

## Систем за мерење протока течности заснован на губитку топлоте дебелослојних NTC термистора

МИЛОЉУБ Д. ЛУКОВИЋ, Универзитет у Београду,  
Институт за мултидисциплинарна  
истраживања, Београд

Стручни рад  
UDC: 532.57.083:681.586  
DOI: 10.5937/tehnika1505822L

МАРИА В. НИКОЛИЋ, Универзитет у Београду,  
Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд

ОБРАД С. АЛЕКСИЋ, Универзитет у Београду,  
Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд

ЗДРАВКО И. СТАНИМИРОВИЋ, Институт за телекомуникације  
и електронику ИРИТЕЛ а.д, Београд

ЛАТКО З. СИБИНОСКИ, Институт за телекомуникације  
и електронику ИРИТЕЛ а.д, Београд

ИВАНКА П. СТАНИМИРОВИЋ, Институт за телекомуникације  
и електронику ИРИТЕЛ а.д, Београд

*Систем за мерење протока течности (воде) на бази губитка топлоте је формиран од два дебелослојна сегментираних NTC термистора, извора константних напона, 8 разделника напона, аквизиционе карте и РС рачунара са посебним IWF софтвером. Термистори Th1 и Th2 су смештени у два метална или пластична кућишта која су везана на ред кроз које протиче течност (вода). Први термистор Th1 је референтни и мери температуру воде, а други термистор Th2 је мерни који мери проток и самозагрева се струјом при константном напону из извора. На команду из РС рачунара извор даје константне напоне за напајање Th2 у скоковима од по 2V на сваких 5°C промене температуре улазне воде. Мери се струја I термистора Th2 у функцији од протока воде Q. Проток се одређује из инверзне криве  $Q=F(I)$ . Аквизициона картица циклично мери један за другим 8 напона на разделницима напона: један напон се мери 10 пута у секунди а рачунар усредњава и бележи то као једну вредност.*

**Кључне речи:** сензор, проток, температура, NTC термистори

### 1. УВОД

Системи за мерење протока обично имају сензор који ради на механичком, гравитационом, електромагнетном, топлотном, ултразвучном и оптичком принципу. Њихова употреба зависи од тога да ли је течност проводна, провидна, чиста, загрејана, под притиском, агресивна, вискозна, запаљива, испарљива итд, као и од експлоатационих услова, тражене класе тачности и прихватљиве цене [1-3].

Осим тога за различите опсеге промене прото-

ка<sup>т</sup>. ка и брзина течности погоднија је једна, а за друге друга врста мерила протока. Тако се, на пример топлотни или калориметријски мерачи протока користе за мале протоке при чему се проток минимални/максимални мења највише 1:100 пута.

Савремена мерила протока течности имају аквизициону картицу, процесор, дигитално показивање интензитета мерених величина, пренос података до мерне станице, обраду података и чување у бази података. Постоје различите конструкције мерила протока и брзине течности на бази преноса топлоте. Према начину побуде сензора у мерилу, сви они се могу сврстати у три основна типа: 1. са константним температуром, 2. са константним струјом и 3. са мерењем губитка топлоте (калориметријски принцип) [4-8].

Адреса аутора: Милољуб Луковић, Универзитет у Београду, Институт за мултидисциплинарна истраживања, Београд, Кнеза Вишеслава 1а

Рад примљен: 08.05.2015.

Рад прихваћен: 17.07.2015.

Сензори протока течности на бази губитка топлоте термистора који се самозагрева сопственом струјом могу бити са константном струјом или константним напоном. Метода самозагревања константном струјом се чешће користи: топлота коју односи течност која протиче компензује се новом генеацијом топлоте. У супротном, метода са константним напоном не може компензовати изгубљену топлоту, јер струја самозагревања опада што се више термистор хлади услед протока воде [9].

Нова идеја је да се константни напон извора мења адаптивно скоковито по 2-3V сваких 5<sup>0</sup>C зависно од температуре долазне воде, тако да унутар опсега струја самозагревања опадне услед температуре долазне воде и услед протока заједно највише на половину почетне вредности у том опсегу.

