

Mykhaylo DOROZHOVETS, Olena KULYK

POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW DIAGNOSTYCZNYCH, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów
 NARODOWY UNIWERSYTET "LIVSKA POLITECHNIKA", KATEDRA TECHNOLOGII INFORMACYJNO POMIAROWYCH, Ukraina

Analiza problemów pomiarów ciepła z wykorzystaniem hydrodynamicznego przepływomierza z wbudowanym rezystancyjnym czujnikiem temperatury

Prof. dr hab. inż. Mykhaylo DOROZHOVETS



Jest absolwentem (1975) Katedry Techniki Informacyjno-Pomiarowej Politechniki Lwowskiej, w 2001 r. obronił pracę habilitacyjną. Obecnie jest zatrudniony na stanowisku profesora zwyczajnego w Katedrze Metrologii i Systemów Diagnostycznych Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się analizą i oceną niepewności wyników pomiarów, zagadnieniami pomiarów tomograficznych oraz problemami przetwarzania sygnałów pomiarowych. Opublikował ponad 240 prac naukowych oraz 6 podręczników.

e-mail: michdor@prz.edu.pl

Mgr Olena KULYK



Absolwentka (2006) Katedry Techniki Informacyjno-Pomiarowej Politechniki Lwowskiej. W pracy naukowo-badawczej zajmuje się zagadnieniami pomiarów temperatury i ilości ciepła. Jest autorką 9 prac naukowych, uzyskała 1 patent Ukrainy.

e-mail: olka@artcreo.pl

Streszczenie

Autorzy na podstawie analizy typowego układu pomiaru ilości ciepła wykazali, że ma on kilka wad, m.in. nieuwzględnienie możliwej zmiany przepływu masowego z powodu straty technologicznej cieczy lub jej nieuprawnionego odbioru oraz wpływu zmiany charakterystyk cieplnych cieczy ze zmianą temperatury. W udoskonalonym układzie pomiaru ilości ciepła wykorzystuje się dwa przepływomierze (na wejściu i wyjściu), co pozwala uwzględnić stratę masowego przepływu cieczy.

Słowa kluczowe: pomiary, ciepło, przepływomierz, czujnik temperatury.

Analysis of problems of heat energy measurements with use of hydrodynamic flow-meters with embedded resistance temperature sensor

Abstract

The authors consider typical systems for heat energy measurements (Fig. 1). It is assumed that the liquid mass flow input and output are the same in a typical system. If there are technological losses of heat liquid or its stealing in a heating system, the output amount of liquid is less than the input amount. Then the methodical measurement error of the heat energy (formula (2)) appears. Another component of the measurement error is due to the influence of temperature on the heat capacity of liquid which is different at the input and output of the heating system (formula (3)). To eliminate the above-mentioned methodological errors, the heat energy must be measured at the input and output of the heating system (formula (5)). For this purpose there was proposed an improved system for measuring the amount of heat (Fig. 3). In this system there are used two flow-meters (input and output), which allows taking into account possible losses in the heating liquid. Hence, the relationship between the temperature of the liquid heat capacity (also at the input and output) (Fig. 3) is taken into consideration, too. In order to increase the accuracy of determining the heat by measuring the amount of the liquid movement and its temperature at the same point (which eliminates the appropriate component of the systematic measurement error), the authors developed a hydrodynamic flow-meter with a built-in resistance temperature sensor (Fig. 4). The instrumental component of the error of measuring the heat quantity (which is caused by use of two flow meters instead of one) was examined (formulas (6, 7)).

Keywords: measurement, heat energy, flow-meter, temperature sensor.

1. Wstęp

Obecnie w Ukrainie obliczanie zasobów paliwowo-energetycznych jest nieefektywne a ich zużycie charakteryzuje się ogromnymi stratami, z czego większość to straty wynikające z kradzieży, złego zarządzania i nieefektywnego wykorzystania urządzeń energetycznych. Przeniesienie ciepła z miejsca generacji do miejsca zużycia nie może być efektywnie zrealizowane bez dokładnego pomiaru, a bez precyzyjnego rejestrowania nie można

przeprowadzić wzajemnie uzgodnionych rozliczeń między konsumentami i producentami energii cieplnej.

