

KONDENZACIJSKI VLAGOMER Z OPTIČNIMI VLAKNI

A. Babnik, A. Kobe, I. Bajsić, J. Možina
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Slovenija

Ključne besede: vlagomeri kondenzacijski z vlakni optičnimi, vlaga zraka, merjenje vlage, kondenzacija vlage, pogoji kondenzacije, vlakna optična, senzori reflektivni, vlaga relativna, temperatura rosišča

Povzetek: Kondenzacijski ali rosiščni vlagomer je med najbolj točnimi merilniki vlažnosti zraka. Merjenje temelji na zaznavanju kondenzata na hlajeni kovinski površini in preračunu temperature rosišča vlažnega zraka v relativno oziroma absolutno vlažnost zraka. V obravnavanem prototipnem vlagomeru so elementi klasične optike nadomeščeni z novo postavitvijo odbojnostnega zaznavala z optičnimi vlakni. Eksperimentalno so preverjeni nekateri dejavniki, ki vplivajo na proces kondenzacije in s tem tudi na točnost vlagomera.

Fiber-optic Condensation Hygrometer

Key words: fiber-optic condensation hygrometers, air humidity, humidity measurement, humidity condensation, condensation conditions, optical fibers, reflective sensors, relative humidity, absolute humidity, dewpoint temperature

Abstract: The condensation dewpoint hygrometer is a very accurate instrument for measuring air humidity. Its working principle is based on the optical detection of dew forming on a chilled mirror and computing absolute or relative humidity from the temperature of the mirror at the optical threshold and the temperature of the surrounding air.

The optical detection system most commonly used consists of a laser source and a photodetector, built into a measuring chamber. This design enables the detection of light reflected from the chilled mirror. The most accurate instruments also detect scattered light. The use of optical fibres enables light source and photodetector to be placed outside the measuring chamber. In such optical configuration, the fibres are oriented to the mirror surface normal to detect reflected light.

The dewpoint hygrometer uses a temperature control system to actively chill the mirror. The protocol of setting the mirror temperature depends on the character of the measurement. Continuous mode hygrometer is sensitive to changes in thickness of the water layer on the mirror due to changes in humidity of the environment by adjusting the mirror temperature to maintain a constant water layer. Due to continuous presence of water on the mirror surface, frequent cleaning is required. On the other hand, discrete mode hygrometers cool the mirror until dew is formed on it. This dew point temperature is measured and the mirror is heated back to the temperature of environment. Repeating the cycle enables changes in the humidity to be followed. Since dew is present on the mirror for only a short period of time in each cycle, frequent cleaning is no longer necessary.

A condensation dewpoint hygrometer using fibre optics and working in a discrete mode has already been proposed in literature. In this article several improvements of the basic design are proposed and implemented. Original innovations have improved properties of the hygrometer considerably, resulting in a very accurate yet simple instrument.

In preliminary experiments, detection of scattered light was found to be much more accurate in detecting dew formation than reflected light detection. This observation was implemented by placing a reflection-type fibre optic sensor at an angle to the mirror surface. The sensor was built using one transmitting and one receiving glass fiber with core diameters 100 μm and 500 μm , respectively.

Determination of the dewpoint temperature is more accurate using discrete mode, but only when heating and cooling optical detection (dew formation and evaporation) is performed. The dewpoint temperature must be calculated as an average of both temperatures that were measured at threshold condition. Only with such a procedure the inherent hysteresis of condensation and the thermal capacity of the mirror and temperature sensor are removed. Using only the temperature measured at first detection of dew forming, as described in the literature, can lead to unpredictable systematic errors.

Series of measurements were performed to obtain the dependence of the measured quantity on mirror position and orientation, velocity of the incoming air and cycle time. The hygrometer gave best results when the mirror faced downwards. Results with a vertical mirror are comparable, but a mirror facing upwards gave the largest fluctuations. Results were independent of the velocity of forced air over the mirror. Cycle time affects the width of hysteresis, but not the final result, if heating and cooling detection is employed. An emphasis was put on determining the systematic error caused by changing surface parameters of the metal mirror. This error depends on the surface roughness and varies for different surface compositions. The best repeatability with smallest systematic error was achieved using a polished surface with a thin anti-corrosion layer.

1. UVOD

Merjenje vlažnosti zraka je relativno neraziskano področje merilne tehnike, kar se kaže na uporabi starih in preverjenih načel delovanja merilnikov, ki so se ohranila iz preteklosti /1,2,3,4/. Novo smer je odprla šele uporaba elektronskih sestavnih elementov, ki omogočajo miniaturizacijo zaznavala in celotnega merilnika. Točnost določanja relativne vlažnosti večine takih merilnikov ne presega vrednosti od 1 do 2 % RH /5/. Izstopa kondenzacijski vlagomer, katerega točnost je za skoraj razred točnosti boljša /6/. Njegovo delovanje temelji na

optičnem zaznavanju nastanka kondenzata na hlajeni kovinski površini. V ta namen sta v merilno sondo vgrajena polprevodniški laserski izvor in optični sprejemnik. Uporaba optičnih vlaken omogoča namestitve obeh optičnih elementov izven merilne sonde /7,8,9/. V prispevku opisujemo nekatere izsledke razvoja kondenzacijskega vlagomera nove generacije, pri katerem smo kot detekcijski element uporabili izvirno postavitve odbojnostnega zaznavala z optičnimi vlakni, in katerega delovanje je nadzorovano z novim načelom krmiljenja /10/.

