

Andrzej ROSIAK¹, Roman GOZDUR², Andrzej MAJOCHA²¹ POLITECHNIKA ŁÓDZKA, KATEDRA TECHNIKI CIEPLNEJ I CHŁODNICTWA, ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź² POLITECHNIKA ŁÓDZKA, KATEDRA PRZYRZĄDÓW PÓŁPRZEWODNIKOWYCH I OPTOELEKTRONICZNYCH, ul. Wólczańska 211/215, 90-924 Łódź**Ultradźwiękowy system pomiarowy do detekcji przemian fazowych i postaciowych wody****Dr inż. Andrzej ROSIAK**

Jest adiunktem w Katedrze Techniki Ciepłej i Chłodnictwa na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej, gdzie pracuje od czasu ukończenia studiów w 1976 roku. Wykonuje prace badawcze i naukowe, dotyczące chłodnictwa i jego zastosowań. Zawodowa specjalność to technika ciepła: od jej podstaw po zastosowania specjalistyczne. Ostatnie zainteresowania to wymiana ciepła w miniaturowych termoelektrycznych pompach ciepła oraz rozpoznawanie przemian fazowych wody w cienkich warstwach z użyciem ultradźwięków.

e-mail: andrzej.rosiak@p.lodz.pl**Dr inż. Andrzej MAJOCHA**

Stopień magistra w specjalności automatyka i metrologia otrzymał w 1978 roku oraz stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie metrologia w 1987 roku na Politechnice Łódzkiej. Od 2009 roku pracuje w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych Politechniki Łódzkiej. Realizuje prace z zakresu projektowania i konstruowania aparatury pomiarowej, projektowania i integracji systemów transmisji radiowej oraz badania materiałów magnetycznych i półprzewodnikowych.

e-mail: amajocha@p.lodz.pl**Dr inż. Roman GOZDUR**

Stopień magistra informatyki stosowanej otrzymał w 2000 roku oraz stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika w 2004 roku na Politechnice Łódzkiej. Od 2009 roku pracuje w Katedrze Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych Politechniki Łódzkiej. Realizuje prace z zakresu technik DSP, projektowania, programowania i integracji komputerowych systemów pomiarowych oraz badania materiałów magnetycznych i półprzewodnikowych.

e-mail: gozdur@p.lodz.pl**1. Wstęp**

Wymienniki ciepła pracujące w typowych warunkach środowiskowych w naturalny sposób mogą akumulować wilgoć. W zależności od warunków termicznych i wilgotnościowych para wodna osiada na powierzchni wymiennika w postaci wody, szronu lub lodu. W celu identyfikacji zachodzących przemian fazowych i postaciowych wilgoci, opracowano wieloczułkowy interfejs pomiarowy dla tzw. kolektora wody / szronu / lodu [1, 2, 3]. Procesy jednoczesnej wymiany ciepła i masy mogą przebiegać w sposób zdeterminowany lub chaotyczny. Stawia to duże wymagania metrologiczne. Zastosowana aparatura pomiarowa musi zapewniać pomiar parametrów procesów statycznych oraz dynamicznych. Metody i techniki pomiarowe powinny być odpowiednio dobrane ze względu na dokładności, dynamikę oraz zakresy pomiarowe [4,5]. System pomiarowy powinien zawierać różnorodne sensory i przetworniki tak, aby jednocześnie realizować pomiar oraz współbieżnie śledzić identyfikowane procesy fizyczne.

Uzyskane unikalne wyniki pomiarów potwierdzają skuteczność identyfikacji zachodzących procesów jednoczesnej wymiany ciepła i masy.