Нова мерила протока течности су увек опремљена електроником и дигиталним показивачима мерених величина, а интелигентни сензори имају аквизиционе карте и софтвер који анализира тренутна стања мерених величина преко РС и посебног софтвера за контролу и управљање једног или више таквих сензора (сензорски систем за више мерних места) [10].

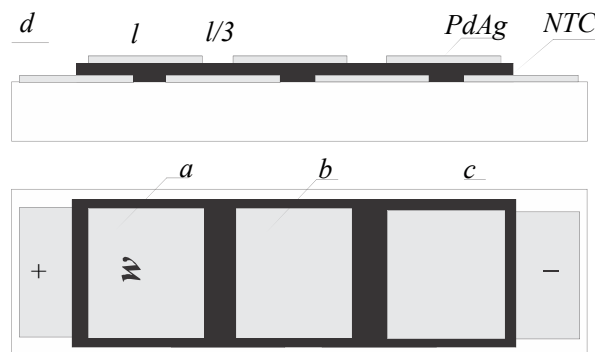
## 2. КОНСТРУКЦИЈА NTC ТЕРМИСТОРА КАО СЕНЗОРА ПРОТОКА ТЕЧНОСТИ

Проток се одређује из инверзне криве  $Q=F(I)$ . Аквизициона карта циклично мери 8 напона на разделниц има напона: један напон се мери 10 пута у секунди а рачунар усредњава и бележи то као једну вредност за сваку секунду.

Посебни софтвер IFW (Ирител) са интелигентним функцијама и опцијама за аутоматско мерење и приказивање тренутних вредности стања на протокометру написан је као VBA модул који је примењен у Excel-у 2007. Програм се састоји од неколико интелигентних блокова: RCV интелигентни драјвер, мерно-аквизициони блок (мерни напони V1 - V8), блок за разликовање стања на термисторима и рачунско одређивање величина као што су тренутне вредности струје (I), отпора (R), дисипиране снаге (P) и температуре (T), затим блок калибрационо-интерполационог софтвера (CI), блок специфичних функција као што су одређивање протока (Q), укупне количине протекле течности (V) и блок калориметријског индикатора (J) и индикатора тока воде (FI).

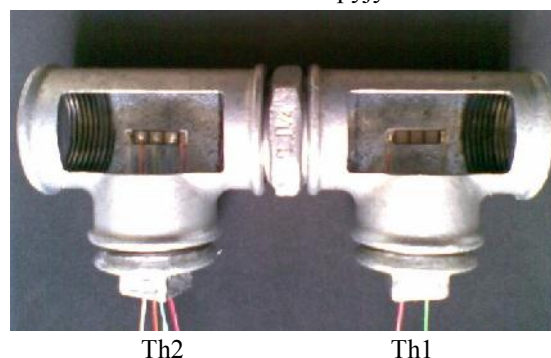
Сензор протока течности (воде) намењен је за мерење протока воде у цевоводима. Однос максималног и минималног протока је 100:1, а максимални проток на прототипу је већи од 20 l/min.

Дебелослојни сегментирани термистори са редукованим димензијама реализовани су хибридном технологијом (ситоштампом) на алумина плочицама. Њихова конструкција приказана је на слици 1: попречни пресек и поглед одозго.



Слика 1 - Дебелослојни сегментирани термистори са редукованим димензијама

На попречном пресеку се види 7 дебелослојних PdAg електрода квадратног облика (три изнад и четири испод NTC термисторског слоја). Електроде су у односу на NTC слој распоређене у цик-цак распореду (редно паралелна веза). Спољашње електроде обележене са + и - служе за напајање струјом а унутрашње електроде обележене са a, b, c и служе за мерење градијента отпорности. Права величина сегментираниог термистора са редукованим димензијама је 25.4 x 6.35 x 0.5 mm. Пасте за сегментирани термистор су развијене у Институту за мултидисциплинарна истраживања: NiMn2O4 високоомска паста (NTC IMSI 3K3/2008), и CuO-2Ni0.5Zn1.0Mn1.3O4 нискоомска паста (NTC IMSI 3K3/2010); обе пасте имају 5% везивног стакла, наносе ситотехником и синтерују на 850<sup>0</sup> C/10min.