2. FIZIKALNE OSNOVE

Vlažen zrak je mešanica suhega zraka in vode. Slednja se v področju nenasičenosti nahaja v obliki vodne pare. Vsebnost pare se z zniževanjem temperature ne bo spreminjala do trenutka, ko so doseženi pogoji nasičenosti (delni tlak vodne pare doseže temperaturno odvisen tlak nasičenosti), nakar se bo pričela izločati iz zmesi v tekoči ali trdni obliki, odvisno od temperature zraka. Pojav je možno zaznati optično, kar je osnovno načelo delovanja vsakega kondenzacijskega in rosiščnega vlagomera.

Vsebnost vlage definiramo z razmerjem delnih tlakov sestavnih plinskih komponent v zraku. Absolutna vlažnost x je sicer razmerje mase vode in suhega zraka, v primeru opisa stanj v nenasičenem področju pa jo lahko izrazimo z razmerjem delnih tlakov vodne pare p_p in suhega zraka p_{sz} ter celotnega tlaka vlažnega zraka p :

$$x_p = 0,622 \frac{p_p}{p_{sz}} = 0,622 \frac{p_p}{p - p_p} \quad (1)$$

Z relativno vlažnostjo φ opisujemo le stanja v nenasičenem področju in je razmerje dejanskega delnega tlaka pare p_p in nasičenega parnega tlaka p_s pri isti temperaturi:

$$\varphi = \frac{p_p(T)}{p_s(T)} = \frac{p_s(T_R)}{p_s(T)} \quad (2)$$

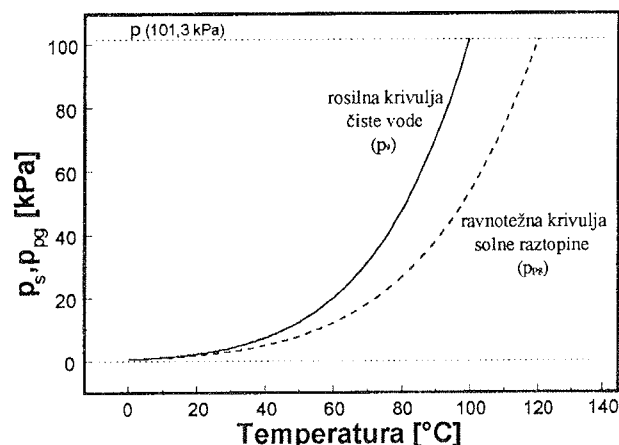
Ker se vsebnost pare z zniževanjem temperature v področju nenasičenosti ne spreminja, lahko v gornji enačbi delni tlak pare nadomestimo z nasičenim parnim tlakom pri mejni temperaturi, ki jo imenujemo temperatura rosišča T_R . Ta temperatura je temeljni izmerek kondenzacijskega vlagomera, iz katerega lahko ob poznavanju temperature merjenega zraka T določimo relativno (enačba 2), oziroma absolutno vlažnost:

$$x_p = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s} \quad (3)$$

Nasičeni parni tlak se eksponentno povečuje s temperaturo. Razmere na meji faz (gladini) čiste vode in vodne pare analitično opisuje Clausius-Clapeyronova enačba /12/, ki pa je zaradi temperaturne odvisnosti uparjalne toplote vode le približna. Praktično se uporabljajo eksperimentalno izmerjene in tabelirane vrednosti, ki so točnejše od analitičnih /2,6/. V ostalih primerih se kondenzacijski pogoji spremenijo. Poleg uparjalne toplote je tedaj prisotna še "vezalna" toplota q_e , potrebna za premagovanje vezalne energije med molekulami vodne pare in mejo med fazama /2/. Mejni tlak, pri katerem se v tem primeru prične proces kondenzacije, imenujemo ravnotežni tlak (p_{pg}). Pri enakih ostalih pogojih je manjši od nasičenega parnega tlaka, razmerje med obema pa je odvisno od:

$$\frac{p_{pg}}{p_s} (T) = \exp\left(\frac{-q_e}{R_p T}\right) \quad (4)$$

Pričetek kondenzacijskega procesa na obravnavani površini se torej prične pri višji temperaturi, kot bi se na vodni gladini. Pojav je izrazit na gladinah solnih raztopin (slika 1), medtem ko je na suhih trdnih površinah opazen le pri izvajanju natančnih meritev. Posledica pojava je sistemski pogrešek izmerka kondenzacijskega vlagomera, v katerem se proces kondenzacije vrši na kovinskem zrcalu.