Pomiary ilości ciepła w systemach zużywania lub generacji ciepła wykonywane są za pomocą liczników ciepła (rys. 1), które zawierają w swoim konstrukcyjnym układzie przepływomierz (w którym zrealizowana jest jedna z metod pomiaru przepływu: mechaniczna, hydrodynamiczna, elektromagnetyczna, ultradźwiękowa), oraz dwa specjalnie dobrane czujniki temperatury dla wyznaczenia różnicy temperatur cieczy między wlotem i wylotem dostaw energii cieplnej lub wytwarzania ciepła ze znaną charakterystyką tej cieczy, w szczególności jej pojemność cieplną [1]. Każdy z typów liczników ma swoje zalety i wady.

Liczniki z przepływomierzem elektromagnetycznym są najbardziej dokładne. Jednak mają one istotną wadę: z powodu negatywnej reakcji na zewnętrzne pola elektromagnetyczne, trzeba unikać przy ich stosowaniu kontaktu ze sprzętem AGD [2].

Liczniki z przepływomierzem mechanicznym pozostają najtańszym typem liczników ciepła, chociaż wymagają dodatkowych filtrów siatkowych. Ich główną wadą jest pogorszenie jakości pracy przy nadmiernej twardości wody. W takich warunkach mechaniczny przepływomierz może zupełnie przestać poprawnie działać.

Wadami liczników z przepływomierzem ultradźwiękowym są również błędne dane w wodzie mętnej, zła reakcja na nadmierną zawartość w wodzie pęcherzyków powietrza i nadmierna wrażliwość na skalę [3].

Typowe liczniki ciepła produkowane są przez firmy zagraniczne, takie jak "Siemens", "Danfoss", "Testoterm", "Katra" oraz krajowe, które produkują wysokiej jakości nowoczesne liczniki, których charakterystyki metrologiczne są na tym samym poziomie jak zagranicznych producentów. Wśród nich można wymienić: "Sempal Ltd" oraz "Vzlet premier" (Kijów), "Rodnik-Yut" ("Zaporizhzhya"), "Tachyon" (Charków), "Erhomera" (Dnipropetrowsk) - liczniki ultradźwiękowe; „Aqua Ukrainą” (Kijów), "KatrLess" (Kijów), "NIO-35" (Czernihów) - liczniki elektromagnetyczne; "Ukrvodservis" (Kijów), "Walean i K" (Równe), "Fabryka "Trud" (Luhansk) - liczniki turbinowe; "Werle-Donbas" (Doneck), "Elektrotermometriya" (Łuck), "Premeks inwestycyjne" (Sumy), "Zakład vodoteplolichnykyv" (Kijów), "Karpaty" (Iwano-Frankowski), "Systemy energetyczne" (Kijów), "Novator" (Chmielnicki) - liczniki mechaniczne.

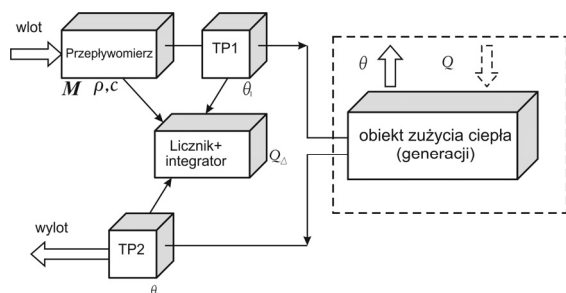
Istniejące liczniki ciepła różnych w systemach zużywania lub generacji ciepła pozwalają mierzyć ilość ciepła ze względnym błędem granicznym do 4-5 % [4, 5].

2. Analiza problemów pomiaru ilości ciepła w tradycyjnym układzie pomiarowym

Na rysunku 1 przedstawiono typowy układ do pomiaru ilości ciepła. W takim układzie zakłada się, że przepływy masy cieczy

na wlocie i wylocie są takie same, czyli $M_1 = M_2 = M$, oraz pojemność cieplna cieczy jest wartością stałą: $c_1 = c_2 = c$. W takim przypadku ilość ciepła, która jest przeniesiona do obiektu zużycia (lub generacji) w odcinku czasu ($t_2 - t_1$) jest wyznaczana według wzoru:

$$Q_{\Delta} = \int_{t_1}^{t_2} M c (\theta_1 - \theta_2) dt . \quad (1)$$



Rys. 1. Typowy układ do pomiaru ilości ciepła: TP1, TP2 – odpowiednio czujniki temperatury na wejściu i wyjściu systemu ogrzewania

Fig. 1. The traditional system of measuring the heat amount: TP1, TP2 - temperature sensors at the input and output of the heating system, respectively