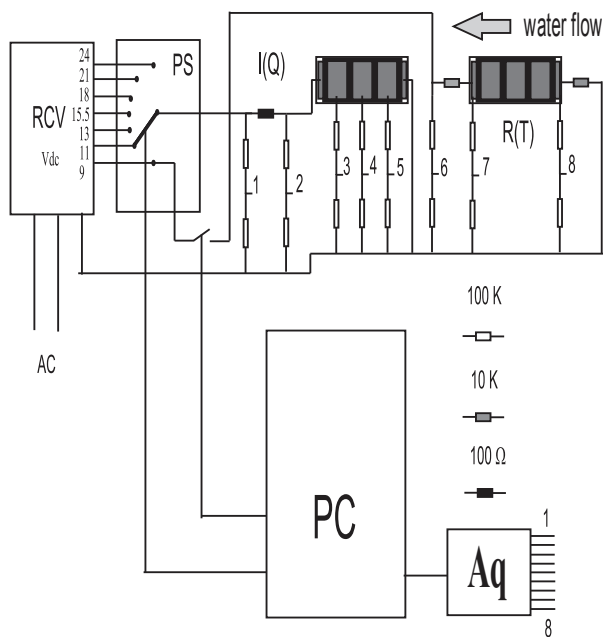
Слика 2 - Конструкција сензора протока са два термистора са редукованим димензијама

Кућиште за мерење протока направљено је спајањем два Т-елемента за цевоводе (стандардне водоводске Т рачве) као на слици 2. Т-елементи могу бити метални или пластични, а спојени су редно. На улазу и излазу кућишта су редуктори са 5/4 на 1/2 или 3/4 инча (цола). На бочне отворе оба Т-еле-

мента уврнуте су капице (стоп-елементи) са сегментираним термисторима  $Th_1$  и  $Th_2$  на улазу и излазу из мерача протока.

### 3. АНАЛИЗА КАРАКТЕРИСТИКА СИСТЕМА ЗА МЕРЊЕ ПРОТОКА ТЕЧНОСТИ

Термистори су изоловани епоксидом и постављени на централној оси кућишта подужно тако да не ометају проток воде. Термистор  $Th_1$  је високоомски (5-10 K $\Omega$ ) и на ред има још два отпорника по 10 K $\Omega$  (споља на прилагодној плочи са разделницима - слика 3), а мери температуру долазеће воде  $T_w$  преко своје NTC карактеристике  $R(T)$  дате на слици 4.

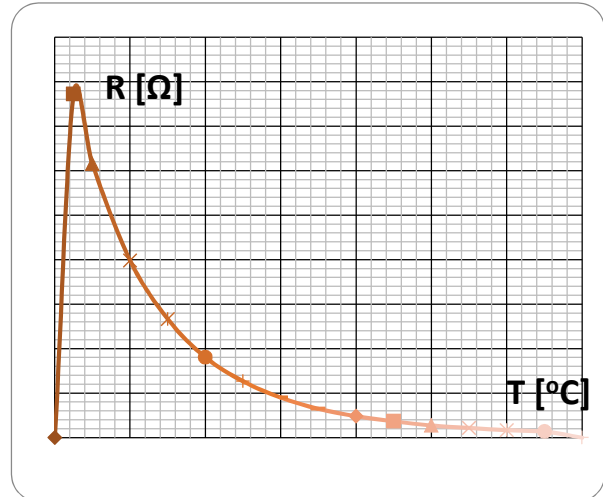


Слика 3 - Електрична шема везе сензора протока са разделницима напона, аквизиционом картицом и РС рачунаром