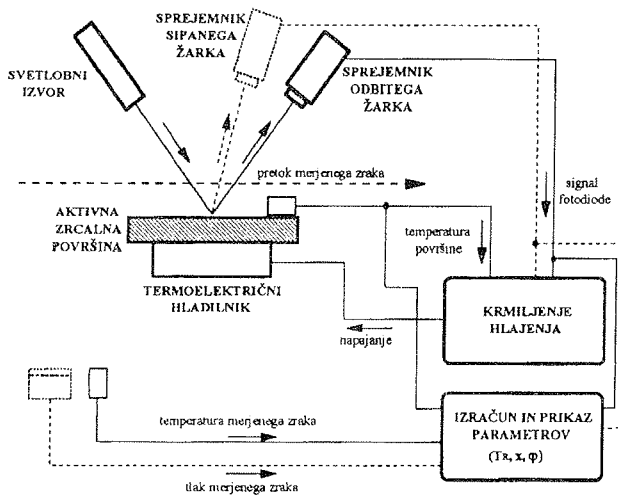


Slika 1: Temperaturna odvisnost nasičenega parnega tlaka nad čisto vodo (p_s) in solno raztopino (p_{pg})

Za veliko večino snovi in tudi za vodo je značilen nezvezen fazni prehod, ki povzroča pregretje tekočine (prenasičenost plinske mešanice) oziroma podhladitev pare /12/. V kolikšni meri bo ta pojav prisoten je odvisno od hitrosti spreminjanja temperature in gostote delcev, ki vzbudijo pričetek faznega prehoda - kali. V primeru kondenzacije na suhi trdni površini prevzemajo vlogo kali delci nečistoč na površini in sama površina snovi, ki ni idealno gladka.

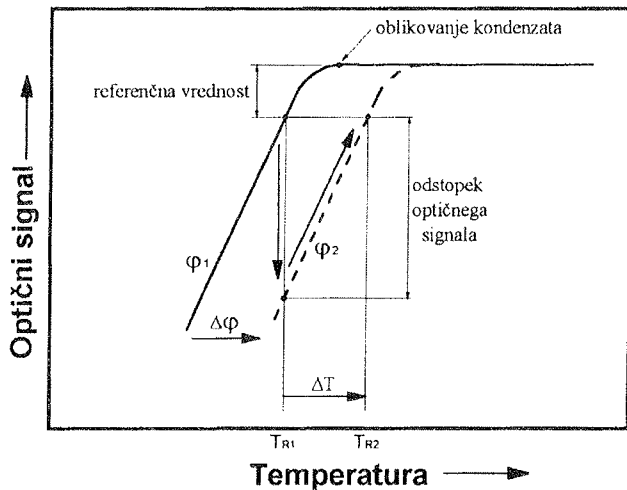
3. RAZVOJ IN IZDELAVA KONDENZACIJSKEGA VLAGOMERA

Kondenzacijski vlagomer je v grobem sestavljen iz štirih podsistemov. Osrednji sestavni del kondenzacijskega vlagomera je hlajena kovinska zrcalna površina v toku merjenega zraka, na kateri se pri temperaturi rosišča vlažnega zraka prične pojavljati kondenzat v tekoči ali trdni fazi. Njena temperatura je nadzorovana z vgrajenim temperaturnim zaznavalom. Za hlajenje zrcala se v novejših merilnikih, zaradi enostavnega krmiljenja moči hlajenja z napajalnim tokom, izključno uporablja termoelektrični hladilni element (Peltier). Pričetek oziroma potek kondenzacije zaznava optični detekcijski sistem na podlagi spremembe intenzitete na kovinskem zrcalu odbite oziroma sipane svetlobe. Sistem je v komercialnih merilnikih izveden z v ohišje merilne komore vgrajenima polprevodniškimi laserskimi izvorom in optičnim sprejemnikom /5/. Uporaba vlaknaste optike omogoča namestitve obeh elektrooptičnih elementov izven merilne komore /8,9/. Naloga elektronskega krmilnika je nadzor nad merilnim procesom glede na režim delovanja merilnika in preračun izmerjene temperature rosišča v željene veličine, ki definirajo parametre vlažnega zraka. Celotni sistem vlagomera je shematsko prikazan na sliki 2.



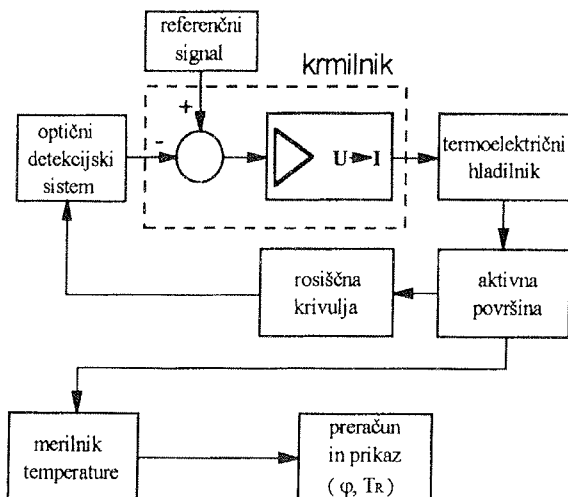
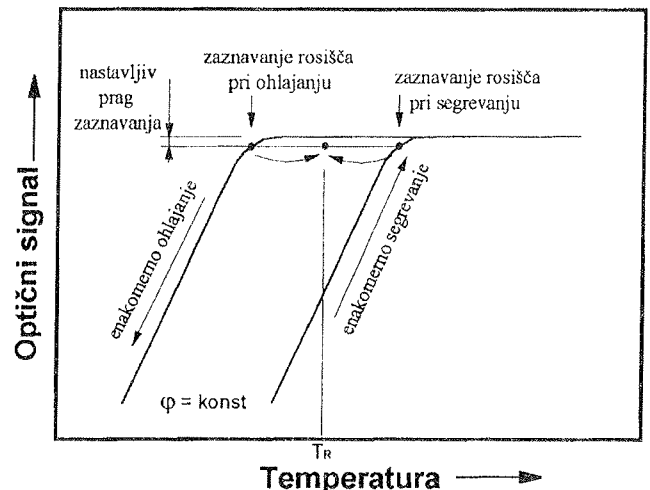
Slika 2: Shematski prikaz običajnega kondenzacijskega vlagomera