2. System pomiarowy

System przedstawiony na rysunku 1 zawiera trzy funkcjonalne bloki. W pierwszym bloku znajduje się obiekt czyli miedziana płyta o powierzchni około 2dm², owiewana powietrzem. Ten blok nazwany kolektorem wypełnia funkcję (re-)akumulatora wody, szronu lub lodu na wierzchniej powierzchni obiektu. Powietrze jest pobierane z otoczenia budynku przez filtr tkaninowy i może być ogrzewane albo oziębiane w centrali wentylacyjnej a także dodatkowo nawilżane. Na spodniej powierzchni obiektu znajdują się moduły termoelektryczne (Peltiera), wymieniające ciepło z glikolem o stabilizowanej temperaturze (w zakresie od 0.0 do +40°C). Drugi blok to wieloczułkowy interfejs. Na rysunku 1 lokalizację elementów należących do bloku drugiego wskazane są symbolem gwiazdka *. Elementy interfejsu podłączone są do karty pomiarowej realizującej pomiar sygnałów analogowych. Całość zarządzana jest z poziomu komputera, pracującego jako kontroler procesu i rejestrator danych pomiarowych będący trzecim blokiem funkcjonalnym.

Zmiany wartości i zwrotów strumienia ciepła na wierzchniej powierzchni obiektu są ściśle zdeterminowane przez nastawy i zwroty prądów, płynących przez moduły Peltiera (osiem modułów termoelektrycznych o łącznej mocy 200W). Regulacja nastaw źródeł prądowych umożliwia wymuszanie zmian temperatury na powierzchni wymiennika w zakresie od -30°C do +100°C. Stała czasowa całego układu cieplnego w zakresie od -10°C do +60°C jest na poziomie 100s, co pozwala odpowiednio szybko zadawać

Streszczenie

W artykule zaprezentowano system z termoelektryczną kaskadową pompą ciepła do detekcji przemian fazowych i postaciowych wody. Zastosowanie metod ultradźwiękowych zwiększa radykalnie możliwości oraz jakość identyfikacji procesów przemian wody zachodzących na powierzchniach wymienników sprzężonych z kaskadami modułów Peltiera. System ze względu na jego charakterystyczne właściwości pozwala na identyfikację przemian fazowych wody i określanie czy zachodzące procesy mają stochastyczny czy też chaotyczny charakter przebiegu.

Słowa kluczowe: pomiary ultradźwiękowe, ultradźwiękowe detektory, przemiany fazowe wody, wymiennik ciepła, szronienie, chaos.

Ultrasonic measurement system for detection of water phase and form transitions**Abstract**

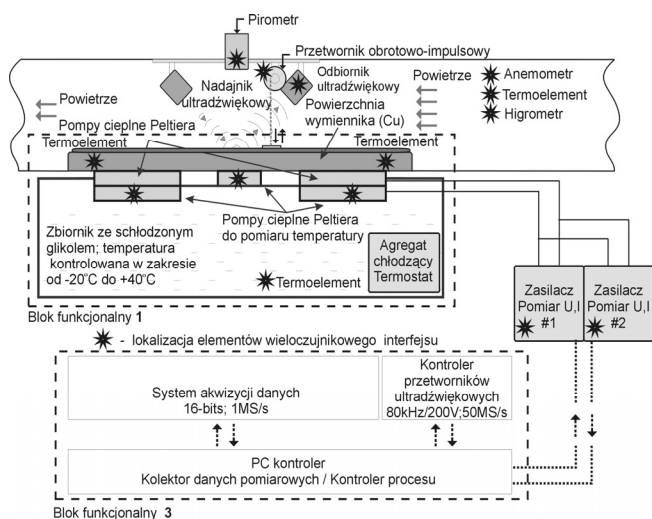
The paper deals with systems coupled with Peltier pumps for detecting and identifying the water phase and form transition (condensation, frosting, icing, sublimation, melting, drying). The developed multisensory interface system combines conventional measurement techniques with ultrasound techniques. Use of ultrasound methods radically enhances the capabilities and the quality of identifying transition processes of accumulated liquid water, frost or ice on the surface coupled with Peltier pump module cascades. Due to its properties, the system is capable of identifying and determining whether phase transitions have stochastic or chaotic flow. The described system also enables identifying and measuring the water phase transition parameters with high accuracy and repetitiveness. As opposed to other non-contact methods of detection (pyrometric, thermovisual and visual), the presented system with use of ultrasound method allows for unambiguous detection and identification of the phase and form of water transitions. Considering that the analysis of phenomena occurring on the surface of the exchanger relates exclusively to 1D signals and not 2D or 3D images it can be concluded that this system is simpler and cheaper than alternative solutions. This refers mainly to software and metrological system requirements. This system enables the use of simpler methods of calibration and transfer measurement standards than visual methods which are often used to identify phase transitions.