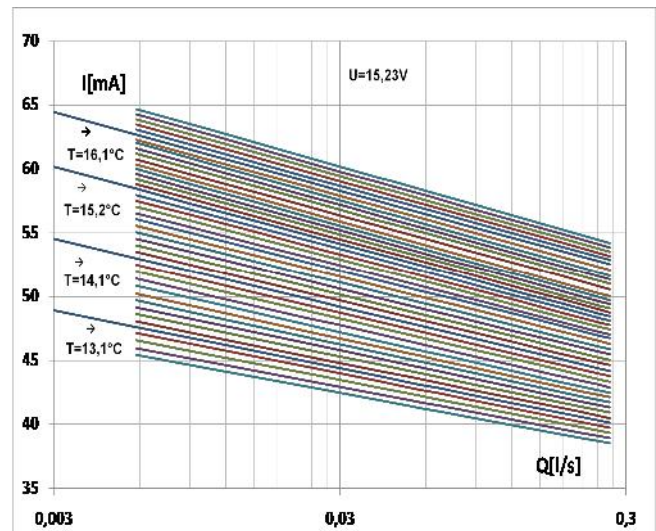
Термистор  $Th_2$  је градијентни сензор који се самогрева струјом  $I$  при константом напону напајања  $U$ . Он мери проток  $Q$  течности (воде) као функцију  $Q(I)$  при температури долазне воде  $T_w$ . Смер протока течности је од  $Th_1$  ка  $Th_2$  и обележен је посебном стрелицом – water flow.

Прилагодна картица са разделницима напона као на слици 3 има 8 разделника напона (обележени бројевима од (1-8) као напонско прилагођење за аквизициону картицу Аq (1-8) којом управља РС.

Прва два разделника (1 и 2) служе за мерење струје самогревања  $I$  на  $Th_2$  термистору, друга три разделника (3, 4 и 5) служе за мерење градијента отпорности дуж термистора  $Th_2$ , док разделници 6, 7, 8 служе за мерење напона и струје на хладном термистору  $Th_1$  односно отпорности  $R$  и преко ње температуре долазне воде  $T_w$ .



Слика 4 - Промена отпорности NTC сегментираних термистора  $R$  са температуром улазне воде  $T_w$



Слика 5 - Криве промене струје самогревања  $I$  у функцији од протока воде  $Q$  у стационарном режиму рада која служи за баждарења сензора протока

Сензор који користимо има двоструку улогу служи као грејач и као сензор губитка топлоте. Вистонов мост са слепим и активним сензором не користимо јер би у том случају тај сензор имао додатну потрошњу снаге 0,2-1W.

Напајање термистора константним напонима врши RCV (range constant voltage) контролисани извор DC напајања од 10-24 V са изводима по 2-3 V између њих (слика 3).

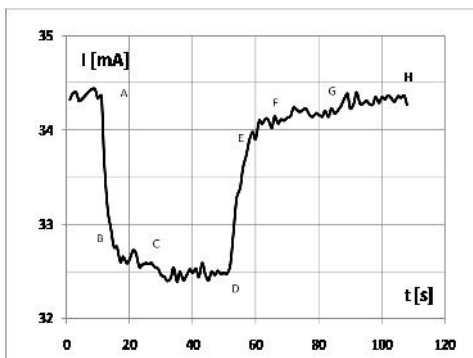
Прекидачки систем PS добија команде и укључује RCV напоне скоковито по 2-3 V на сваких 5 $^{\circ}$ C промене температуре долазне воде, да би се подигла радна тачка мерног система, струја лагано опада у функцији температуре долазне воде, али је та промена спорија и може се линеаризовати. Између

две калибрационе криве од по  $1^{\circ}\text{C}$  може се линеарно интерполирати десет кривих са кораком од по  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Додатне калибрационе криве се користе кад температура долазне воде варира па да се изабере интерполирана калибрациона крива.

Температуру долазне воде мери хладни термистор  $\text{Th}_1$  преко NTC криве на слици 4. Усклађивање напона у скоковима омогућава враћање радне тачке протокометра кад струја самозагревања падне испод половине у неком опсегу. Функција протока  $Q(I)$  је инверзна функција  $I(Q)$  коју меримо при константним вредностима температуре долазне воде  $T_w$ . На слици 5 дате су четири криве баждарења  $I(\ln Q)$  за различите температуре долазне воде ( $13,1, 14,1, 15,2,$  и  $16,1^{\circ}\text{C}$ ) мерене при  $U_{dc}=15,23\text{ V}$  из RCV извора.