Merilnik lahko deluje v dveh režimih:

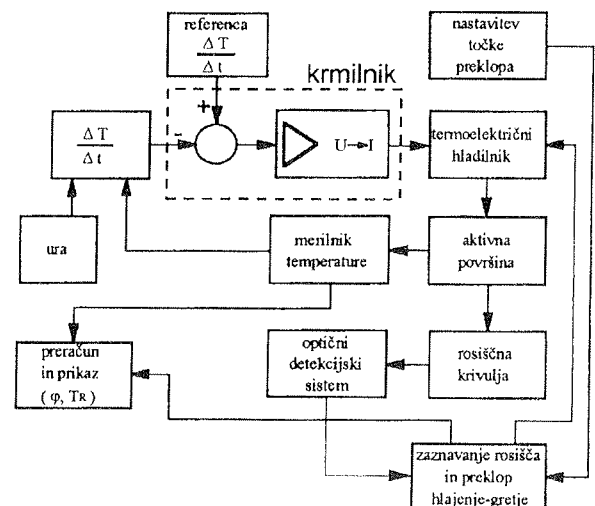


– zvezni režim delovanja izkorišča približno linearno odvisnost optičnega signala pri oblikovanju kondenzata na zrcalni površini. Krmilnik v tem primeru skrbi za vzdrževanje temperature zrcalne površine na vrednosti, ki bo pri dani vlažnosti merjenega zraka zagotavljala enakomerno debelino plasti kondenzata in s tem enakomerno razliko med merjenim in referenčnim signalom. Sistem torej odgovarja spremembi vlažnosti zraka s spremembo temperature površine (slika 3). V preteklosti se je izključno uporabljalo to načelo delovanja /5,13/. Pomanjkljivosti, kot so stalna prisotnost kondenzata na zrcalni površini, obvezna uporaba optične kompenzacijske metode in odmik izmerjene temperature od dejanske temperature rosišča, so botrovale razvoju merilnika z diskretnim režimom delovanja.

– pri diskretnem režimu delovanja se zrcalna površina enakomerno hladi. Ko je zaznana sprememba optičnega signala, povzročena s pojavom kondenzata, se proces obrne in poteka do trenutka, ko je zaznana sprememba na prvotno vrednost. Pri obeh mejnih trenutkih se odčita temperatura površine, srednja vrednost pa upošteva kot dejanska temperatura rosišča (slika 4). S tem so odpravljene po-



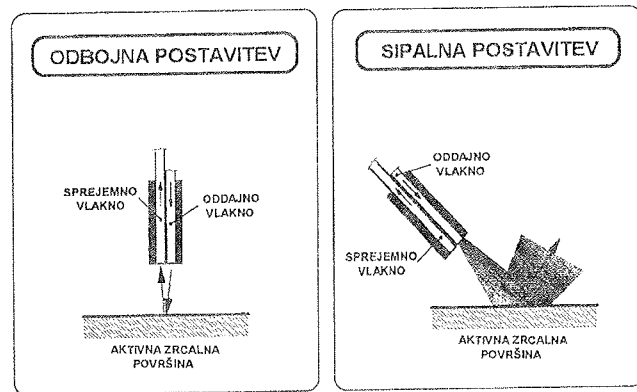
Slika 3: Zvezni režim - načelo delovanja in krmilnik