Keywords: ultrasonic measurements, ultrasonic detectors, water phase transition, heat exchanger, frosting, chaos.

warunki ciepło-przepływowe. Obiekt jest osłonięty grubą, przezroczystą osłoną, pozwalającą na obserwacje jego powierzchni.

Schemat rozmieszczenia elementów wieloczułkowego interfejsu pomiarowego przedstawiony jest na rysunku 1, a parametry i zakresy pomiarowe elementów interfejsu zestawione są w tabeli 1. Przy realizowaniu różnych procesów (osuszanie, osadzanie, topienie, zamarzanie, wysychanie) rejestrowane są następujące parametry:

- temperatura (z zastosowaniem miniaturowych termopar typu T: Cu-CuNi oraz pirometru),
- masa akumulowanej warstwy wody / szronu / lodu (precyzyjną wagą elektroniczną),
- grubość warstwy (za pomocą enkodera inkrementalnego a pośrednio także z użyciem systemu ultradźwiękowego, generującego tak niewielką moc akustyczną, że nie wywiera ona wpływu na parametry ciepło-przepływowe badanych procesów),
- prędkość strumienia powietrza (anemometrem, z elementem grzejmym wykonanym w technologii cienkowarstwowej),
- wilgotność (higrometrem pojemnościowym),
- echo fali ultradźwiękowej odbitej od akumulowanej warstwy wilgoci (generacja i odbiór fal ultradźwiękowych odbywa się poprzez dwie oddzielne głowice ultradźwiękowe),
- prąd i napięcie źródeł, zasilających kaskadę Peltiera,
- siła termoelektryczna modułów Peltiera (pracujących jako elementy pomiaru strumienia ciepła metodą ścianki pomocniczej).



Rys. 1. Schemat ideowy systemu pomiarowego z zaznaczoną lokalizacją punktów pomiarowych interfejsu pomiarowego

Fig. 1. Measurement system schematics with multisensory interface and sensor locations

Tab. 1. Zestawienie zakresów i dokładności najważniejszych wielkości mierzonych w systemie

Tab. 1. Ranges and accuracy of the main values measured in the system

Lp.	Wielkość mierzona	Dokładność	Zakres pomiarowy
1	Temperatura	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$	$(-20.0 \div 80.0)^{\circ}\text{C}$
2	Grubość warstwy	$\pm 0.025\text{mm}$	$(0.100 \div 4.000)\text{mm}$
3	Masa warstwy	$\pm 0.01\text{g}$	$(0.01 \div 4000.00)\text{g}$
4	Prąd pomp ciepła	$\pm 0.02\text{mA}$	$(0.10 \div 3000.00)\text{mA}$
5	Siła termoelektryczna	$\pm 0.002\text{mV}$	$(0.005 \div 500.00)\text{mV}$

Miniaturowe czujniki termoelektryczne podłączone są do dedykowanych wejść termoparowych 16-bitowych przetworników

analogowo-cyfrowych. Pozostałe sygnały pomiarowe, analogowe (higrometr, pirometr, anemometr i sygnały termoelektryczne modułów pomiarowych Peltiera) podłączone są poprzez wzmacniacze PGA do pozostałych wejść przetworników A/C również 16 bitowych. 32 bitowy licznik rewersyjny realizuje pomiar położenia enkodera. Układ pomiarowy ultradźwiękowy realizuje oddzielny kontroler, pracujący w trybie separowanych przetworników nadajnik – odbiornik fali ultradźwiękowej. Zapewnia on synchroniczne wzbudzenie czujnika piezoelektrycznego falą o modulowanej amplitudzie do 200V, częstotliwości 80kHz i regulowanym wypełnieniu impulsu od 10ns do 200ns. Pomiar echa fali ultradźwiękowej realizowany jest poprzez 10-bitowy przetwornik AD próbkujący z częstotliwością próbkowania 50MS/s poprzedzony bankiem filtrów antyaliasingowych, dolno-przepustowych, górnoprzepustowych i wzmacniaczem PGA.