Криве између њих се могу линеарно интерполирати на сваких  $0,1^{\circ}\text{C}$  или мање зависно од прецизности мерења температуре воде  $T_w$  (слика 4). Криве баждарења се снимају у квази-стационарним условима и служе за мерење у реалним условима где су промене протока споре (проток воде у водоводу где су цеви великог пресека).

Мерење помоћу аквизиционе карте је усредњено 10 пута у секунди и једна вредност је добијена за сваку секунду за мерење температуре воде  $T_w(t)$  и струје самозагревања  $I(t)$ . Овим је омогућено и праћење промена протока течности у реалном времену ( $t$ ).

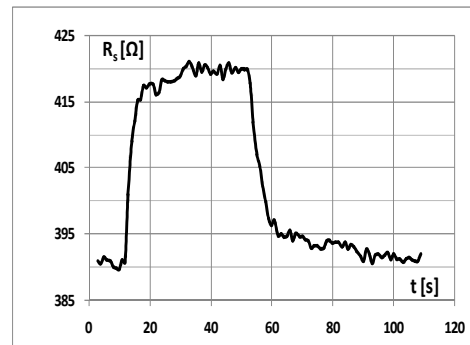


Слика 6 - Тренутни одзив термистора  $I(Q,t)$  на степенасту промену протока при константној температури воде  $T_w=15,2^{\circ}\text{C}$ ,  $U_{dc}=15,23\text{ V}$  из RCV извора

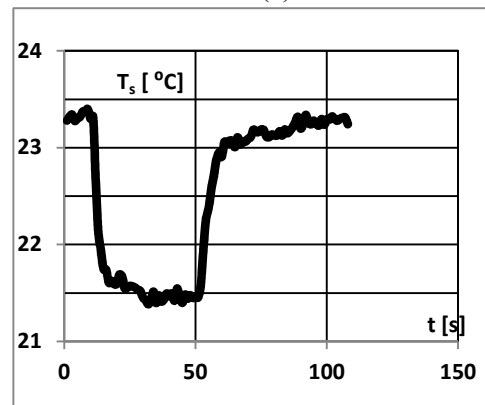
На слици 6 приказана је промена струје  $I(t)$  као одзив на степенасту промену протока долазне воде (тачка А-Д тј. 10-50 s). Од тачке А-В постоји нагла промена струје  $I$  услед протока дуж осе сензора, а од В-С услед кондукције односно хлађења, од Д-Е нагли пораст струје услед престанка протока, а од Е-Н услед радијације трансфера топлоте (загревање околне воде). На овај начин на степенастој промени протока воде објашњен је принцип губитка топлоте (са топлотог елемента-конвекција

услед протока и кондукција услед грејања околне воде око сензора).

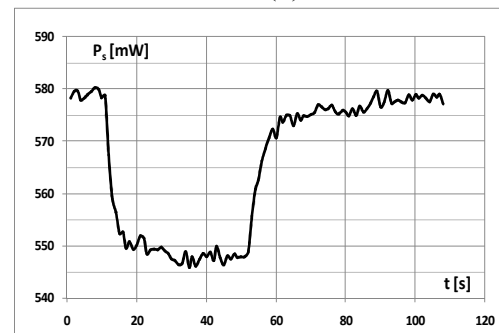
Кашњење предње ивице  $Q(t)$  је последица NTC експоненцијалне зависности преноса топлоте и отпорности  $R(T)$  термистора  $\text{Th}_2$ . Тренутна вредност отпорности  $R_s(t)$ , температура  $T_s(t)$  и снаге  $P_s(t)$  на термистору-сензору који се самозагрева струјом  $I(t)$  дате су на сликама 7.