Slika 4: Diskretni režim - načelo delovanja in krmilnik

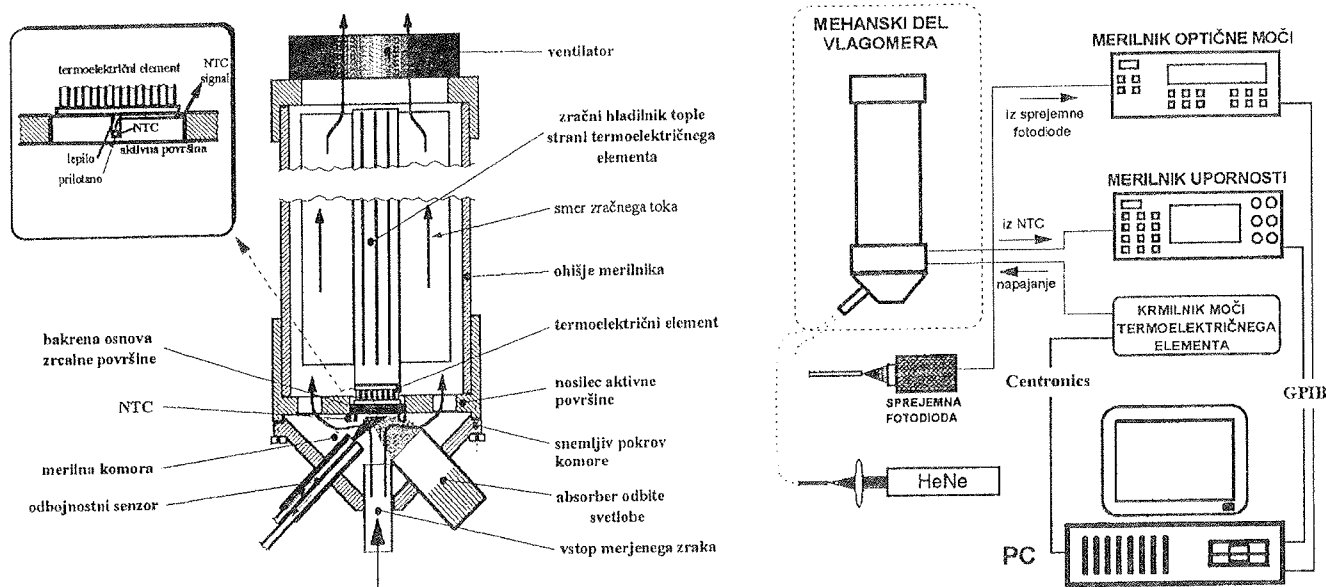
manjkljivosti zveznega režima na račun kompleksnejše krmilne zanke. Odčitek je namreč rezultat merilnega cikla, ki preide vsa stanja oblikovanja kondenzata od suhe površine do optično zaznavne debeline plasti kondenzata in to v smeri kondenzacije in izhlapevanja. Podoben režim delovanja je v literaturi že omenjen /9/, vendar izkorišča le območje kondenzacije, s čimer ni možno izločiti vpliva prenasičenja in dinamične značilnice temperaturnega zaznavala.

Značilnice kondenzacijskega vlagomera so določene z značilnicami temperaturnega zaznavala in optičnega detekcijskega sistema. Uporaba umerjenega uporovnega oziroma polprevodniškega temperaturnega zaznavala omogoča izmerke s točnostjo pod 0,1 K (0,7 %RH pri normalnih pogojih). Na izbiro vpliva predvsem možnost zagotovitve dobrega toplotnega spoja s kovinskim zrcalom in majhne toplotne vztrajnosti zaznavala. Obe zahtevi sta običajno s primernim oblikovanjem že zadovoljivo izpolnjeni. Razvoj optičnega detekcijskega sistema z vlaknasto optiko pa zasluži več pozornosti. Uporaba odbojnostnega zaznavala z optičnimi vlakni, nameščenega pravokotno na zrcalno površino, je v literaturi že omenjena /8,9/. S to postavitvijo se opazuje odbiti svetlobni žarek, kar onemogoča enostavno izvedbo optične kompenzacije za izločitev vplivov nihanja intenzitete izvora, spremembe absorpcije v obtekaajočem zraku ter staranja zrcala (nanos nečistoč). Problem je v zadovoljivi meri rešljiv s poševno postavitvijo optičnega zaznavala, ki zaznava sipani žarek (slika 5). Sprememba optičnega signala pri pojavi kondenzata na zrcalu je tedaj bolj izrazita, kot v primeru pravokotne postavitve odbojnostnega zaznavala. S tem se poveča razmerje med koristnim signalom in motnjami, kar omogoča zaznavanje plasti kondenzata v začetni fazi oblikovanja in s tem točno določanje temperature rosišča.

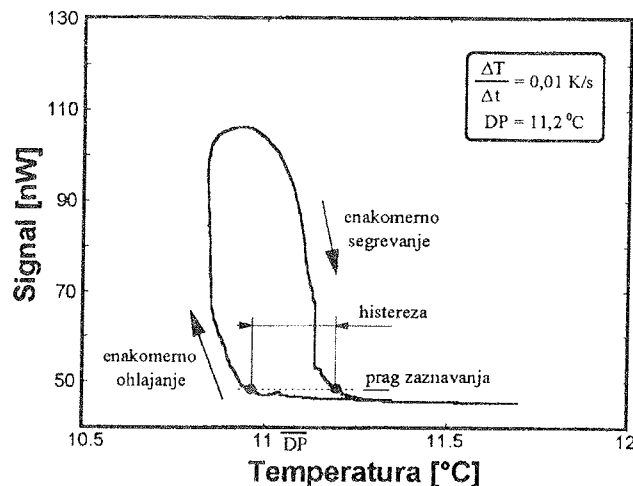
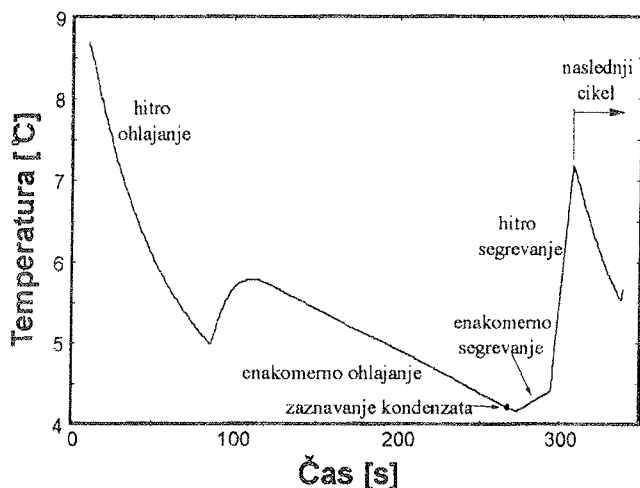