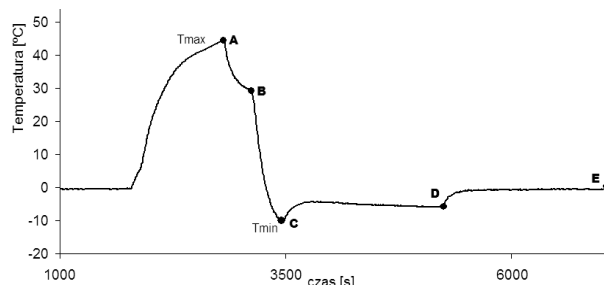
Cały proces pomiarowy kontrolowany jest poprzez komputer PC jako kontroler procesu. Komunikacja i sterowanie blokiem generatora i blokiem pomiarowym odbywa się poprzez zadawanie określonych warunków wymiany na powierzchni aktywnej wymiennika w sześciu etapach. Przechodzenie do kolejnych etapów i związana z tym zmiana nastaw parametrów pracy wymiennika wyzwalana jest poprzez opracowany system programowego układu wyzwalania, reagującego odpowiednim warunkiem algebraicznym na czas, temperaturę, tłumienie echa i opóźnienie echa fali ultradźwiękowej. Skala czasowa 6-etapowego cyklu ograniczona została do 48 godzin (z możliwością automatycznego wznowiania cyklu).

Wszystkie parametry pracy kolektora, bloku pomiarowego są zadawane z poziomu aplikacji sterującej procesem, która została opracowana w języku C++ na potrzeby prezentowanego systemu.

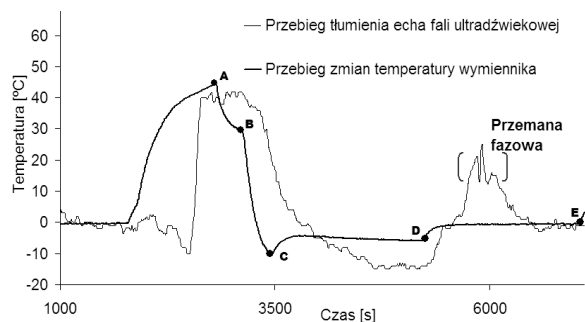
W celu uzyskania możliwie dużej dokładności pomiaru i jakości rejestrowanych przebiegów oprogramowanie rozbudowane zostało o moduł algorytmów DSP wykonujących filtrację, FFT, korekcję i operacje transformacji liniowych na sygnałach rejestrowanych w systemie.

3. Wyniki pomiarów

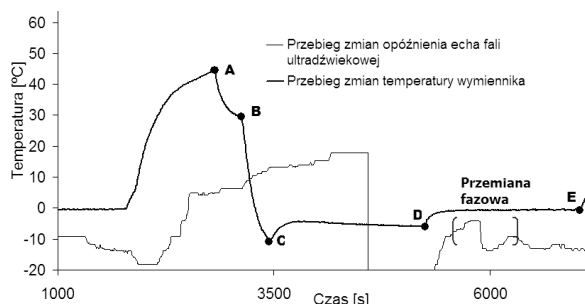
Na rysunku 2 pokazano jeden z typowych cykli procesu z cienko-warstwową (re-)akumulacją wody ciekłej i stałej. Każdy cykl zawiera 5 etapów charakteryzujących się różnymi nastawami parametrów termoelektrycznej pompy ciepła: A-B: etap I (zadany czas 300 s) – oziębianie płyty od temperatury T_{\max} ; B-C: etap II – szybkie oziębianie płyty do temperatury T_{\min} ; C-D: etap III – akumulowanie szronu (1800 s); D-E: etap IV – ogrzewanie (1800 s), obserwowana jest zmiana struktury szronu a następnie zjawisko falowe nr 1: topienie porowatej warstwy szronu; E-A: etap V - ogrzewanie wody lodowej oraz osuszanie obiektu przy szybkim wzroście temperatury do wartości T_{\max} . (skokowa zmiana parametru tłumienie w chwili znikania fazy ciekłej z obiektu wskazuje na zjawisko falowe nr 2).