(а)



(б)



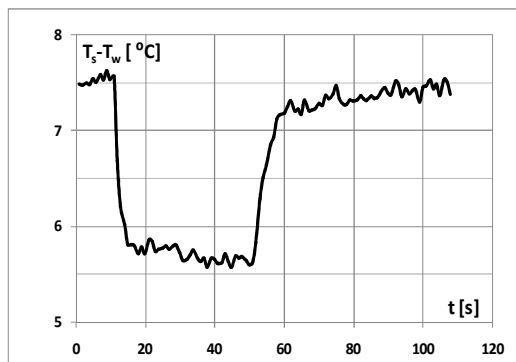
(в)

Слика 7 - Тренутне вредности отпорности  $R_s(t)$ , температуре  $T_s(t)$  и дисипиране снаге  $P_s(t)$  самозагревајућег термистора а, б и в

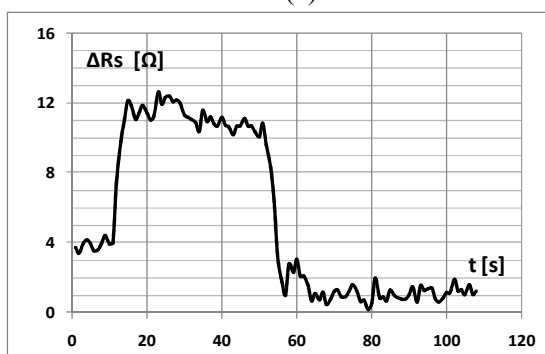
На сликама 8а и 8б дате су диференцијалне криве тј. разлика температуре самозагревајућег термистора-сензора и долазне воде  $\Delta T(t)=T_s(t)-T_w(t)$  и градијент отпорности самозагревајућег термистора-сензора  $\Delta R_s(t)$  дуж осе по којој се мери проток. Градијент се мери у интервалу од 10 sec до 50

сес, јер изван тог опсега нема протока, па је и градијент једнак нули.

Ове криве се користе као индикатори стања: ако нема протока  $\Delta R_s=0$  и ако нема губитка топлоте  $\Delta T=0$ . Екстремуми као минимуми и максимуми и нагли скокови су индикатори почетка и краја прелазних стања. Користећи интегралне и диференцијалне криве у сваком тренутку ( $t$ ) могу се одредити одзив и параметри стања на основу којих знамо да ли је појава стационарна (стабилна) или прелазна (тренутне вредности).



(a)



(б)

Слика 8 - Разлика температуре  $T_s(t)-T_w(t)$  (a) и градијент отпорности самозагревајућег термистора, сензора  $\Delta R_s(t)$  за  $t$  од 10 сес до 50 сес јер изван тог опсега нема протока (б).

Снага на термистору који се самозагрева струјом  $I$  (20-40 mA) при константном напону је реда 1 W (0.2-1 W). Инерција сензора на губитак топлоте конвекцијом (за промену минимални / максимални проток) је реда неколико секунди, а за враћање у стационарно стање тј. за кондукцију и радијацију око 30 секунди. Због тога интелигентни део програма који препознаје одзив на степ функцију протока може да упозори на стање и да коригује кашњење сензора. Очекивана грешка мерења у стационарним условима је око 1.5 % а додатним баждарењем може да се сведе на 1%, што нам је и циљ даљег истраживања. Грешка мерења тренутних вр-

едности протока у прелазном режиму због инерције је знатно већа али се може побољшати софтвером и новим конфигурацијама NTC термистора.

#### 4. ЗАКЉУЧАК

Систем за мерење протока са сегментираним термисторима може да се примењује за мерење протока разних течности које нису агресивне. Првобитно је био намењен за мерење протока где су промене протока и температуре споре (стационарни проток). Касније је дограђен и побољшан софтвер и тестиран као водомер у водоводу на цевима великог пресека. Овај систем сада мери тренутна стања протока  $Q$  и приказује их на РС монитору.

