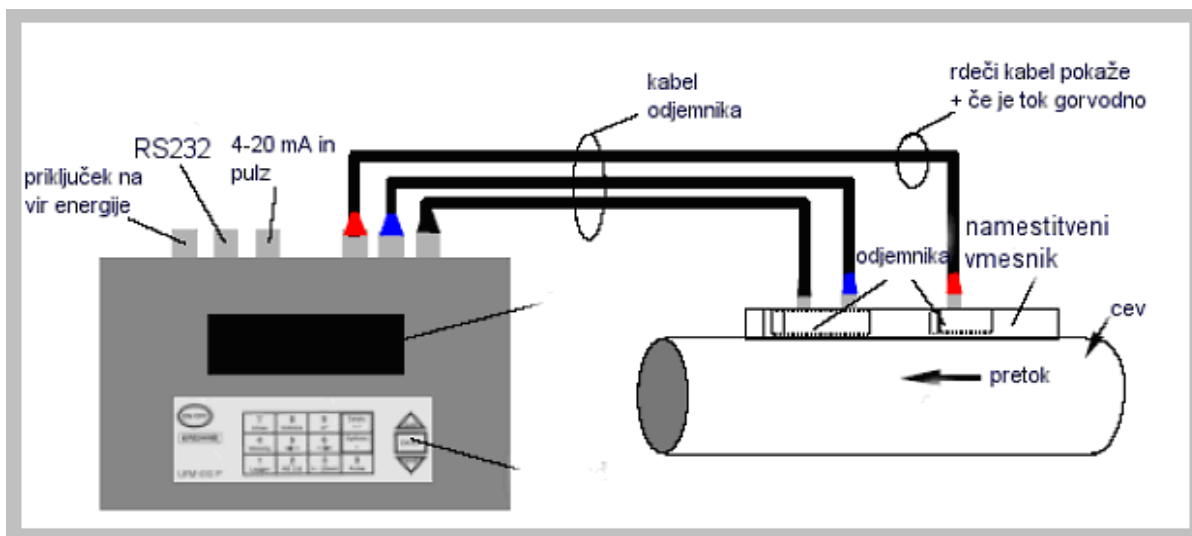


Slika 22: Merilnik pretoka Krohne-UFM 610 P



Slika 23: Osnovna oprema

Merilna naprava je primerna za cevi s premeri od 13 do 5000 mm, v katerih je pretok v območju od 0,1 do 100.000 m^3/h . Temperatura cevi ne sme preseči $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, Reynoldsovo število pa mora biti večje od 100.000. Signal zajema do 100-krat v sekundi. Merilnik je opremljen z akumulatorsko baterijo, ki omogoča delovanje brez vmesnega polnjenja do 24ur. Po vnosu osnovnih parametrov, merilnik priporoči vrsto in lego sond. Pri montaži je potrebno biti pozoren na smer pretoka in lego odjemnikov. Izbrati je potrebno tako mesto, da je pred prvim odjemnikom vsaj 20 premerov ravnega dela cevi in za drugim odjemnikom vsaj 10 premerov ravnega dela cevi zato da se izognemo vplivu motenj.



Slika 24: Priklop merilnika in smer pretoka medija

Položaj odjemnikov mora biti med vodoravno lego in kotom 45° . Odstopanje od zahtevanih pogojev vpliva na merilni rezultat. Pri namestitvi sond je zelo pomemben dober prenos signala med sondami in cevjo. Mesto pritrditve mora biti dobro očiščeno. Priporoča se uporaba priložene masti za izboljšanje stičnih površin. Pri namestitvi je potrebno upoštevati priporočeno razdaljo med posameznimi odjemniki. Pred pričetkom meritve, se lahko s spreminjanjem pozicije poskusi poiskati najboljši signal. Vrednost signala je izpisana na prikazovalniku. Za izvedbo same meritve je zelo pomemben natančen podatek o debelini cevi in morebitni oblogi. Oba podatka vplivata na prenosno dolžino in na vrednost za preračun volumskega pretoka.

Merilnik lahko shrani podatke v 240 podatkovnih blokov, v vsak blok lahko shrani 240 podatkov. Po vsaki prekinitvi merilnik zasede nov blok. Podatke se lahko pregleduje in analizira s pomočjo grafa na prikazovalniku med ali po meritvi. Ravno tako se lahko podatke prenese preko standardnega računalniškega vmesnika na osebni računalnik in jih s pomočjo urejevalnika tabel analizira glede na potrebe. Postopek za prenos podatkov je zelo enostaven in hiter, poleg povezovalnega kabla se ne potrebuje nobenih dodatkov.

Meritve se lahko opravlja po uspešni namestitvi merilnih sond in izvedenih nastavitvah merilnika. Med meritvijo se lahko preklaplja med posameznimi merilnimi enotami in načinom meritve (pretok, hitrost). Vse to se opravlja z izbiro med tipkami na tipkovnici.

Opravlja se lahko trenutne meritve ali daljše opazovanje in rezultate shranjuje v pomnilnik. Med meritvami se lahko uporablja analogni tokovni signal za nadaljnjo obdelavo ter pulzni signal za prenos pretečenih količin. Na voljo je tudi RS232 izhod. S pomočjo pomnilnika se lahko vnaprej določi posamezna merilna mesta in s tem poenostavi meritve, saj se le izbere merilno mesto, pritrdite sonde in izvaja meritve. Začetek in konec meritve se lahko nastavi s pomočjo interne ure.

Mediji v katerih se izvajajo meritve imajo lastno valovno dolžino, ki je snovna geometrijska lastnost, zato je potrebno izbrati ustrezen medij za izvedbo korektno meritve. Izdelan je spisek medijev, ki je vnesen v merilnik. Če se med izbranimi mediji ne najde ekvivalenta, izberemo vrednost »Other« (ostalo) in se ročno vnese valovno dolžino. Brez tega podatka se ne da opravljati meritve. Merilnik je namenjen tako prozornim kot motnim tekočim medijem. Pomembno je, da v mediju ni prisotnih več kot 3% trdnih delcev ali zračnih mehurčkov. Natančnost meritve je zelo odvisna od montažnih pogojev in izbrane merilne metode. Natančnost je odvisna od laminarnosti tokov in vnosa podatkov o cevi in oblogah, ki so lahko namensko vgrajene (npr. ob sanaciji) ali so nastale med uporabo.

3.3.2 Merilnik tlaka Memmy NT

Merilnik tlaka Memmy NT je zmogljiv 16-bitni tlačni merilnik proizvajalca Texas Instruments. Ima 8Mb FLASH pomnilnik, ki lahko shrani do 1 milijona vzorcev. Ukaze se podaja preko tipkovnice s štirimi tipkami. Ima tudi 8 delni ekran za prikaz ali spremembo parametrov na terenu. Naložljiv uporabniški program omogoča boljšo rabo energije pomnilnika. V spomin shrani do štiri različne meritve. Ima zmogljivo uporabniško aplikacijo za PC za Windows OS (Win95, Win98, Win2000, Win NT, Win Me ter Win XP). Možen je izvoz merjenih podatkov neposredno v program Excel skozi vmesnik OLE-2. Merilnik dela na principu projektov. Projekt je delovno okolje, ki zajema privzete nastavitve, uporabniške programe, servisne grupe in zbrane podatke.



Slika 25: Merilnik tlaka Memmy NT



Slika 26: Merilnik postavljen na hidrant

Tak pristop omogoča enostavnejše delo z ogromnimi količinami zbranih podatkov iz različnih zbiranj na različnih lokacijah in z različnimi metodami. Projekte si lahko delijo programi in servisne grupe, vendar imajo vedno različne datoteke zbranih podatkov. Uporabniški program je množica ukazov za Memmy NT, kako naj vrši vzorčenje. Vsak program sestoji iz največ 30 stavkov, ki se izvajajo en za drugim. Stavki vsebujejo enostavne ukaze (RESET; TAKE SAMPLE, itd.). Ti ukazi se interpretirajo na tak način, da skupaj tvorijo uporabniški program, ki izvaja zahtevano funkcijo. PC program vsebuje za lažjo izvedbo programov možnost uporabe različnih pomočnikov (čarovnikov), ki izdelajo želen uporabniški program. Merilnik v svojem spominu hrani 4 različne programe, vendar se v danem trenutku lahko izvaja le en program, ki se imenuje aktivni program. Merilnik MemmyNT je zgrajen iz več enot z različnimi funkcijami. Enote so del strojne opreme, ki izvajajo določeno vrsto meritev. Te enote lahko izvajajo meritve na različne načine, z različno resolucijo, hitrostjo in na različne načine. Natančnost merilnika je 0,05% maksimalne vrednosti merjenega območja in se jo preverja enkrat na leto v merilnem laboratoriju JP VO-KA.

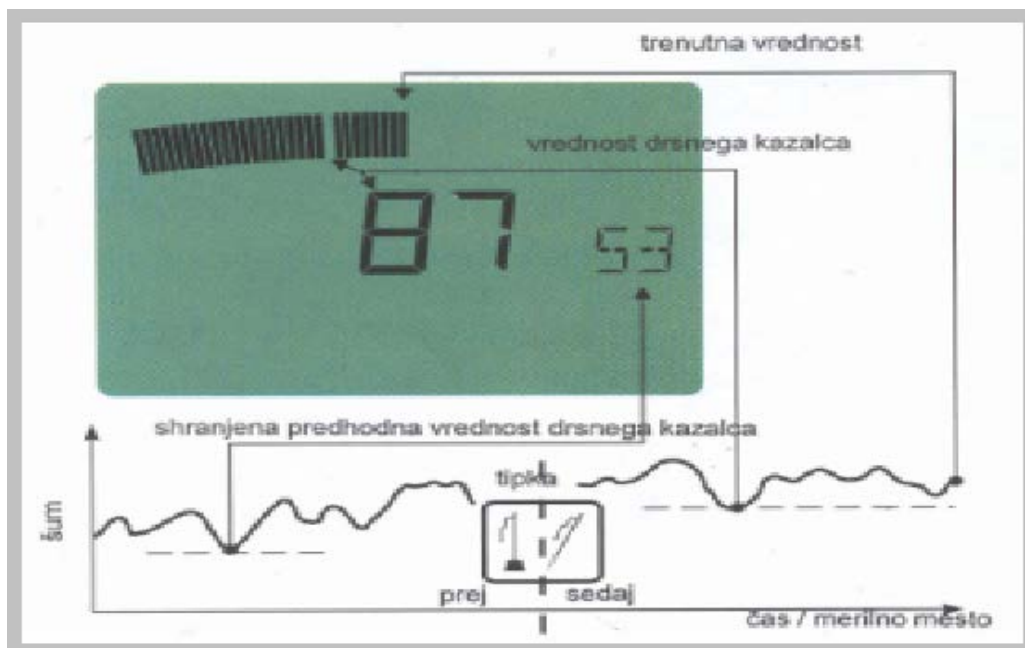
3.3.3 Naprava za lokalno odkrivanje šuma Sewerin-AQUAPHON

Naprava se uporablja za elektroakustično iskanje napak na cevovodih. Sestavljena je iz več komponent (Slika 27).