Rys. 2. Przebieg zmian temperatury powierzchni wymiennika, zarejestrowany jako sygnały z termoelementu i pirometru ($T_{\text{air}}=12^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{air}}=2.5\text{ m/s}$; $RH_{\text{air}}=40\%$)
Fig. 2. Exchanger surface temperature change recorded as a signal from the thermocouples and the pyrometer ($T_{\text{air}}=12^{\circ}\text{C}$; $V_{\text{air}}=2.5\text{ m/s}$; $RH_{\text{air}}=40\%$)



Rys. 3. Względne zmiany tłumienia echa fali ultradźwiękowej naniesione na współbieżny przebieg zmian temperatury w kolejnych etapach procesu
Fig. 3. Relative changes of ultrasound wave damping in relation to changes of the exchanger surface temperature



Rys. 4. Względne zmiany opóźnienia echa fali ultradźwiękowej naniesione na współbieżny przebieg zmian temperatury w kolejnych etapach procesu
Fig. 4. The relative delay of the ultrasound wave echo in relation to temperature changes in the successive stages of the process.

4. Podsumowanie

Prezentowany system umożliwia identyfikację i pomiar parametrów przejść fazowych wody z dużą powtarzalnością. Zastosowana ultradźwiękowa technika pomiarowa wykorzystana do identy-

fikacji przemian jest wyjątkowo czuła i zapewnia detekcję przemian fazowych w w cienkich warstwach filmu wodnego. W odróżnieniu od bezinwazyjnych metod detekcji opartych o metody pirometryczne, termowizyjne i wizyjne prezentowany system z zastosowaniem metody ultradźwiękowej pozwala na jednoznaczne wykrycie i identyfikację przemiany fazowej. Biorąc pod uwagę to, że analiza zjawisk zachodzących na powierzchni wymiennika dotyczy wyłącznie sygnałów jednowymiarowych, a nie obrazów 2D lub 3D, można stwierdzić, że prezentowany system jest prostszy i tańszy względem rozwiązań alternatywnych [4, 5]. Dotyczy to głównie oprogramowania i wymagań metrologicznych systemu. W odróżnieniu od metod wizyjnych coraz chętniej stosowanych do identyfikacji przemian fazowych, prezentowane rozwiązania pozwalają na dużo prostsze metody kalibracji i transferowania wzorców do systemu.

5. Literatura

- [1] Rosiak A.: Experimental frosting parameters of the flat plate with one side flow around with humid air. Chapter of: Thermodynamics in Science and Industry, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008, ISBN 978-83-7493-406-0, tom II, s.290-295.
- [2] Rosiak A.: Experimental verification of plate frosting parameters. Part 1. Czasopismo Chłodnictwo tom XLIII, 2008, nr 1-2.
- [3] Rosiak A.: Experimental verification of plate frosting parameters. The measured parameters of process. Part 2, Czasopismo Chłodnictwo tom XLIII, 2008, nr 7.
- [4] Thomas L., Chen H., Besant R.W., Measurement of frost characteristics on heat exchanger fins. Part I: Test facility and instrumentation, ASHRAE Transaction, Issue: 2 (1999), s.283-293.
- [5] Weremczuk, J.; Wawrzyniak, Z.; Jachowicz, R.S.: A new method of super-cooled water recognition in dew point hygrometer by morphology-based image processing. Sensors and Actuators A: Physical Volume: 111, Issue: 2-3, March 15, 2004, s. 240-244.

otrzymano / received: 03.07.2010

przyjęto do druku / accepted: 01.09.2010

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo-technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo-technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.