Jeżeli z powodu straty cieczy M_{str} lub nieuprawnionego odbioru cieczy na wylocie z systemu ilość cieczy $M_2 = M_1 - M_{str}$ jest mniejsza od ilości wejściowej, wtedy powstaje systematyczny błąd pomiaru spowodowany nierównością $M_2 \neq M_1$, który można opisać zależnością:

$$\Delta Q_{\Delta str} = c_2 \theta_2 M_{str} . \quad (2)$$

Ponadto, biorąc pod uwagę, że ze zmianą temperatury cieczy zmienia się jej pojemność cieplna, powstaje również błąd systematyczny wynikający ze zmiany $c_{\Delta} = c_2 - c_1$ pojemności cieplnej cieczy na wlocie i wylocie:

$$\Delta Q_{\Delta c} = M_2 \theta_2 c_{\Delta} . \quad (3)$$

W tych wzorach M_{str} i c_{Δ} nie są błędami pomiaru tych wartości, a ich odchyleniami od wartości na wlocie. Jednak te wartości powodują błędy systematyczne pomiaru ilości ciepła - dlatego, że te błędy nie zależą od dokładności przepływomierza i czujników temperatury. Wartości błędów systematycznych obliczania ilości zużycia ciepła spowodowanych wpływem M_{str} i c_{Δ} nawet przy użyciu dokładnego przepływomierza i czujników temperatury mogą powodować zdecydowane odchylenie wyniku pomiaru zużytego ciepła od wartości rzeczywistej.

Wiadomo jest [1, 6], że pojemność cieplna wody (najczęściej wykorzystywana ciecz) zależy od temperatury i te zależności w zakresie roboczym mogą być przedstawione w postaci tabeli 1.

Tab. 1. Zależność temperaturowa pojemności cieplnej wody [1]
Tab. 1. Temperature dependence of water heat capacity [1]

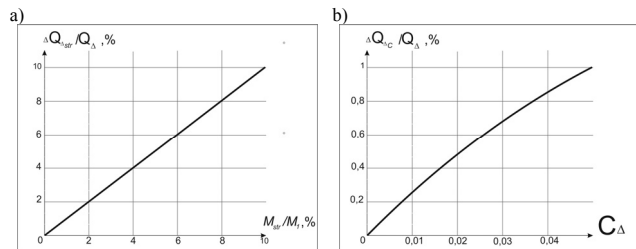
θ , °C	30	40	50	60	70	80	90
c , kJ/(kg·°C)	4,174	4,174	4,174	4,179	4,187	4,195	4,202

Wtedy po uwzględnieniu temperaturowych zmian pojemności cieplnej zależność (3) można zapisać jako:

$$\Delta Q_{\Delta c} = M_2 \theta_2 (c(\theta_1) - c(\theta_2)) \quad (4)$$

Wartość błędu systematycznego wynikającego ze zmiany pojemności cieplnej cieczy jest tym większa im większa jest różnica jej temperatury na wlocie i wylocie.

Na rys. 2 pokazano wartości błędu systematycznego (w %) wyznaczania ilości zużytego ciepła od straty przepływu masowego cieczy i od zmian pojemności cieplnej ze zmianą temperatury.



Rys. 2. Wartości błędu systematycznego (w %) wyznaczania ilości zużytego ciepła od strat przepływu masowego cieczy a) oraz w wyniku zmian pojemności cieplnej cieczy przy zmianie jej temperatury b)

Fig. 2. Systematic error value of determining the quantities of heat due to liquid mass flow loss a) and heat capacity change with temperature change b)

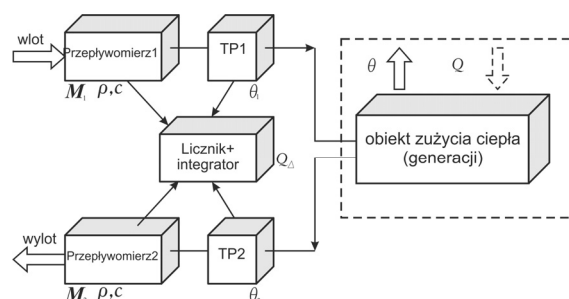
Z podanej wyżej analizy wynika, że typowy układ pomiarowy ilości ciepła ma kilka wad. Najważniejszymi z nich jest to, że nie jest brana pod uwagę możliwa utrata cieczy w systemie ogrzewania oraz zmiana jej pojemności cieplnej wraz ze zmianą temperatury.