Употребљивост оваквог мерила у великој мери зависи од калибрације која се мора обавити у лабораторији, док се рекалибрација може обавити у изабраним тачкама на калибрационим кривама. Осетљивост овог сензора је већа за мале протоке због експоненцијално опадајуће криве баждарења  $\ln Q=aI+b$  (где је  $a$  константа тј. коефицијент правца, док  $b$  линеарно зависи од температуре). Код ултразвучних сензора протока је обрнуто тј. што је проток мањи осетљивост и грешка мерења експоненцијално расту.

Предности овог сензора су једноставност израде, одсуство појачавачке електронике, мала потрошња енергије, лако одржавање и уклопљеност у цевне елементе.

Прототип овог мерила протока тестиран је у лабораторији за климомеханичка испитивања у ИРИТЕЛ-у тако што је коришћен референтни независни мерач протока постављен на ред са дебелослојним NTC термистором.

#### 5. ЗАХВАЛНОСТ

Овај рад је део пројеката "0-3Д наноструктуре за примену у електроници и обновљивим изворима енергије: синтеза, карактеризација и процесирање" (пројекат III 45007) и "Иновативне електронске компоненте и системи базирани на неорганским и органским технологијама уграђени у робе и производе широке потрошње" (пројекат TP 32016) које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије за период 2010-2015.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. C. Baker, Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications, Chapter 15 Thermal Flowmeters, University of Cambridge, pp. 371-390, 2000.

- [2] Eldridge Products Inc, Thermal mass flow meters and flow switches, Comparison of Thermal Mass Flowmeters and Other Flow Technologies, 2008.
- [3] Cross Instrumentation, Engineered products for process measurement & control, CI Journal: A Flow Measurement Primer - Thermal Mass Flow Meters, 10/01/2002.
- [4] H. J. Boer, W. Derks, "A precision thermal mass flow sensor for very small liquid flow", Bronkhorst High-Tech, Liqui-flow, Proceedings SENSOR 95, pp. 97-102, 1995.
- [5] D. W. Spitzer, Flow Measurement: Practical Guides for Measurement and Control ISA (The Instrumentation, Systems, and Automation Society), 459-475, 2001.
- [6] T. E. Miller, Jr, H. Small, "Thermal pulse time-of-flight liquid flow meter", Analytical Chemistry (American Chemical Society), Vol.54, No 6, 907-910, 1982.
- [7] M. Viswanathan, A. Kandaswamy, S. K. Srekalā, K. V. Sajna, Development, modeling and investigations, on thermal mass flow meters, Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, Vol.12, 353-360, 2002.
- [8] Powelectrics Limited ( UK), Flow sensors: Thermal flow sensors for liquids, (e-catalogue, /www.powelectrics.co.uk/products/flow\_sensors), 2010.
- [9] Seil Enterprise Co , Flowmeter types and their principles, www.maxiflo.co.kr, 2006.
- [10] SA Instrumentation & Control (The Official Journal of the SAIMC, TECHNEWS, (<http://www.technews.co.za/>), KROHNE mass flowmeters: Stainless steel calorimetric flow sensor, pp 1-3, May 2007.

## SUMMARY

### A SYSTEM FOR MEASURING LIQUID FLOW BASED ON HEAT LOSS OF THICK FILM NTC THERMISTORS

*A system for measuring flow of liquids (water) based on heat loss was formed of two thick film segmented thermistors, power supply with constant voltages RCV, 8 voltage dividers RN, acquisition card and PC with custom IWF software. The thermistors were placed in two metal or plastic housings connected in series like and filled with liquid,(water).The first thermistor Th1 is referent and measures the temperature of water incoming to the sensor, while the second thermistor Th2 is the flow sensor and it is selfheated with self current at a constant supply voltage from power source. Using the command from the PC the RCV power source generates constant voltages for powering Th2 in steps of 2V per 5°C of input water temperature increase. The self-heating current I of the Th2 thermistor is measured vs. the water flow rate Q.The water flow rate is defined from the function  $Q=F(I)$ . The acquisition card measures in multiplex 8 voltages on voltage dividers: each voltage is measured 10 times per second and the computer calculates the average value for each second.*

**Key words:** sensor, flow, temperature, thermistors