Slika 5: Primerjava pravokotne-odbojne in poševne-sipalne postavitve odbojnostnega zaznavala

Izdelani kondenzacijski vlagomer z optičnimi vlakni prikazuje slika 6. Običajno navzgor obrnjena zrcalna površina /7,8,10,13/ je v izdelku postavljena v nasprotni legi, s čimer se olajša izmenjava mejne zračne plasti ob zrcalu. Poleg tega zagotavlja konstrukcija komore optimalen obtok merjenega vlažnega zraka preko zrcalne površine. Obe konstrukcijski izboljšavi omogočata delovanje tudi pri zelo majhnih obtočnih hitrostih. Za merjenje temperature zrcalne površine je uporabljeno polprevodniško temperaturno zaznavalo z negativnim temperaturnim koeficientom (NTC), katero je v prvotni konstrukciji nameščeno na zrcalno površino, v končni obliki izdelka pa vgrajeno v samo osnovo zrcalne površine. Za oddajno vlakno odbojnostnega senzorja je bilo uporabljeno stekleno vlakno premera jedra 100 μm , sprejemno vlakno pa je bilo stekleno premera jedra 500 μm . Slika 7 prikazuje časovni potek temperature zrcalne površine in temperaturno odvisnost optičnega signala v enem merilnem ciklu zveznega režima delovanja. Slednji signal je identičen teoretičnemu s slike 4 z upoštevanjem sipalne postavitve optičnega sprejemnika.



Slika 6: Prikaz izvedbe mehanskega dela in shema postavitve izdelanega kondenzacijskega vlagomera



Slika 7: Časovni potek temperature zrcalne površine in temperaturna odvisnost optičnega signala v enem merilnem ciklu izdelanega vlagomera.

4. MERITVE ZNAČILNIC VLAGOMERA

Z izvedenimi preizkusi smo določili značilnice izdelanega vlagomera, kot tudi raziskali vpliv nekaterih dejavnikov na delovanje merilnika. Meritve so bile izvedene v zaprtem in glede poteka vlage kontroliranem prostoru s primerjavo odčitkov izdelanega in izbranega primerjalnega ali referenčnega merilnika.

Z uvodnimi preizkusi je bilo ugotovljeno, da odčitki kondenzacijskega vlagomera sledijo odčitkom referenčnega merilnika s sistemskim merilnim pogreškom ($+3 \pm 0,5 \% \text{ RH}$ pri normalnih pogojih). Vzrok za nastalo sistemsko razliko smo prvotno iskali v postavitvi temperaturnega zaznavala, legi zrcalne površine, hitrosti obtekanja merjenega zraka in hitrosti spreminjanja temperature zrcalne površine. Rezultati preizkusov, katerih namen je bil lociranje vzroka odstopka, so z navedbo odstopka relativne vlažnosti ΔRH in širine histereze optičnega signala podani v preglednicah 1 do 3. Navedene so povprečne vrednosti 10-ih ponovljenih meritev pri nespremenjenih zunanjih pogojih (referenčni merilnik: ROTRONIC MP 100A&C94 z deklarirano merilno točnostjo $\pm 1 \% \text{ RH}$).

Preglednica 1: Vpliv lege zrcalne površine in dodatne toplotne izolacije temperaturnega zaznavala

lega	dodatna izolacija		brez dodatne izolacije	
	ΔRH [%RH]	histereza [K]	ΔRH [%RH]	histereza [K]
↑	4,5	$\pm 0,16$	4,9	$\pm 0,16$
→	4,4	$\pm 0,24$	4,8	$\pm 0,25$
↓	5,7	$\pm 0,35$	6,1	$\pm 0,35$

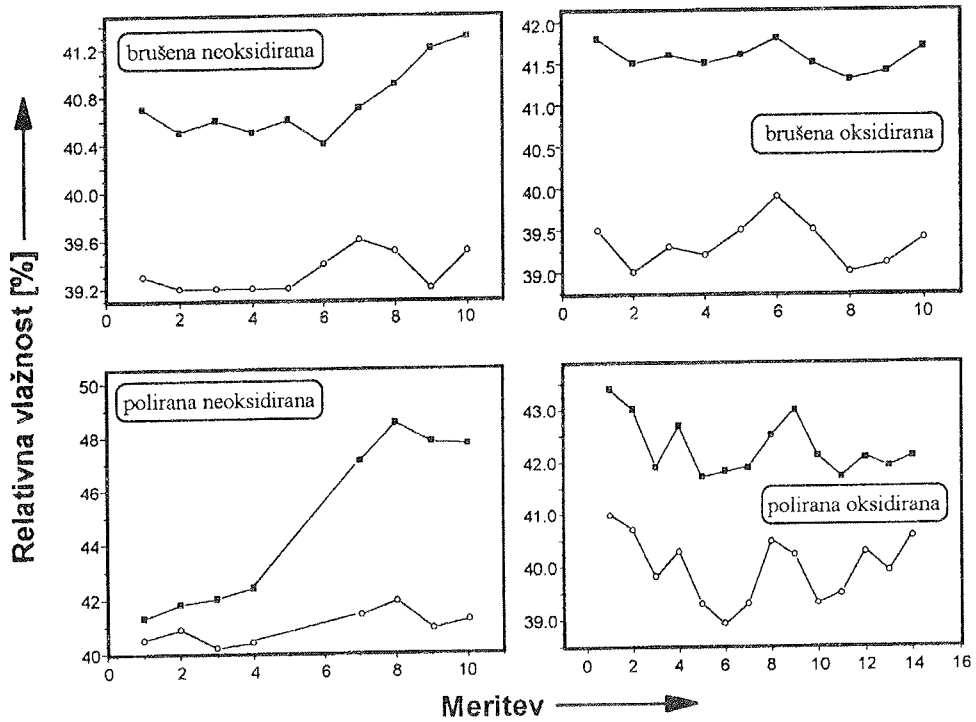
Preglednica 2: Vpliv hitrosti obtekajočega zraka