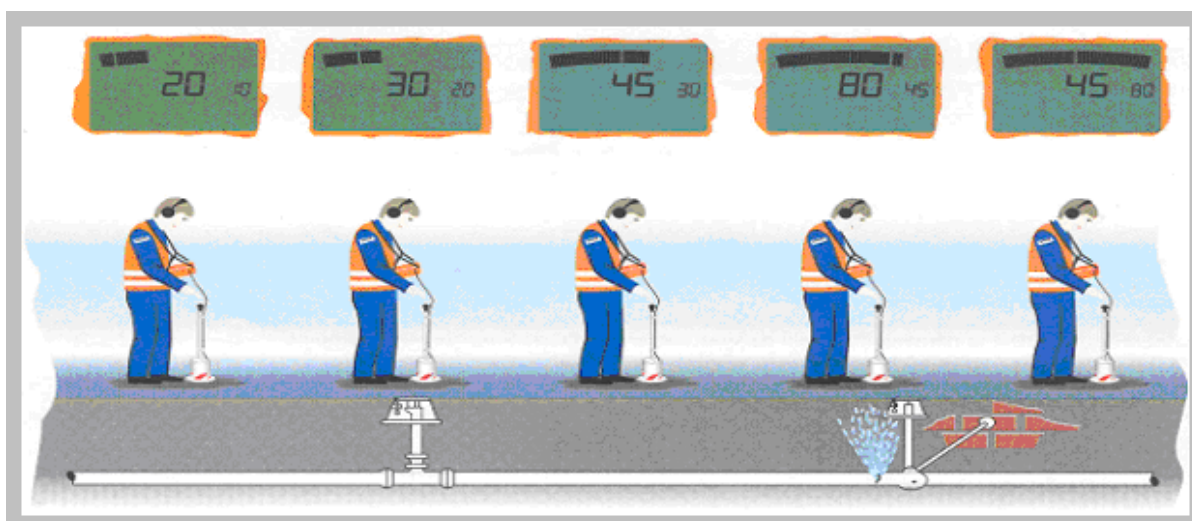
Slika 27: Sestavni deli naprave za odkrivanje šuma Sewerin- AQAFHON (Katalog proizvajalca Sewerin,-Aquaphon, str.3)

Talni mikrofoni BO-4 spada v osnovno opremo naprave. Posebej primeren je za ravne trde površine. Izolacija in ščitnik iz masivne kovine z akustično izoliranim jedrom, ki je fleksibilno vpeto v podstavek, omogoča dober in stalen kontakt s površino. Talni mikrofoni 3P-4 je namenjen za delo na vseh ostalih površinah, še posebej pa je primeren za delo na naravnih tleh. Za mehke terene se na konec mikrofona privije konico, ki se jo zapiči v tla, da se s tem izboljša akustični kontakt. Sprejemnik ELW ima vgrajeno avtomatsko prepoznavanje priključenega mikrofona in s tem tudi nastavljanje frekvenčnih filtrov, digitalni procesor signalov, vgrajeno zaščito sluha, avtomatsko nastavljanje filtrov, drsni kazalec, spominsko funkcijo, velik osvetljen LCD zaslon in vgrajeni akumulator s polnilno/shranjevalno tehniko in indikacijo napoljenosti. Čas delovanja je 8 ur in temperaturno območje delovanja je od 10C° do 50C°. Pogosto jakost zaznanega šuma zaradi velikih sprememb okoliškega šuma zelo niha. V teh primerih je v veliko pomoč funkcija drsnega kazalca, ki označuje najnižjo vrednost zaznanega šuma na merilnem mestu (Slika 28). Le ta je zapisana z velikimi številkami in prikazana s svetlim segmentom na analogni skali. Celotni trenutni zaznani šum je prikazan s temnimi znaki na analogni skali. Pri kovinskih cevovodih se zvok izredno dobro prenaša, zato je pri teh cevovodih kontaktni mikrofoni še posebno pomemben za grobo določitev mesta napake.



Slika 28: AQUAPHON-ELW- zaslon in pomen vrednosti (Katalog proizvajalca Sewerin,- Aquaphon, str.3)

Cevovodi iz nekovinskih materialov prenašajo zvok slabše, zato ni dovolj samo detekcija s kontaktnim mikrofonom. Traso med armaturami je potrebno dodatno pregledati s talnim mikrofonom. S poslušanjem na majhnih razmakih se določi mesto napake in s tem tudi mesto odkopa. S talnim mikrofonom se hitro prepozna šum iztekajoče vode, medtem ko je natančna lokacija zaradi razpršenosti šuma težko določljiva. Detektor ima vgrajeno funkcijo avtomatskega nastavljanja oziroma prilagajanja filtrov za določitev mesta napake in odkopa.

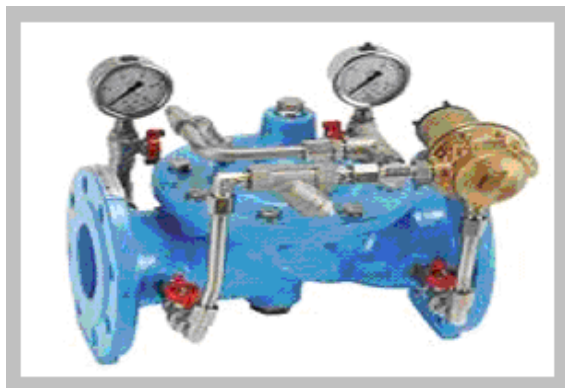


Slika 29: Zaznavanje šumov iztekajoče vode s napravo odkrivanja šuma Sewerin-AQAFHON (Katalog proizvajalca Sewerin-Aquaphon, str. 5)

Naprava stalno analizira zaznan šum. Pri zelo glasnem šumu, ga začne sprva dušiti, nato pa se pri nenadnem povečanju glasnosti nenadoma izklopi. Ko vir povečanega hrupa izgine, se naprava ELW samodejno vklopi in nadaljuje z delovanjem.

3.3 Reducirni ventil Hawle 1500

Na območju vodovodnega sistema Ljubljana-Brod je vgrajen reducirni ventil proizvajalca Hawle tip 1500. Njegova naloga je zmanjšanje tlaka vode, ki prihaja iz vodovodnega sistema Vižmarje iz 6,5 bar na 3,6 bar. Z meritvami je bila opažena tudi problematika reducirnega ventila, saj deluje le na 10 % celotne zmogljivosti. V primeru hipnega povečanja tlaka bi lahko prišlo do okvare ventila in poškodbe cevododa dolvodno od ventila. Meritve, ki bodo podrobneje opravljene na vodovodnem sistemu, bodo podale podatke o delovanju ventila. V primeru, da ne bo zadosti tlaka v ceveh in vodovodni sistem ne bo zadostil pravilniku o požarni varnosti¹⁴, bo potrebno zmanjšati redukcijo tlaka do ustrezne veličine¹⁵.



Slika 30: Reducirni ventil Hawle 1500 (Spletna stran podjetja Hawle)

¹⁴ URL RS, št.22; 22.04.1995

¹⁵ Maksimalno do 7 bar

Namestitvene dimenzije ventila so v skladu s standardom DIN EN 558-1 in DIN 3230-4. Notranji deli ventila so zgrajeni iz nerjaveče litine. Ventil je vgrajen v cev premera 200 mm. Koeficient ventila se izračuna po enačbi:

$$K_z = \frac{Q_{o\max}}{\sqrt{\Delta p}}, \quad (57)$$

kjer je:

K_z = koeficient ventila (m^3/h),

$Q_{o\max}$ = maksimalni želeni pretok (m^3/h),

Δp = minimalna razlika tlaka pred in za ventilom (bar).

Pred ventilom je vgrajen lovilce nesnag proizvajalca IMP Tovarna armatur Tip-030-031. Tehnični podatki o lovilcu nesnag so podani v tabeli (6). Slika je podana v prilogi (D)

Tabela 6: Dimenzije lovilca nesnag (Katalog proizvajalca IMP za tip 030-031, str.1)

DN (mm)	L (mm)	B (mm)	A (mm)	Normalno sito Kz (m^3/h)	Fino sito Kz (m^3/h)	Normalno sito ζ (-)	Fino sito ζ (-)	Masa (kg)
200	600	580	360	738,00	692,10	4,70	5,34	116,63

4. OBDELAVE IN ANALIZE MERITEV

V tem poglavju bo opisana zasnova in izvedba meritev za analize izmerjenih vrednosti tlaka in pretoka na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod. Meritve so se izvajale z merilci tlaka in pretoka, ki so opisani v prejšnjem poglavju. Pri iskanju vzroka za neuspelo meritev pretoka je potekalo iskanje loma v cevovodu na cesti Na klanec. Izračunana bo ocena negotovosti meritev po standardu ISO-5168. V zadnjem delu poglavja bodo podane ugotovitve o sistemu in analiza meritev.