3. Udoskonalony układ do pomiarów ilości ciepła

W celu eliminacji wymienionych wyżej błędów systematycznych zużytą ilość ciepła w odcinku czasu $t_1 \div t_2$ należy wyznaczać poprzez obliczanie różnicy energii cieplnej na wlocie Q_1 i wylocie Q_2 , czyli jako $Q_{\Delta} = Q_1 - Q_2$ według wzoru:

$$Q_{\Delta} = \int_{t_1}^{t_2} (M_1 c_1 \theta_1 - M_2 c_2 \theta_2) dt . \quad (5)$$

Według zależności (5) w tradycyjnym układzie pomiarowym należy wykorzystać dodatkowy przepływomierz (na wylocie) oraz w układzie obliczeniowym (na podstawie wyników pomiaru temperatury na wejściu i wyjściu) należy uwzględnić wpływ zmiany pojemności cieplnej. Zaproponowany przez autorów udoskonalony układ pomiaru ilości ciepła przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Udoskonalony schemat pomiaru ilości ciepła
Fig. 3. The improved system for measuring the heat

Udoskonalony schemat pomiaru ilości ciepła uwzględnia możliwe straty technologiczne cieczy lub jej nieautoryzowany odbiór oraz zmiany właściwości cieplnych cieczy, zwłaszcza zmiany jej pojemności cieplnej ze zmianą temperatury. Oznacza to, że w tym układzie wymienione wyżej składowe błędy systematycznego są wyeliminowane, ale natomiast zwiększa się składowa błędów in-

strumentalnego. Jest to spowodowane użyciem dwóch przepływomierzy zamiast jednego.

Błąd instrumentalny pomiaru ilości ciepła zużytego w zaproponowanym schemacie (rys. 3) zgodnie z (5) można opisać zależnością:

$$\Delta Q_{\Delta instr} = \int_{t_1}^{t_2} \left[\delta_{M_1} M_1 c_1 \theta_1 + \delta_{c_1} M_1 c_1 \theta_1 + \delta_{\theta_1} M_1 c_1 \theta_1 - \left(\delta_{M_2} M_2 c_2 \theta_2 + \delta_{c_2} M_2 c_2 \theta_2 + \delta_{\theta_2} M_2 c_2 \theta_2 \right) \right] dt =$$

$$= \int_{t_1}^{t_2} \left[Q_1 \cdot (\delta_{M_1} + \delta_{c_1} + \delta_{\theta_1}) - Q_2 \cdot (\delta_{M_2} + \delta_{c_2} + \delta_{\theta_2}) \right] dt,$$
(6)

gdzie $\delta_{M_1}, \delta_{M_2}, \delta_{c_1}, \delta_{c_2}, \delta_{\theta_1}, \delta_{\theta_2}$ - odpowiednio błąd względny wyznaczania przepływu masowego cieczy, jego pojemności cieplnej i temperatury na wlocie i wylocie obiektu.

Ponieważ obydwa przepływomierze są tego samego typu, to nominalnie ich charakterystyki metrologiczne są podobne [4]. Dlatego też, w pierwszym przybliżeniu, odchylenie standardowe instrumentalnego błędu (6) może być przedstawione jako:

$$\sigma_Q = \sqrt{2(\sigma_{\delta_M}^2 + \sigma_{\delta_c}^2 + \sigma_{\delta_\theta}^2)} \cdot Q_{\Delta},$$
(7)

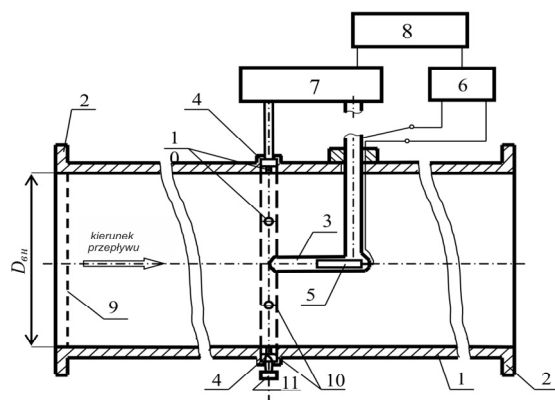
gdzie $\sigma_{\delta_M}, \sigma_{\delta_c}, \sigma_{\delta_\theta}$ - odchylenia standardowe względnych błędów pomiarowych odpowiednich zmiennych.

W tej zależności nie uwzględnia się wzajemnej korelacji parametrów obu przepływomierzy oraz czujników temperatury. Ze wzoru (7) wynika, że względne odchylenie standardowe błędu pomiarowego z dwoma przepływomierzami jest w przybliżeniu $\sqrt{2}$ razy większe niż przy pomiarach za pomocą układu z jednym przepływomierzem.