hitrost obtekanja	konvekcija	0,2 m/s	0,8 m/s
ΔRH [%RH]	3,8	4,0	3,6
histereza [K]	0,24	0,16	0,15

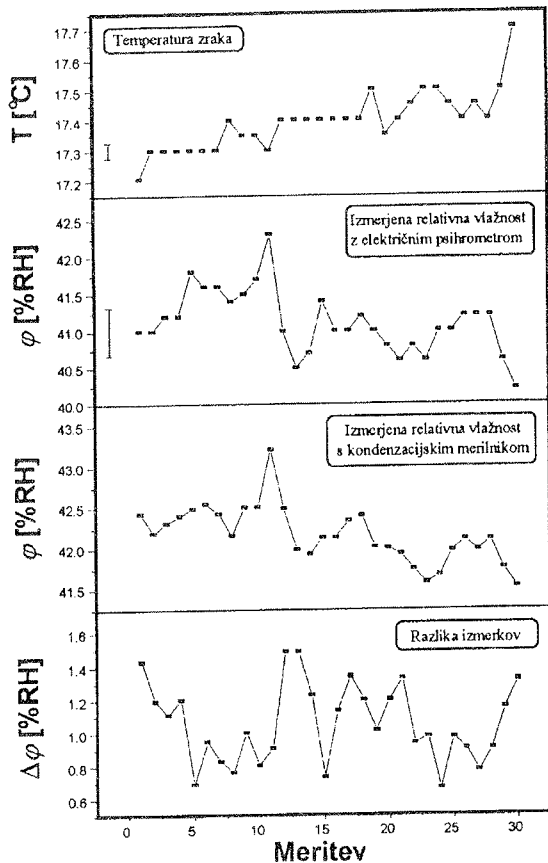
Preglednica 3: Vpliv hitrosti spreminjanja temperature zrcalne površine

$\Delta T/\Delta t$	0,01 K/s	0,03 K/s	0,06 K/s
ΔRH [%RH]	3,5	4,5	5
histereza [K]	0,11	0,27	0,41

Ker je vpliv dodatne toplotne izolacije temperaturnega zaznavala opazen, je treba tega vgraditi v samo osnovo zrcalne površine. S tem je preprečeno njegovo segrevanje zaradi obtekajočega zraka, ki je bistveno toplejši od zrcalne površine. Vpliv lege površine je očiten le pri navzgor obrnjeni površini, saj tanka plast ohlajenega zraka nad njo, ki je prisotna kljub prisilnem obtoku, deluje kot toplotni izolator. Pri ostalih dveh legah je izmenjevanje te plasti olajšano s konvekcijo. Hitrost obtekanja zraka na merilni pogrešek bistveno ne vpliva, medtem ko je vpliv hitrosti spremembe temperature opazen. Pojav je možno pojasniti s počasnim procesom kondenzacije in izrazitejšim vplivom dinamičnih značilnosti same zrcalne površine in temperaturnega zaznavala. Bistveni vzrok merilnega pogreška pa je očitno treba iskati v pomiku ravnotežne kondenzacijske krivulje (slika 1). Rezultat preverjanja vpliva hrapavosti in snovi zrcalne površine je prikazan na slikah 8 in 9



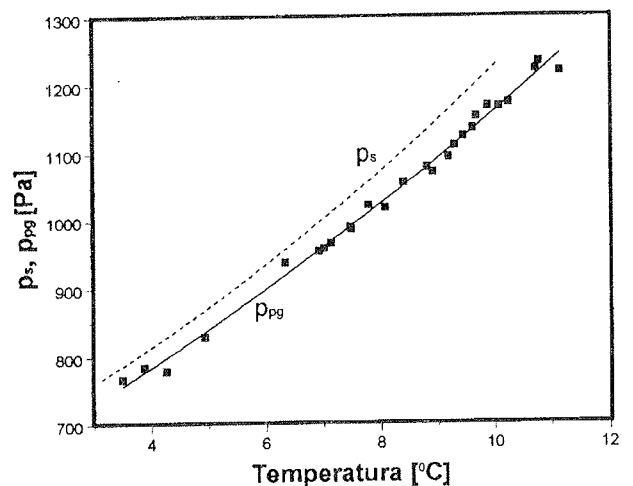
Slika 8: Primerjava izmerkov električnega psihrometra (○) in kondenzacijskega vlagomera (■) z različnimi zrcalnimi površinami (baker; brušeno $R_a = 2 \mu\text{m}$, polirano $R_a < 0,6 \mu\text{m}$)



Slika 9: Primerjava izmerkov električnega psihrometra in kondenzacijskega vlagomera s polirano zrcalno površino, prevlečeno s protikorozijskim slojem

(referenčni merilnik: električni psihrometer Ahlborn Therm 2286-2). V vseh primerih je osnova zrcalne površine bakrena, medtem ko je sama površina brez oksidirane plasti (neposredno po obdelavi), s plastjo oksida, oziroma neposredno po obdelavi prevlečena s protikorozijskim neomočljivim slojem (ločilna pasta za poliestrske kalupe). Meritve so bile izvedene pri enakomernih ter nespremenjenih zunanjih pogojih.