4.1 Meritve

Meritve tlakov in pretokov so bile opravljene z namenom, da se pridobi podatke o delovanju in požarni varnosti vodovodnega sistema Ljubljana-Brod. Izvedena sta bila testa hidravličnih

izgub in test požarne varnosti. Meritve so potekale v sodelovanju s službo vzdrževanja omrežij JP VO-KA. Shematski prikaz meritve za izvedbo požarnega testa je v prilogi (E).

4.1.1 Zasnova meritev

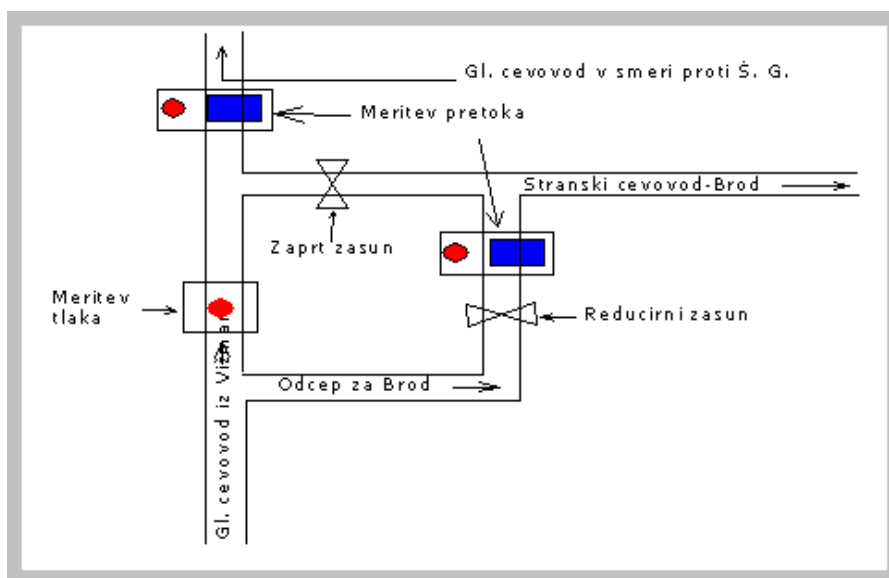
Meritve tlaka so bile opravljene z merilci tlaka Memmy na šestih točkah, meritve pretoka pa z merilci pretoka Krohne UFM-610P v treh točkah v sistemu.



Slika 31: Merilci pretoka in tlaka na območju meritev (T-meritev tlaka, Q-meritev pretoka)

Z meritvijo tlaka in pretoka v reducirni postaji in pretoka na cevovodu Na klancu so bili določeni robni pogoji vodovodnega sistema. Meritve tlaka v okolici Kmetijske zadruge Medvode so služile za izračun koeficienta hrapavosti cevi in za izračun požarne varnosti (Slika 32). Meritev tlaka Na Gaju je omogočala pregled nad nihanjem tlakov v desni zanki vodovodnega sistema.

V reducirni postaji je bil merjen tlak na glavnem cevovodu, za odcepom stranskega cevovoda za naselje Brod. Pretok je bil merjen za reducirnim zasunom in na glavnem cevovodu pred in po odcepu za Brod (Slika 32).



Slika 32: Meritve v reducirni postaji

Na istem območju je bila predhodno opravljena tudi tridnevna meritev tlaka na treh točkah v sistemu, in sicer na črpališču Šentvid, iz katerega dobiva vodo območje Broda, na Gaju in v reducirni postaji Brod.

4.1.2 Meritve za analize izmerjenih vrednosti tlaka in pretoka

Izmerjene količine bodo s pomočjo računalniškega vmesnika prenesene v program Excel in so predstavljene v nadaljevanju. Merilci tlaka in pretoka podajo podatke neposredno v obliki izmerjenih veličin¹⁶. Obdelani podatki bodo predstavljeni v grafični obliki. Iz obdelanih podatkov so bile kasneje izračunane hidravlične izgube v cevovodu in požarna varnost vodovodnega sistema Ljubljana-Brod.

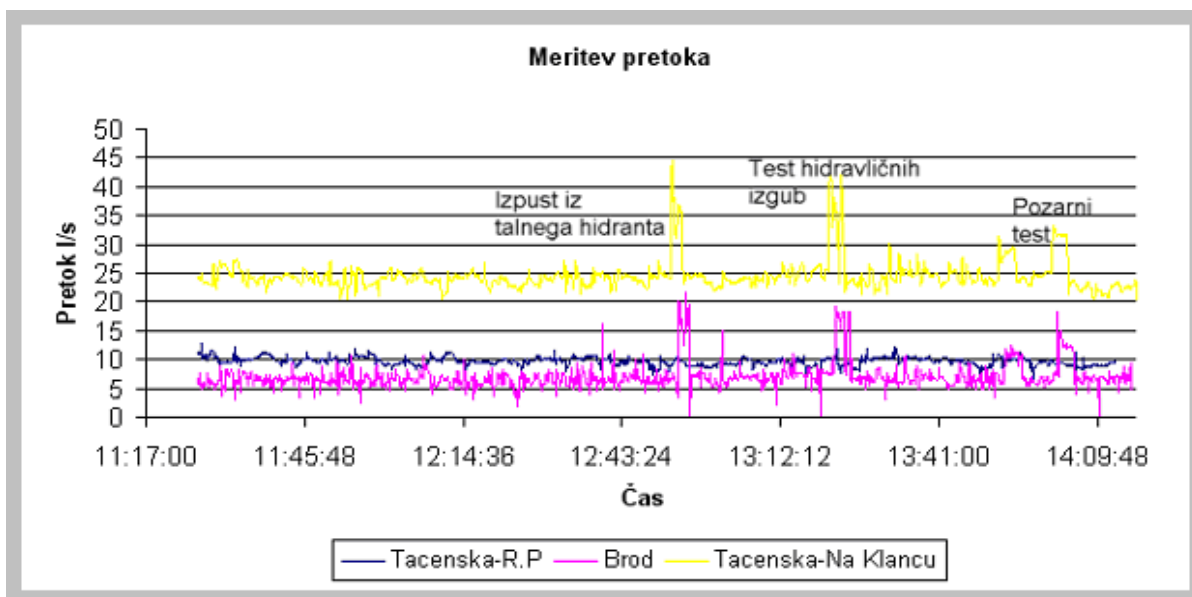
4.1.2.1 Meritev pretoka na VS Ljubljana-Brod

Meritve je bila izvedena dne 21.10.2005 med 9h in 15h s tremi merilci pretoka Krohne UFM-610P¹⁷, ki so zajemali podatke o pretoku na vsakih pet sekund, v sodelovanju s službo vzdrževanja omrežja JP VO-KA. V grafu meritve pretoka so opazna nihanja pretoka v

¹⁶ Merilec tlaka poda v tabelarični obliki v programu Excel izmerjeni tlak, merilec pretoka pa izmerjeni pretok.

¹⁷ Opisani v poglavju 3.3.1

odvisnosti od časa. Prvi dve večji odstopanji sta posledica izpusta vode iz požarnih hidrantov za izvedbo testa hidravličnih izgub in testa požarne varnosti. Iz grafa je razvidno hipno povečanje pretoka, ki ga pokažeta merilni napravi v reducirni postaji za reducirnim zasunom in na Tacenskem klancu (Graf 6).



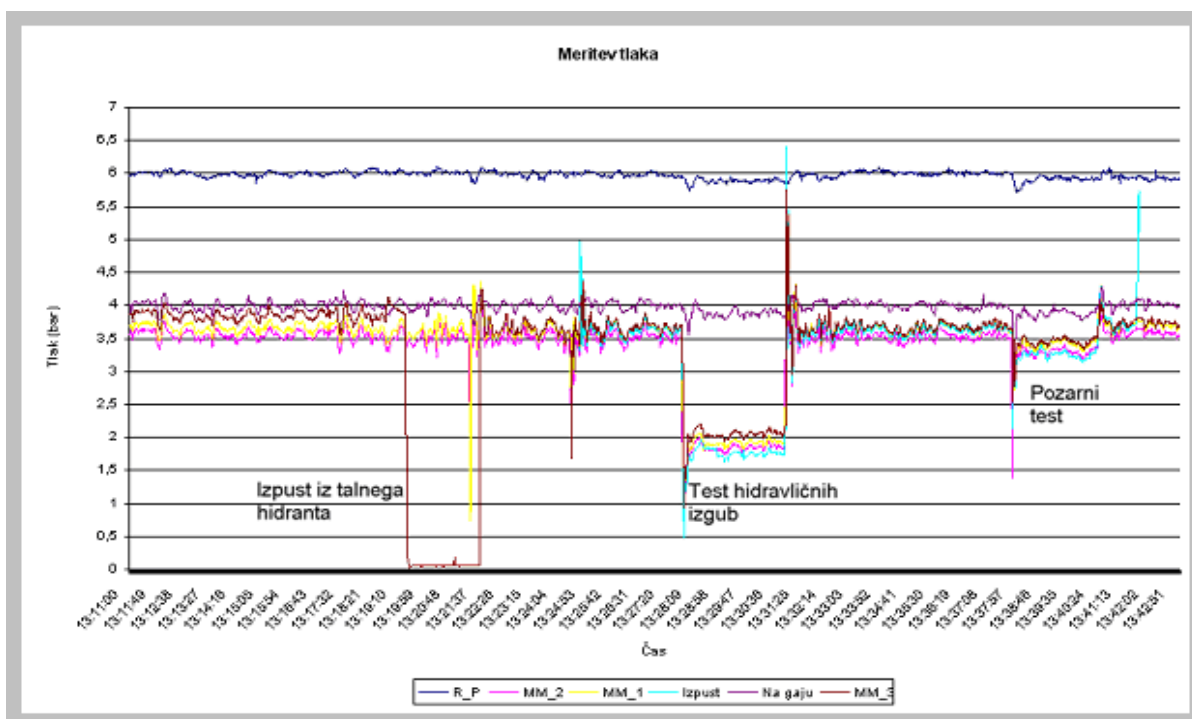
Graf 6: Meritev pretoka

Nihanje pretokov v samem vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod nima vpliva na pretok vode dolvodno od reducirne postaje, kar je razvidno iz grafičnega prikaza (graf 6). Primer izpisa iz merilca tlaka, za meritev požarne varnosti je podan v prilogi (F).