Tak więc, jeśli technologiczna strata cieczy lub jego nieautoryzowany odbiór jest większy ponad $\sqrt{2}$ razy od dopuszczalnego błędu pomiaru ilości ciepła zużywanego, to w celu uwzględnienia straty powinno się stosować układ z dwoma przepływomierzami.

4. Hydrodynamiczne przepływomierze z wbudowanymi rezystancyjnymi czujnikami temperatury

Podczas pomiaru ilości ciepła za pomocą udoskonalonego układu (rys. 3) autorzy zaproponowali konstrukcyjne połączenie bloku pomiaru przepływu cieczy i bloku pomiaru temperatury (rys. 4).



Rys. 4. Hydrodynamiczny przepływomierz z wbudowanym rezystancyjnym czujnikiem temperatury (opis w tekście)

Fig. 4. The hydrodynamic flow system with an integrated resistive temperature sensor

Na tym rysunku oznaczono:

- 1 - wstawka rurowa,
- 2 - kołnierze,
- 3 - rura pełnego ciśnienia (rurka Pitota),
- 4 - komora pierścienia (rura ciśnienia statycznego),
- 5 - rezystancyjny czujnik temperatury,
- 6 - układ pomiaru temperatury cieczy,
- 7 - manometr różnicowy,
- 8 - układ obliczeniowy licznika ciepła,
- 9 - filtr siatkowy (korektor prędkości),
- 10 - otwory,
- 11 - zawór spustowy.

Taka kombinacja pozwala na pomiar przepływu cieczy i jej temperatury, a stąd i jej pojemności cieplnej w tym samym punkcie, co zapewnia zmniejszenie ilości punktów deformacji przepływu cieczy a to z kolei zapewnia zwiększenie dokładności wyników pomiaru [7]. Tą kombinację najprościej można zrealizować w przypadku wykorzystania rurki Pitota - Prandtla (jako pierwotnego przetwornika przepływu cieczy) z rezystancyjnym czujnikiem temperatury (jako pierwotnego przetwornika temperatury cieczy).

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy typowego układu pomiaru ilości ciepła wykazano, że ma on kilka wad, m.in. nieuwzględnienie możliwej zmiany przepływu masowego z powodu technologicznej straty cieczy lub jej nielegalnego odbioru oraz pomijanie zmiany charakterystyk cieplnych cieczy ze zmianą temperatury.

W udoskonalonym układzie pomiaru ilości ciepła wykorzystuje się dwa przepływomierze (na wejściu i wyjściu), co pozwala wziąć pod uwagę stratę masowego przepływu cieczy.

Autorzy zaproponowali również konstrukcyjne połączenie bloków pomiaru przepływu i temperatury, co pozwala zmierzyć przepływ oraz temperaturę i następnie pojemność cieplną cieczy w jednym i tym samym punkcie. Pozwala to na wyeliminowanie źródła błędu systematycznego, a tym samym zwiększenie dokładności pomiaru ilości ciepła.

6. Literatura

- [1] Profos P.: Izmerenija w promyszlennosti. Sprawochnik. (Pomiary przemysłowe. Podręcznik) Metallurgija, 1980 r. (Ros.)
- [2] Lachkov V.I.: Kriterii wybora tieploschetchika dla sistem wodyanogo teplopotreblenija. (Kryteria doboru licznika ciepła dla sieci zużycia ciepła) Izmeritel'naja tehnika, 2002. (Ros.)
- [3] Lutsyk J., Bunyak L., Stadnyk B.: Zastosuwanija ultrazwukowych cenzoriv (Zastosowanie sensorów ultradźwiękowych). Lwow, 1998. (Ukr.)
- [4] Taler J., Duda P.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła. WNT, Warszawa, 2003.
- [5] Wiśniewski T.S.: Wymiana ciepła. WNT, Warszawa, 1997.
- [6] Dorozhovets M., Stadnyk B., Motało V., Vasyłuk V., Kowalczyk A., Borek R.: Osnovy metrologiji ta wymiriuwalnoji techniki (Podstawy metrologii i techniki pomiarowej), Lwow, wyd. Politechniki Lwowskiej, 2004. (Ukr.)
- [7] Zhukowskij S.S., Kulyk M.P., Dowdush O. M., Kulyk O.M.: Prystrij dla wymirjuwannja kilkosty tepla (Przyrząd do pomiaru ilości ciepła). Patent Ukrainy N 71051, byul. N 11, 2004. (Ukr.)

otrzymano / received: 30.08.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2012

artykuł recenzowany / revised paper