Zaključimo lahko, da na pomik rosiščne krivulje (specifično vezalno energijo) bistveno vpliva oksidacija površine. Vpliv je bolj izrazit na polirani površini. Z nanosom protikorozijskega sloja preprečimo oksidacijo



Slika 10: Eksperimentalna ravnotežna krivulja (p_{pg}) za polirano bakreno površino s protikorozijskim slojem v primerjavi z rosiščno krivuljo čiste vode (p_s)

in zagotovimo časovno nespremenljive pogoje kondenzacije, kar se odrazi s časovno enakomernimi odstopki izmerkov pri enakomerni vlažnosti merjenega zraka.

Odstopek izmerka pri isti vezalni energiji je teoretično odvisen le od rosiščne temperature (enačba 4). Trditev smo preverili iz izvedbo serije meritev pri spreminjanju se vlažnosti merjenega zraka. Pomik ravnotežne krivulje za obravnavano zrcalno površino je prikazan na sliki 10.

5. SKLEPI

V prispevku je prikazan del razvoja prototipnega kondenzacijskega vlagomera z optičnim sistemom za detekcijo sipanega žarka, ki je izveden z odbojnostnim zaznavalom z optičnimi vlakni. Merilnik deluje v diskretnem režimu - upošteva temperaturi rosišča vlažnega zraka v obeh smereh faznega prehoda. Prikazani so eksperimentalno ovrednoteni vplivi lege zrcalne površine, hitrosti obtoka zraka, hitrosti spreminjanja temperature zrcala in snovi ter hrapavosti površine zrcala na merjeno vrednost rosiščne temperature. Metrološke značilnice obravnavanega kondenzacijskega vlagomera z upoštevanjem pomika ravnotežne krivulje presegajo značilnice uporabljenih referenčnih vlagomerov, zato navajamo naslednje ocene merilno-tehničnih parametrov:

- ponovljivost vlagomera je manjša kot 0,35 %RH,
- relativni merilni pogrešek je manjši kot ± 1 %RH,
- histereza določitve temperature rosišča je pri diskretnem režimu delovanja zanemarljiva,
- čas merilnega cikla znaša od 3 do 5 min odvisno od vlažnosti in temperature zraka ter izbrane hitrosti spreminjanja temperature zrcalne površine.

6. LITERATURA

- /1/ D. Stanković: Fizičko-tehnička merjenja, Naučna knjiga, Beograd, (1987)
- /2/ D. Voronjec, Đ. Kozic: Vlažan vazduh, Smeits, Beograd, (1980)
- /3/ K. Carr - Brion: Moisture Sensors in Process Control, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., London, (1986)

- /4/ J. Perovnik, I. Bajsić: Pregled metod merjenja vlažnosti zraka, Strojniški Vestnik, Vol. 39, No. 3-4, 99, (1993)
- /5/ Advanced Industrial Hygrometry and Process Instrumentation, katalog firme MICHELL Instruments
- /6/ A Guide to the Measurements of Humidity, National Physical Laboratory, The Institute of Measurement and Control, London, (1996)
- /7/ V. J. Kardos, G. J. Sonek: A dewpoint temperature sensor based on Nd³⁺ doped fiber fluorescence, IEEE Photonics Tech. Lett., Vol. 7, No. 10, 1198, (1995)
- /8/ S. Matsumoto, S. Toyooka: Laser dew-point hygrometer, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 34, 316, (1995)
- /9/ F. Dadachanji: Humidity measurement at elevated temperatures, Measurement & Control, Vol. 25, 48, (1992)
- /10/ A. Babnik: Nove vrste odbojnostnih senzorjev z optičnimi vlakni, disertacija, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, (1997)
- /11/ D. A. Krohn: Intensity modulated fiber optic sensors: overview, Fiber Optic Sensors IV, SPIE 718, Massachusetts, 2, (1986)
- /12/ M. Oprešnik: Termodinamika zmesi, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, (1988)
- /13/ R. F. Pragnell: The modern condensation dewpoint hygrometer, Measurement and Control, Vol. 22, 74, (1989)

dr. Aleš Babnik, dipl. ing. str.
Andrej Kobe, dipl. ing. fiz.
doc. dr. Ivan Bajsić, dipl. ing. str.
prof. dr. Janez Možina, dipl. ing. fiz.

UNIVERZA V LJUBLJANI
Fakulteta za strojništvo,
Aškerčeva 6
1000 LJUBLJANA

Prispelo (Arrived): 16.6.1997

Sprejeto (Accepted): 23.6.1997