4.1.2.2 Meritev tlaka na VS Ljubljana-Brod

Meritve je bila izvedena dne 15.11.2005 med 9h in 15h s šestimi merilci tlaka Memmy¹⁸, ki so zajemali podatke o tlaku v sistemu za vsako sekundo. Prvi padec tlaka je nastal zaradi izpusta vode iz talnega hidranta. Drugi padec tlaka je posledica testa hidravličnih izgub, tretji pa požarnega testa. Nihanja tlakov prikazuje graf (7).

¹⁸ Opisani v poglavju 3.3.2



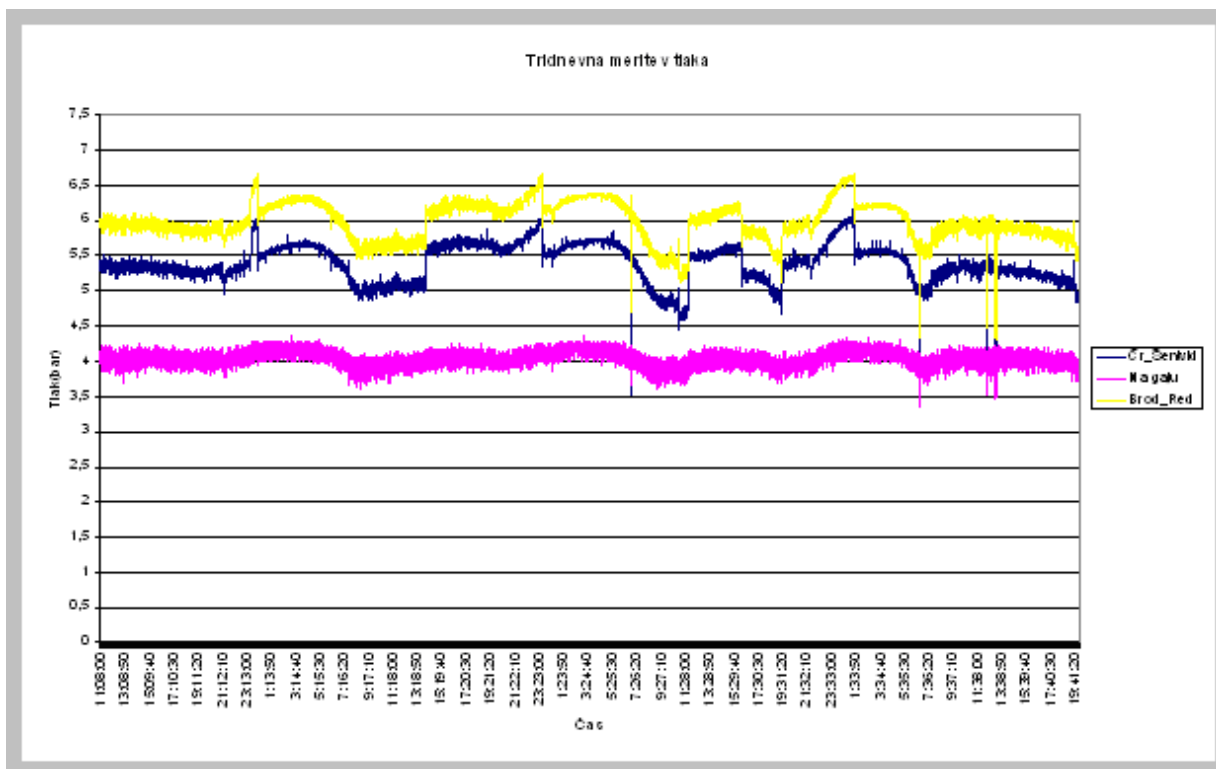
Graf 7: Meritev tlaka

V trenutku, ko se odpre požarni hidrant, tlaki padejo na nično vrednost, potem pa se, ko pride voda do merilca, zopet dvignejo na neko vrednost, ki je manjša od začetne. Na podlagi te razlike se opravi izračun hidravličnih izgub v cevovodu in požarni test¹⁹.

4.1.2.3 Tridnevna meritev tlaka na VS Ljubljana-Brod

Predhodno, med 20.09.05 in 22.09.05 je bila opravljena tudi tridnevna meritev tlaka v vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod. Namen meritve je bilo opazovanje dnevnih in nočnih nihanj tlaka. Meritev je izvedla služba vzdrževanja omrežja JP VO-KA s tremi merilci pretoka Memmy. Meritve so bile izvedene na merilnem mestu Na gaju, v reducirni postaji Brod (prikaz merilnih mest na sliki 32 in 33) in na črpališču Šentvid. Črpališče Šentvid ni označeno na sliki 33, saj leži izven VS Lj.-Brod). Uporabljeni so bili isti, že opisani merilni instrumenti. V grafu (7) so prikazane tridnevne vrednosti tlakov.

¹⁹ Primer izpisa iz merilca tlaka Memmy za požarni test je podan v prilogi (F)



Graf 8: Tridnevna meritev tlaka

Meritve bo služila za primerjavo merilne negotovosti ostalih meritev tlaka, ki so bile opravljene za izvedbo testa hidravličnih izgub in testa požarne varnosti.

4.2 Ocene negotovosti meritev

Ocena negotovosti meritve bo opravljena v skladu s standardom ISO-5168 in bo z uporabo programa Excel izračunana za vsako merilno mesto posebej. Postopki izračuna so podrobneje predstavljeni v poglavju (2.2.1). Za primer je v prilogi H podan postopek izračuna ocene negotovosti meritve tlaka za izvedbo testa požarne varnosti.

Podatki za izračun so podani v prilogi G. Vse ostale negotovosti meritev so bile izračunane po istem postopku. V nadaljevanju so podani zgolj rezultati. V Tabeli 7 je prikazan seznam in namen meritev, katerih negotovost je izračunana v nadaljevanju.

Tabela 7. Seznam, namen in lokacije meritev

MERILNO MESTO	T1	T2	T3	T-izpust	Reducirna postaja	Na klancu	Na gaju
TLAK	X (Opazovanje nihanja tlaka v sistemu)	X (Opazovanje nihanja tlaka v sistemu)	X (Test hidr. izgub in požar. varnosti)	X (Test hidr. izgub in požar. varnosti)	X (Opazovanje nihanja tlaka v sistemu)		X (Opazovanje nihanja tlaka v sistemu)
PRETOK					X (Pretok se je meril pred in za odcepom cevi za Brod)	X (meritev za določitev robnih pogojev sistema)	

Situacija merilnih mest je prikazana na sliki (31).

4.2.1 Ocena negotovosti meritev pretoka

Vsota pretoka dolvodno od reducirne postaje in pretoka za Brod bi morala biti enaka skupnemu pretoku pred reducirno postajo²⁰. Za izračun parametrov negotovosti je bil vzeta niz podatkov, za katere se predpostavi, da so bili izmerjeni v času, ko je bil pretok skozi merilna mesta konstanten. Postopek ocene negotovosti je podan v poglavju (2.1.2.1), izračun pa je prikazan v Tabeli 8.

Tabela 8: Ocena negotovosti meritve pretoka

Merilno mesto		Srednja vredn.	Varianca	Standardni odmik	Stopnja svobode	Koef. variance	Stand. negot.	Razš. st. neg. (95%)
M.M	Oznaka	\bar{x}	s^2	s	ν	C_v	$u_{\bar{x}}$	$U_{\bar{x}}$
	Enota	(l/s)	(l/s) ²	(l/s)	(-)	(-)	(l/s)	(l/s)
	Tacen-Klanec	9,849	0,415	0,645	735	0,065	0,024	0,047
	R. P. -Brod	6,433	1,127	1,061	735	0,165	0,039	0,078
	R.P.-Dolvodno	24,019	1,392	1,180	735	0,049	0,043	0,087

Skupna negotovost sistema²¹ znaša $\pm 0,129$ l/s pri razširjeni standardni negotovosti²² na 95%. Preračun vrednosti izmerjenega pretoka vseh treh merilcev ne potrjuje te napake, saj je razlika med vsoto pretoka Tacen-klanec in R.P.-Brod ter R.P.-Dolvodno prevelika in ni v velikostnem območju napake. Pri računu skupne napake sistema je bila upoštevana merilna

²⁰ Glej sliki (32) in (33)

²¹ Glej poglavje 2.1.2.4, enačba 31

²² Glej poglavje 2.1.2.1, točko (i)

negotovost 2%, ki je izračunana s strani proizvajalca merilnika ob pogoju, da so podatki, vneseni v merilnik, pravilni.

Vir negotovosti je (poleg negotovosti merilne naprave) premer cevi, katerega je potrebno vnesti v merilno napravo pred merjenjem, saj je naprava zelo občutljiva na ta parameter. S staranjem cevovoda se na notranji strani lahko nabirajo obloge, ki manjšajo premer cevi.

Natančnost naprave je odvisna tudi od laminarnosti tokov. Zato je lahko drugi razlog za napako položaj merilne naprave, ki je merila pretok v smeri Broda in je bila nameščena tik za reducirnim zasunom, kateri povzroča turbulence v cevovodu, ki motijo signal naprave. Za izračun statističnih veličin je bil vzet niz podatkov v času, ko naj bi bil pretok konstanten.

4.2.2 Ocena negotovosti meritve tlaka – tridnevna meritev tlaka

Na območju vodovodnega sistema Ljubljana Brod je bila predhodno opravljena tridnevna meritev tlaka. Postopki ocene negotovosti so bili že podani v poglavju (2.1.2), izračun pa je prikazan v Tabeli 9.

Tabela 9: Ocena negotovosti meritve tlaka - Tridnevna meritev

Merilnik tlaka		Srednja vrednost	Varianca	Standardni Odmik	Stopnja svobode	Koef. variance	Standardna negotovost srednje vred.	Razšir. stand. negot.
M.M	Oznaka	\bar{x}	s^2	s	ν	C_V	$u_{\bar{x}}$	$U_{\bar{x}}$
	Enota	(bar)	(bar ²)	(bar)	(-)	(-)	(bar)	(bar)
	Črpališče Šent.	5,3403	0,0022	0,0471	2510	0,0088	0,0009	0,0019
	Na Gaju	4,0410	0,0054	0,0736	2510	0,0182	0,0015	0,0029
	Brod-R.P	5,9423	0,0030	0,0547	2510	0,0092	0,0011	0,0022

Skupna negotovost sistema²³ je $\pm 0,0041$ bar pri razširjeni standardni negotovosti²⁴ na 95%.

Pri izračunu skupne napake sistema je bila upoštevana merilna negotovost 0,5%, ki je bila podana iz strani proizvajalca.

Meritev je bila uspešna in je potrdila pričakovane vrednosti tlaka, ki so bile pridobljene s številnimi kontrolnimi meritvami v preteklosti. Vir negotovosti je, poleg negotovosti merilne

²³ Glej poglavje 2.1.2.4, enačba 31

²⁴ Glej poglavje 2.1.2.1, točko (i)

naprave, tudi razlika med višino cevi in višino merilnega mesta. Merilna naprava meri tlak vode, ki je na višini merilnega mesta in ne tlaka, ki je v cevi. Standardna negotovost meritve služi kot referenca za časovno krajše meritve tlaka, za izvedbo testa hidravličnih izgub in testa požarne varnosti vodovodnega sistema.

4.2.3 Ocena negotovosti meritve tlaka – test hidravličnih izgub

V bližini Kmetijske zadruge Medvode na Brodu je bil opravljen test hidravličnih izgub. Namen testa je neposredno določanje hidravličnih izgub, pretoka v cevi in pridobitev podatkov za izračun hrapavosti cevi. Postopek izračuna je podan v poglavju (2.4.3). Postopek ocene negotovosti je podan v poglavju (2.1.2). Izračun je prikaza v Tabeli 10.

Tabela 10: Ocena negotovosti meritve tlaka – test hidravličnih izgub

Merilnik tlaka		Srednja vrednost	Varianca	Standardni Odmik	Stopnja svobode	Koef. variance	Standardna negotovost srednje vred.	Razšir. stand. negot.
M.M	Oznaka	\bar{x}	s^2	s	ν	C_v	$u_{\bar{x}}$	$U_{\bar{x}}$
	Enota	(bar)	(bar ²)	(bar)	(-)	(-)	(bar)	(bar)
MM 1	(T1)	1,9187	0,0014	0,0381	135	0,0198	0,0033	0,0065
MM 2	(T-izp.)	1,8417	0,0017	0,0406	135	0,0221	0,0035	0,0070

Skupna napaka sistema²⁵ znaša $\pm 0,0095$ bar pri razširjeni standardni negotovosti²⁶ na 95%. Pri računu skupne napake sistema je bila upoštevana merilna negotovost 0,5%, ki je bila podana s strani proizvajalca.

Meritev je bila uspešna in je potrdila pričakovane vrednosti tlaka, ki so bile pridobljene s kontrolnimi meritvami v preteklosti. Vir negotovosti je, poleg negotovosti merilne naprave, tudi razlika med višino cevi in požarnega hidranta (merilno mesto). Merilna naprava meri tlak vode, ki je na višini požarnega hidranta in ne tlak, ki je v cevi. Prav tako je bilo predpostavljeno, da so v času zajema podatkov vrednosti tlaka konstantne, kar pa ni moč potrditi, saj je uporaba vode pri odjemnikih, ki so priključeni na vodovodni sistem neznana.

²⁵ Glej poglavje 2.1.2.4, enačba 31

²⁶ Glej poglavje 2.1.2.1, točko (i)

Za izračun hrapavosti cevi je bila izmerjena dolžina cevi med požarnima hidrantoma, ki znaša $70\text{m} \pm 1\text{m}$. Premer cevi je $\Phi 100$. Razlika med srednjima vrednostma tlakov (tabela 6) v obeh hidrantih je $0,077\text{ bar} \pm 0,0095\text{bar}$, kar pomeni da znašajo izgube v cevi zaradi hrapavosti cevi $0,77\text{m} \pm 0,095\text{m}$. Napaka v vrednosti izgub zaradi trenja v cevi je enaka skupni napaki meritev. Izračunan je bil tudi Darcy-Weisbachov faktor²⁷, ki predstavlja hrapavost cevi:

$$f = h_L \cdot \frac{D2g}{Lv^2} = 0,77\text{m} \frac{0,1\text{m} \cdot 2 \cdot 9,81\text{m} \cdot \text{s}^2}{70\text{m} \cdot 0,745\text{m}^2 \text{s}^2} = 0,039 \pm 12\% \quad (58)$$

Skupna negotovost²⁸ Darcy-Weisbachovega koeficienta je posledica negotovosti meritve in negotovosti izmerjene dolžine cevi.

4.2.4 Ocena negotovosti meritve tlaka – test požarne varnosti

V bližini Kmetijske zadruge Medvode je bil opravljen tudi test požarne varnosti. Postopek izračuna je podan v poglavju (2.4.3). Postopek ocene negotovosti je podan v poglavju (2.1.2).

Tabela 11: Ocena negotovosti meritve tlaka – test požarne varnosti

Merilnik tlaka		Srednja vrednost	Varianca	Standardni Odmik	Stopnja svobode	Koef. variance	Standardna negotovost srednje vred.	Razšir. stand. negot.
M.M	Oznaka	\bar{x}	s^2	s	ν	C_v	$u_{\bar{x}}$	$U_{\bar{x}}$
	Enota	(bar)	(bar ²)	(bar)	(-)	(-)	(bar)	(bar)
MM 1 (T1)		3,4036	0,0025	0,0500	96	0,0147	0,0051	0,0102
Izpust (T-izp.)		3,2574	0,0032	0,0563	96	0,0173	0,0057	0,0114

Skupna napaka sistema znaša²⁶ $\pm 0,0154\text{ bar}$ pri razširjeni standardni negotovosti na 95%. Pri računu skupne napake sistema je bila upoštevana merilna negotovost 0,5%, ki je bila podana s strani proizvajalca.

Meritve je bila uspešna in je potrdila pričakovane vrednosti tlaka, ki so bile pridobljene s kontrolnimi meritvami v preteklosti. Vir negotovosti je, poleg negotovosti merilne naprave,

²⁷ Za razlago enačbe glej poglavje 2.4.3.1

tudi razlika med višino cevi in požarnega hidranta (merilno mesto). Merilna naprava meri tlak vode, ki je na višini požarnega hidranta in ne tlak, ki je v cevi.

Požarni test je bil izračunan²⁹ skladno z določili Pravilnika o požarni varnosti (ULRS, št.22-22.04.1995) in je predstavljen v tabeli (11).

Tabela 11: Merilni list

Št. Hidranta	p_s (bar)	P_{rA} (bar)	P_{rB} (bar)	Q (l/s)	p_s-P_{rB}	Q_x (l/s)	p_{rx} (bar)
1	3,650	3,2574	3,4036	5	0,2464	10	2,6644

Izračun požarnega testa je pokazal, da bi bil pri pretoku vode $10 \text{ l/s} \pm 0,05 \text{ l/s}$, tlak v sistemu $2,664 \text{ bar} \pm 0,0514 \text{ bar}$, kar je v skladu s Pravilnikom o požarni varnosti (URL RS, št.22; 22.04.1995). Pretok je bil izračunan iz premera ustnika (napaka v dimenziji ustnika je zelo majhna in zato zanemarljiva) na izpustu, skozi katerega izteka voda, in srednje vrednosti tlaka v cevovodu. Negotovost vrednosti pretoka je zato enaka skupni negotovosti meritve tlaka.

4.3 Ugotovitve o sistemu

Opravljen meritev pretoka je bila neuspešna in ni potrdila pričakovanj, ki izvirajo iz prejšnjih meritev. Razlog bi lahko bil lom cevi med merilcem pretoka na merilnem mestu Na klancu in merilnim mestom v reducirni postaji Brod. Cevovod je bil pregledan z iskalcem loma cevi, ki pa ni pokazal domnevne napake. Zato je najverjetneje negotovost nastala zaradi netočnosti vnosa podatka o premeru cevi v merilni instrument.

Merilna negotovost meritev tlaka je nastala predvsem zaradi napake merilnega instrumenta in neznane razlike v višini med merilnim mestom in cevjo. Meritev tlaka za izvedbo testa hidravličnih izgub je podala podatke za izračun koeficienta hrapavosti cevi, ki je odvisen od premera cevi in njene starosti. Test je bil opravljen le na eni cevi. Podatek o hrapavosti cevi tako velja za cevi v vodovodnem sistemu, ki imajo enak premer in so bile vgrajene v istem

²⁹ Glej poglavja 2.4.3.2, točka (a)

času. Z meritvami je bilo ugotovljeno, da je območje okoli Kmetijske zadruga Medvode požarno varno in zadošča pogojem pravilnika o požarni varnosti. Kljub temu so v bodoče potrebne nenehne kontrole požarne varnosti vodovodnega sistema, saj lahko pride zaradi nepredvidenih dogodkov (lomi cevi, posegi nepooblaščenih oseb v vodovodno omrežje, itd.) do padca tlakov v ceveh in s tem do pomanjkanja tlaka vode v primeru požara.

Primerjava tridnevne meritve tlaka in časovno krajših meritev tlaka za izvedbo testa hidravličnih izgub in testa požarne varnosti je potrdil domnevo, da večje število meritev pomeni večjo merilno točnost izmerjenih veličin. Merilna negotovost tridnevne meritve je bila za približno 50 odstotkov manjša od merilne negotovosti ostalih, krajših meritev.

5. ZAKLJUČEK

Cilj naloge je bila analitična podpora uporabi merilnega sistema na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod ki se uporablja za namen pridobitve podatkov o delovanju, požarni varnosti in linijskih izgubah v sistemu. Merilna negotovost je bila določena po standardu ISO-5168. Prav

tako je bila obravnavana problematika reduciranih zasunov in iskanja lomov cevi. V nalogi so podrobneje opisani principi delovanja merilnih naprav za merjenje tlaka in pretoka.

Na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod so bile opravljene meritve tlaka na šestih točkah in pretoka na treh točkah v sistemu. Tlak je bil merjen z Merilniki tlaka Memmy in pretok z merilniki pretoka Krohne UFM-610P. Z meritvijo tlaka in pretoka v reducirani postaji in meritvijo pretoka Na klancu so bili določeni robni pogoji vodovodnega sistema. Meritve tlaka v Okolici Kmetijske zadruga Medvode so služile za izračun hrapavosti cevi in za izračun požarne varnosti. Meritev tlaka na Gaju je omogočala pregled nad nihanjem tlakov v desni zanki vodovodnega sistema. Za izračun merilne negotovosti posamezne meritve je bil vzeta niz podatkov v časovnem intervalu, za katerega se lahko predpostavi, da sta bila pretok in tlak v cevi konstantna. Skupna napaka meritve pretoka je bila izračunana v skladu z standardom ISO-5168 in znaša 0,129 l/s. Meritev ni potrdila pričakovanj, saj je izmerjena količina pretoka preseгла območje pričakovane napake. Vir napake je bil najverjetneje neznan efektivni premer cevi, katerega je potrebno vnesti v merilno napravo pred merjenjem, saj je naprava nanj zelo občutljiva. V bližini Kmetijske zadruga Medvode je bil opravljen test hidravličnih izgub. Skupna napaka sistema znaša 0,0095bar. Meritev je bila uspešna in je potrdila pričakovanja. Na istem območju je bil opravljen tudi test požarne varnosti v skladu s Pravilnikom o požarni varnosti (ULR RS, št.22; 22.04.1995). Merilna negotovost znaša 0,0154bar. Izračun požarnega testa je pokazal, da bi bil pri pretoku vode 10 l/s, tlak v sistemu enak 2,66 bar, kar je v skladu s predpisi. Območje je požarno varno. Na istem območju je bila predhodno opravljena tudi tridnevna meritev tlaka, katere namen je bilo opazovanje dnevnih in nočnih nihanj tlaka. Opazen je bil vpliv vodohrana na nihanje tlaka v cevovodu. Skupna merilna negotovost znaša 0,0041bar. Meritve so v veliki meri potrdile pričakovanja. Prav tako je bila pri izračunih opažena povezanost količine vzorcev oziroma izmerjenih podatkov od natančnosti meritve. Večje kot je število izmerjenih podatkov, manjša je merilna negotovost meritve.

Meritve podajo podatke o delovanju vodovodnega sistema in so pomemben del nadzora nad porabo in ustrezno storitvijo dobave vode potrošnikom. Zato bi bila potrebna vzpostavitev sistema daljinskega nadzora meritev tlaka in pretoka v merilnih jaških (priloga G) po celotnem Ljubljanskem vodovodnem sistemu. Ta sistem bi omogočal natančnejše določanje

mesta loma cevi in s tem zmanjšal čas iskanja napake. Izmerjeni podatki bi služili za natančnejše matematično modeliranje bodočih vodovodnih sistemov. Za meritev pretoka na vodovodnem sistemu Ljubljane se uporablja merilnik pretoka proizvajalca Krohne UFM 610P. Merilna naprava je zelo občutljiva na vnos podatka o efektivnem premeru cevi, v kateri se meri pretok. Zato bi bila potrebna določitev koeficienta občutljivosti za različne premere cevi, ki jih uporablja javno podjetje VO-KA pri gradnji cevovodov. Koeficient bi se določil eksperimentalno s preizkušanjem vpliva vnesene debeline cevi oziroma vplivov stanja cevi na rezultat meritve.

Vodovodni sistem Ljubljana-Brod dobiva vodo iz vodovodnega sistema Ljubljana-Višmarje preko reducirne postaje, ki zmanjša tlak iz 6,5bar na 3,6bar. Problem³⁰ se pojavi ob morebitni okvari reducirnega zasuna, ko bi potrošniki dolvodno od zasuna ostali brez vode. Rešitev bi bila namestitev dveh vzporednih reducirnih zasunov, od katerih ima eden varnostno funkcijo. Zasuna bi bila elektronsko krmiljena in bi imela nameščena lovilnika nesnage. V primeru, ko pride za prvim zasunom do porasta tlaka nad določeno mejo, se ta zapre in začne delovati drugi, varnostni zasun. S tem bi bila dosežena neprekinjena oskrba z vodo v primeru okvare zasuna.

Test hidravličnih izgub da podatke o dejanski, hidravlični hrapavosti cevi, katere se lahko uporabi v matematičnem modelu. Število meritev je odvisno od proračuna določenega projekta. Potrebno bi bilo opraviti meritve na manjšem številu reprezentativnih cevi, podatke pa interpolirati za celoten sistem Ljubljana-Brod. Eden izmed načinov za zmanjšanje količine meritev je, da se opravi teste na ceveh različnih premerov, dolžin, vrst in starosti. Rezultat bi se predstavil³¹ v obliki diagramov, ki prikazujejo hrapavost cevi kot funkcijo starosti cevi in njene dolžine. Le-te bi občasno posodobili in dopolnjevali.

³⁰ Glej poglavje 2.2

³¹ (Ormsbee in Lingireddy, 1997).

6 VIRI

Samostojne publikacije

Bolton, W. 2000. Instrumentation & measurement. Newnes. A division of Reed Educational and Professional Publishing LTD. Oxford. UK.

Haestad, Walski, Chase, Savič. 2001. Water Distribution Modeling. Heastad Methods, Inc. Waterbury, U.S.A.

Twort A., Ratnayaka D., Brandt M..2000. Water Supply. Arnold. London. UK.

Kularatna N. 2003. Digital and Analogue Instrumentation-testing and measurement. The Institution of Electrical Engineers. Hearts. UK.

Bhave P.R. 2003. Optimal Design of Water Distribution Networks. Alpha Science International Ltd. Pangbourne. UK.

Orel B. 2004. Vzpostavitev digitalne baze podatkov za hidravlični model vodovoda. Diplomaska naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, FGG.

ISO, Measurement of fluid flow-Procedures for the evaluation of uncertainties. ISO-5168 2005-06-15, Second edition.

Steinman F.2005. Hidravlika. Univerza v Ljubljani, FGG. Ljubljana.

Rajar R. 1980. Hidravlika nestalnega toka, Fakulteta za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo. Ljubljana.

Banovec P. 1995. Meritve hidravličnih razmer v cevi z zarezami. Diplomaska naloga. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, FGG.

Elektronski viri

Tehnični podatki o napravi za odkrivanje loma cevi proizvajalca Sewerin

http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ui/bu/leakdetect_e.html (20.9.2005)

Podatki o programu Epanet

<http://www.epa.gov/ORD/NRMRL/wswrd/epanet.html#Description> (16.9.2005)

Podatki o merilni napravi Seacor

http://www.sewerin.com/fr_sw_en.htm (18.9.2005)

Podatki o merilnih napravah proizvajalca Krohne

http://www.krohne-mar.com/Ultrasonic_Flowmeters.18.0.html (25.9.2005)

Spletna stran JP VO-KA. Podatki o vodovodnem sistemu

<http://www.jh-lj.si/index.php?p=3&k=583> (25.9.2005)

Vrste vezij merilnikov tlaka

http://www.mobrey.se/downloads/32_toshiba_line-up.pdf (25.9.2005)

Tehnični podatki o reducirnem zasunu proizvajalca Hawle (30.9.2005)

http://www.hawle.at/e/products/fr_pro.html

Podatki o lovilcu nesnag proizvajalca Imp (01.10.2005)

http://www.impitak.si/slo_start2h.htm

Načini merjenja tlaka. (01.10.2005)

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pman.html>

Principi delovanja tlačnih odjemnikov. (16.10.2005)

<http://content.honeywell.com/sensing/prodinfo/pressure/>

Principi delovanja tlačnih odjemnikov. (01.10.2005)

http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/871

Merilnika tlaka. Spletna stran proizvajalca Motorola. (01.10.2005)

http://www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MPX4115A.pdf

Pravni viri

Pravilnik o tehničnih normativih za hidrantno omrežje in gašenje požarov (Ur. List SFRJ, št. 30/1991)

Pravilnik o preizkušanju hidrantnih omrežij (Ur. List RS, št 22/1995)

PRILOGA A: Slovar osnovnih pojmov v standardu ISO-5168

1. uncertainty-negotovost

Parameter, povezan z rezultati meritev, ki določa razpršenost vrednosti pripisani merjeni količini

2. standard uncertainty-standardna negotovost

Negotovost rezultatov meritve, prikazanih kot standardni odmik

3. relative uncertainty-relativna negotovost

Standardna negotovost deljena z najbolje ocenjenim približkom

4. combined standard uncertainty-kombinirana standardna negotovost

Standardna negotovost rezultatov meritev, ko je rezultat meritve, pridobljen iz vrednosti ostalih količin. Je enaka pozitivnemu kvadratnemu korenu vsote pogojev, ki so bodisi varianca ali kovarianca merjenih količin in so ocenjeni glede na to, kako spremembe teh količin vplivajo na izmerjene rezultate.

5. relative combined uncertainty-relativna kombinirana negotovost

Kombinirana standardna negotovost deljena z najbolje ocenjenim približkom

6. expanded uncertainty-razširjena negotovost

Količina, ki določa interval okoli izmerjenih rezultatov meritve, v katerem so porazdeljene vrednosti katere se lahko pripiše porazdelitvi

7. relative expanded uncertainty-relativna razširjena negotovost

Razširjena negotovost deljena z najbolje ocenjenim približkom

8. coverage factor-faktor pokritosti

Numerični faktor, ki se uporablja kot množitelj kombinirane negotovosti za pridobitev razširjene negotovosti

9. Type A evaluation-Ocena tipa A

Metoda s katero se oceni statistično obdelavo serije podatkov

10. Type B evaluation-Ocena tipa B

Metoda s katero se oceni negotovost postopkov obdelave podatkov, ki niso statistične narave

Število prebivalcev (tisoč)	Računsko število istočasnih požarov	Najmanjša količina vode v t/s na en požar ne glede na odpornost objekta proti požaru
do 5	1	10

6 do 10	1	15
11 do 25	2	20
26 do 50	2	25
51 do 100	2	35
101 do 200	3	40
201 do 300	3	45
301 do 400	3	50
401 do 500	3	55
501 do 600	3	60
601 do 700	3	65
701 do 800	3	70
801 do 1000	3	80
1001 do 2000	4	90

PRILOGA B: Količina vode, ki je predpisana za gašenje požarov v naseljih po pravilniku o požarni varnosti (Vir: ULR RS, št.22; 22.04.1995)

PRILOGA C: Situacija-Vodovodni sistem Ljubljana-Brod



PRILOGA D: Slika lovilca nesag tipa 030-031, proizvajalca IMP

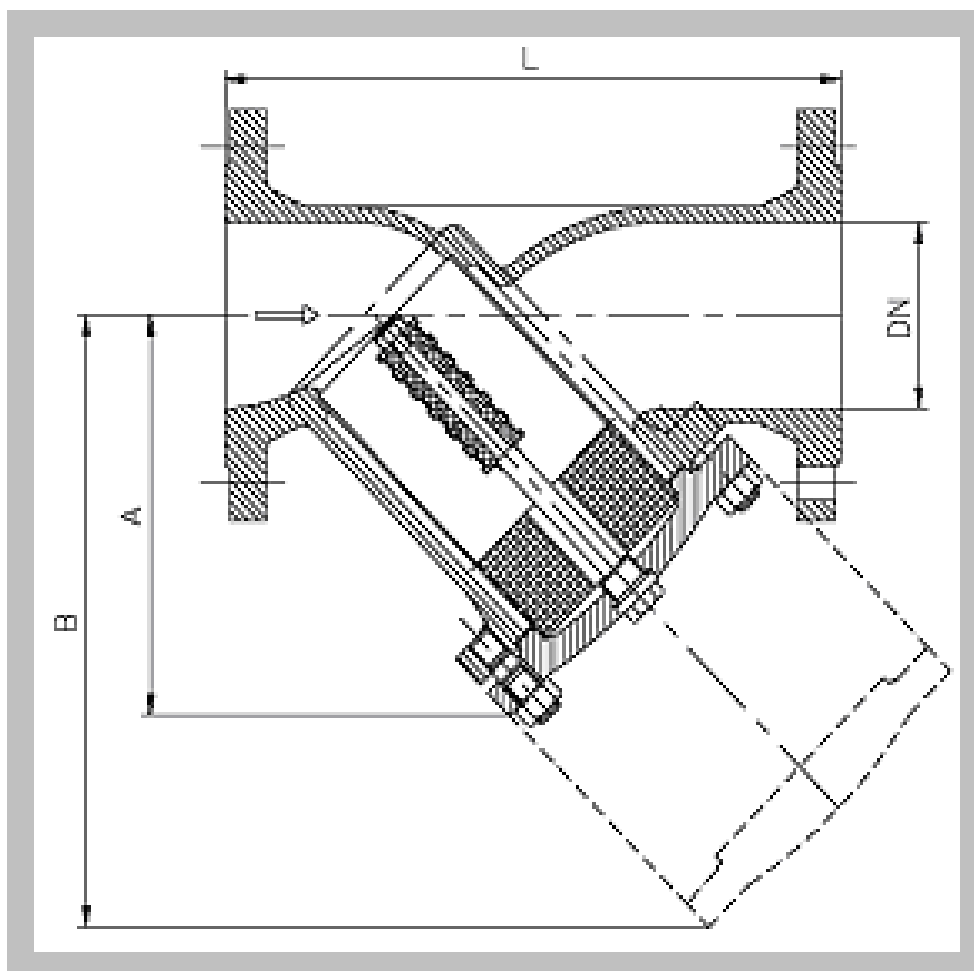




Tabela: Dimenzije lovilca nesnag (Katalog proizvajalca IMP za tip 030-031, str.1)


DN (mm)	L (mm)	B (mm)	A (mm)	Normalno sito Kz (m ³ /h)	Fino sito Kz (m ³ /h)	Normalno sito ζ (-)	Fino sito ζ (-)	Masa (kg)
200	600	580	360	738,00	692,10	4,70	5,34	116,63

PRILOGA E: Shematski prikaz meritve tlaka za izvedbo meritev požarne varnosti (Vir: Služba vzdrževanja omrežij JP VP-KA, Janez Ogrin)





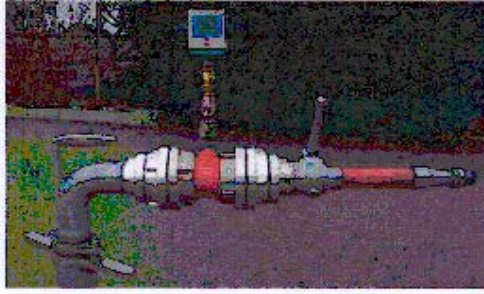

Javno podjetje
 Vodovod - Kanalizacija
 Vodovodna cesta 90

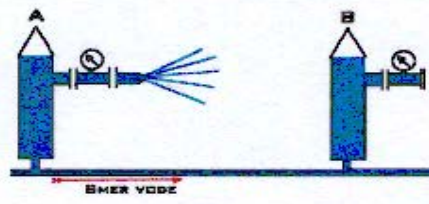



MERILNI LIST

Meritev izvajane		Rezultati meritev				Izračuni			
Lokacija hidranta	Številka hidranta	Ps A (bar)	Ps B (bar)	PrA (bar)	PrB (bar)	Q (l/s)	Ps - PrB (bar)	Qx (l/s)	Prx (bar)
Videm 20c	PTH 5422	5.74	5.7	4.62	4.9	9.46	0.8	18.9	2.50


PsA - Statični tlak na hidrantu A
PsB - Statični tlak na hidrantu B







Javno podjetje
 Vodovod - Kanalizacija
 Vodovodna cesta 90



MERILNI LIST

Meritev izvajane		Rezultati meritev				Izračuni			
Lokacija hidranta	Številka hidranta	Ps A (bar)	Ps B (bar)	PrA (bar)	PrB (bar)	Q (l/s)	Ps - PrB (bar)	Qx (l/s)	Prx (bar)
Videm 20c	PTH 5422	5.74	5.7	4.62	4.9	9.46	0.8	18.9	2.50

PrA - Tlak na ročniku pri izpustu hidranta A = Q.
PrB - Ostanek tlaka v cevovodu.
Q - Izpust l/s vode iz hidranta A.

PRILOGA F: Primer izpisa iz merilca tlaka za določanje požarne varnosti

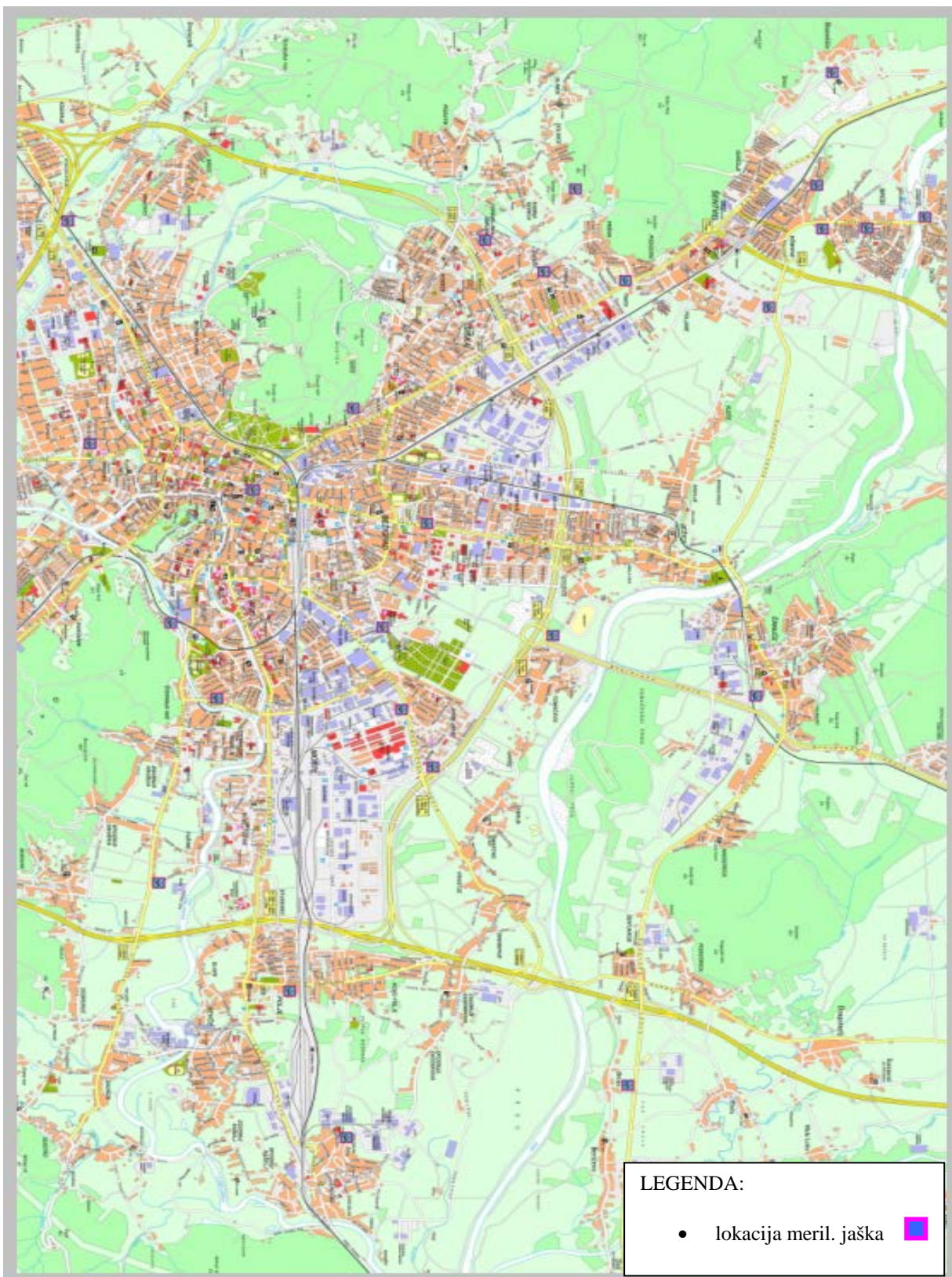
ČAS	TLAK PRED IZPUSTOM (bar)	TLAK NA IZPUSTU (bar)
13:38:28	3,344	3,276
13:38:29	3,38	3,314
13:38:30	3,379	3,32
13:38:31	3,363	3,301
13:38:32	3,348	3,282
13:38:33	3,32	3,269
13:38:34	3,309	3,248
13:38:35	3,325	3,258
13:38:36	3,337	3,267
13:38:37	3,328	3,254
13:38:38	3,295	3,269
13:38:39	3,356	3,257
13:38:40	3,391	3,286
13:38:41	3,386	3,325
13:38:42	3,405	3,335
13:38:43	3,422	3,342
13:38:44	3,438	3,352
13:38:45	3,462	3,419
13:38:46	3,45	3,383
13:38:47	3,395	3,358
13:38:48	3,418	3,35
13:38:49	3,406	3,333
13:38:50	3,38	3,336
13:38:51	3,406	3,324
13:38:52	3,38	3,322
13:38:53	3,401	3,307
13:38:54	3,324	3,29
13:38:55	3,356	3,197
13:38:56	3,344	3,165
13:38:57	3,345	3,195
13:38:58	3,361	3,162
13:38:59	3,352	3,184
13:39:00	3,359	3,184
13:39:01	3,363	3,184
13:39:02	3,379	3,196
13:39:03	3,409	3,281
13:39:04	3,447	3,263
13:39:05	3,45	3,274
13:39:06	3,439	3,26
13:39:07	3,452	3,273
13:39:08	3,456	3,262
13:39:09	3,428	3,256
ČAS	TLAK PRED IZPUSTOM	TLAK NA IZPUSTU

ČAS	TLAK PRED IZPUSTOM (bar)	TLAK NA IZPUSTU (bar)
13:39:10	3,444	3,26
13:39:11	3,445	3,274
13:39:12	3,447	3,268
13:39:13	3,458	3,292
13:39:14	3,464	3,268
13:39:15	3,457	3,275
13:39:16	3,457	3,279
13:39:17	3,461	3,282
13:39:18	3,447	3,278
13:39:19	3,428	3,273
13:39:20	3,435	3,256
13:39:21	3,44	3,271
13:39:22	3,445	3,284
13:39:23	3,453	3,267
13:39:24	3,472	3,273
13:39:25	3,474	3,291
13:39:26	3,474	3,292
13:39:27	3,478	3,304
13:39:28	3,485	3,304
13:39:29	3,488	3,304
13:39:30	3,506	3,322
13:39:31	3,461	3,315
13:39:32	3,469	3,275
13:39:33	3,472	3,275
13:39:34	3,461	3,285
13:39:35	3,439	3,289
13:39:36	3,409	3,226
13:39:37	3,403	3,217
13:39:38	3,412	3,224
13:39:39	3,412	3,232
13:39:40	3,417	3,237
13:39:41	3,445	3,241
13:39:42	3,406	3,231
13:39:43	3,42	3,215
13:39:44	3,413	3,217
13:39:45	3,389	3,231
13:39:46	3,412	3,217
13:39:47	3,414	3,231
13:39:48	3,406	3,226
13:39:49	3,374	3,209
13:39:50	3,392	3,193
13:39:51	3,397	3,21
ČAS	TLAK PRED IZPUSTOM	TLAK NA IZPUSTU

	(bar)	(bar)
13:39:52	3,411	3,232
13:39:53	3,398	3,225
13:39:54	3,379	3,206
13:39:55	3,372	3,206
13:39:56	3,365	3,207
13:39:57	3,359	3,185
13:39:58	3,333	3,163
13:39:17	3,461	3,282
13:39:18	3,447	3,278
13:39:19	3,428	3,273
13:39:20	3,435	3,256
13:39:21	3,44	3,271
13:39:22	3,445	3,284
13:39:23	3,453	3,267
13:39:24	3,472	3,273
13:39:25	3,474	3,291
13:39:26	3,474	3,292
13:39:27	3,478	3,304
13:39:28	3,485	3,304
13:39:29	3,488	3,304
13:39:30	3,506	3,322
13:39:31	3,461	3,315
13:39:32	3,469	3,275
13:39:33	3,472	3,275
13:39:34	3,461	3,285
13:39:35	3,439	3,289
13:39:36	3,409	3,226
13:39:37	3,403	3,217
13:39:38	3,412	3,224
13:39:39	3,412	3,232
13:39:40	3,417	3,237
13:39:41	3,445	3,241
13:39:42	3,406	3,231
13:39:43	3,42	3,215
13:39:44	3,413	3,217
13:39:45	3,389	3,231
13:39:46	3,412	3,217
13:39:47	3,414	3,231
13:39:48	3,406	3,226
13:39:49	3,374	3,209
13:39:50	3,392	3,193
13:39:51	3,397	3,21
13:39:52	3,411	3,232
13:39:53	3,398	3,225
13:39:54	3,379	3,206
13:39:55	3,372	3,206

	(bar)	(bar)
13:39:56	3,365	3,207
13:39:57	3,359	3,185
13:39:58	3,333	3,163
13:39:59	3,348	3,156
13:40:00	3,319	3,164
13:40:01	3,324	3,148
13:40:02	3,342	3,126
13:40:03	3,313	3,159
13:40:04	3,315	3,169

PRILOGA G: Lokacije merilnih jaškov na vodovodnem sistemu Ljubljana-Brod (Vir: Služba vzdrževanja omrežij JP VO-KA)



PRILOGA H: Primer izračuna merilne negotovosti izpisa iz merilca tlaka za določanje požarne varnosti (Izpis iz merilca je podan v prilogi F)

1. Izračun srednje vrednosti (Število izmerjenih vrednosti tlaka je 97)

a) Merilno mesto MM1(tlak pred izpustom):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_m = \frac{(3,344 + 3,38 + \dots + 3,315)}{97} = 3,4036bar$$

b) Merilno mesto Izpust (tlak na izpustu):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n x_m = \frac{(3,276 + 3,314 + \dots + 3,169)}{97} = 3,2574bar$$

2. Varianca:

a) Merilno mesto MM1(tlak pred izpustom):

$$s^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{m=1}^n (x_m - \bar{x})^2 = \frac{(3,344 - 3,4036)^2 + \dots + (3,315 - 3,4036)^2}{97 - 1} = 0,0025bar^2$$

b) Merilno mesto Izpust (tlak na izpustu):

$$s^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{m=1}^n (x_m - \bar{x})^2 = \frac{(3,276 - 3,2574)^2 + \dots + (3,169 - 3,2574)^2}{97 - 1} = 0,0032bar^2$$

3. Standardni odkmik

a) Merilno mesto MM1(tlak pred izpustom):

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,0025} = 0,05bar$$

b) Merilno mesto Izpust (tlak na izpustu):

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{0,0032} = 0,0563bar$$

4. Stopnja svobode

a) Merilno mesto MM1(tlak pred izpustom):

$$v = n - 1 = 97 - 1 = 96$$

b) Merilno mesto Izpust (tlak na izpustu):

$$v = n - 1 = 97 - 1 = 96$$

5. Koefficient variacije:

a) Merilno mesto MM1(tlak pred izpustom):

$$C_v = \frac{s}{x} = \frac{0,05}{3,4036} = 0,0147$$

b) Merilno mesto Izpust (tlak na izpustu):

$$C_v = \frac{s}{x} = \frac{0,0563}{3,2574} = 0,0173$$

6. Standardna negotovost srednje vrednosti

a) Merilno mesto MM1(tlak pred izpustom):

$$u_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,05}{\sqrt{97}} = 0,0051bar$$

b) Merilno mesto Izpust (tlak na izpustu):

$$u_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0,0563}{\sqrt{97}} = 0,0057bar$$

7. Razširjena standardna negotovost pri 95% stopnji zaupanja

a) Merilno mesto MM1(tlak pred izpustom):

$$U_{\bar{x}} = k \cdot u_{\bar{x}} = 2 \cdot 0,0051 = 0,102bar$$

b) Merilno mesto Izpust (tlak na izpustu):

$$U_{\bar{x}} = k \cdot u_{\bar{x}} = 2 \cdot 0,0057 = 0,0114bar$$

Rezultati, predstavljeni v obliki tabele so prikazani na naslednji strani.

Tabela F: Tabelarični zapis parametrov negotovosti

Merilnik tlaka		Srednja vrednost	Varianca	Standardni Odmik	Stopnja svobode	Koef. variance	Standardna negotovost srednje vred.	Razšir. stand. negot.
M.M	Oznaka	\bar{x}	s^2	s	ν	C_v	$u_{\bar{x}}$	$U_{\bar{x}}$
	Enota	(bar)	(bar ²)	(bar)	(-)	(-)	(bar)	(bar)
MM 1		3,4036	0,0025	0,0500	96	0,0147	0,0051	0,0102
Izpust		3,2574	0,0032	0,0563	96	0,0173	0,0057	0,0114

Sledi izračun skupne napake sistema po enačbi:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n [c_i \cdot u(x_i)]^2} = \sqrt{(1,005 \cdot 0,0102)^2 + (1,005 \cdot 0,0114)^2} = 0,0154 \text{ bar}$$

Koeficient c_i upošteva napako merilne naprave, ki je v tem primeru 0,5%.

Ocena negotovosti ostalih meritev tlaka in pretoka je izračunana po istem postopku.

