

dr hab. inż. Sławomir Zator, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, Politechnika Opolska

Niepewność szacowania strat ciepła z wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych

W artykule skoncentrowano się na problematyce związanej z szacowaniem strat ciepła w instalacjach i obiektach przemysłowych metodami pomiaru bezpośredniego oraz obliczeniowymi. Wskazano źródła niepewności pomiarów, zwracając uwagę na potrzebę uzyskania jak najdokładniejszych pomiarów parametrów takich jak temperatura czy współczynnik przenikania ciepła tak, aby uzyskany końcowy wynik oszacowania strat ciepła był jak najdokładniejszy.

■ Audyt energetyczny wytyczną do poprawy efektywności energetycznej

Unia Europejska dyrektywą 2012/27/UE z w sprawie efektywności energetycznej [1] wprowadziła jako cel osiągnięcie do 2020 r. 20% oszczędność w zużyciu energii pierwotnej. W ramach dążenia do tego celu, Polska zobowiązała się do oszczędności energii finalnej w latach 2014-2020 na poziomie 47 TWh. Cel ten, zgodnie z zapisami dyrektywy, można byłoby uzyskać poprzez osiągnięcie przez wszystkich dystrybutorów energii lub wszystkie przedsiębiorstwa prowadzące detaliczną sprzedaż energii nowych oszczędności każdego roku od dnia 1 stycznia 2014 r. do dnia 31 grudnia 2020 r. w wysokości 1,5% rocznego wolumenu sprzedaży energii odbiorcom końcowym. Następnym wejścia w życie dyrektywy jest obecnie m.in. powszechne opomiarowanie zużycia każdego rodzaju energii przez użytkowników końcowych.

W następstwie ww. dyrektywy z ponad dwuletnim opóźnieniem z dniem

1 października 2016 r. weszły w życie zapisy ustawy o efektywności energetycznej [2]. W ramach zasad realizacji obowiązku uzyskania oszczędności energii przedsiębiorstwa zobowiązane są do realizacji przedsięwzięć (a przynajmniej jednego) służących poprawie efektywności energetycznej u odbiorcy końcowego, w wyniku których uzyskuje się 1,5% oszczędności energii finalnej w każdym roku.

Ustawa wprowadziła zasady przeprowadzania audytu energetycznego przedsiębiorstwa. Wynika z niej konieczność przeprowadzania w dużych przedsiębiorstwach (za wyjątkiem tych posiadających system zarządzania energią oraz system zarządzania środowiskowego, jeśli w ramach tych systemów przeprowadzane będą audyty energetyczne) raz na 4 lata audytów energetycznych. Zasadniczo audyt energetyczny przedsiębiorstwa jest procedurą mającą na celu przeprowadzenie szczegółowych i potwierdzonych obliczeń dotyczących proponowanych przedsięwzięć służących poprawie efektywności energetycznej oraz dostarczenie informacji o potencjalnych oszczędnościach energii [2].

W zał. VI Kryteria minimalne dotyczące audytów energetycznych... dyrektywy [1] określono wytyczne do sporządzania audytów tożsame z zapisami ustawy [2]. Do jego sporządzenia konieczne są reprezentatywne zmierzone i możliwe do zidentyfikowania dane dotyczące zużycia energii oraz profili obciążenia, a ponadto audyt zawierać ma szczegółowy przegląd zużycia energii w budynkach, w instalacjach przemysłowych oraz w transporcie, odpowiadających łącznie, za co najmniej 90% całkowitego zużycia energii (wszystkich nośników) przez to przedsiębiorstwo.

Oszczędności energii poszukiwać można w jednym z trzech etapów: konwersji paliw energetycznych do postaci energii łatwej do transportowania, transportu wytworzonej energii oraz końcowego wykorzystania energii w bezpośredniej postaci np. ciepła lub ponownej konwersji do pożądanego postaci energii np. mechanicznej. Na ten ostatni etap także kładzie szczególny nacisk dyrektywa [1] i ustawa [2] zwłaszcza, gdy mowa o budynkach. Nie jest to przypadek, gdyż ponad 40% energii pierwotnej zużywanej jest na potrzeby grzewcze.

W przedsiębiorstwach energetycznych dąży się w pierwszej kolejności do podniesienia sprawności wytwarzania energii, np. podniesienie sprawności kotłów energetycznych poprzez podniesienie parametrów wytworzonej np. pary suchej dla turbozespołów. Niesie to za sobą z reguły wysokie koszty inwestycyjne. Wytworzone ciepło dostarcza się następnie do odbiorników generatorów, maszyn i urządzeń czy też bezpośrednio do odbiorców końcowych. I tu też jest potencjalne źródło oszczędności energii, związane z jego transportem, tym większe im wyższe są parametry medium i większe odległości.

■ Bezpośredni pomiar strat ciepła

Strumień transportowanego ciepła z największą dokładnością można określić bezpośrednio poprzez pomiary, lecz wyniki są uzależnione od warunków, dotyczących zarówno medium, jak i otoczenia, w których został on przeprowadzony. Używa się do tego celu liczników ciepła. Jednak obliczenie straty ciepła Q_s , jako różnicy zmierzonych strumieni ciepła $Q_1 - Q_2$ na granicach bilansowych, w wielu przypadkach obarczone jest tak dużą niepewnością, że pomiar taki jest bezużyteczny. Wynika to z zastosowania różnicowej metody pomiaru, w której wynik końcowy jest różnicą wskazań ciepłomierzy. Jest on obarczony niepewnością pomiaru tym większą im mniejsze są różnice wskazań obu ciepłomierzy. Nawet używając licznika ciepła klasy 1 i uwzględniając tylko składowe niepewności związane z pomiarem różnicy temperatur ΔT oraz przelicznika elektronicznego (równ. 1), dla strat ciepła wynoszących 10% ilości transportowanego ciepła, uzyskuje się niepewność U_S ich pomiaru na poziomie 19% (równ. 2), dla niepewności wyznaczania ciepła U_1, U_2 na wyjątkowo niskim poziomie 1,4%. Dodatkowo w źródłem niepewności mógłby być pomiar strumienia masy medium, ale w analizowanym przypadku strumień masy się nie zmienia, w związku z tym ta składowa może zostać pominięta.

$$E_{Qd} = \pm(2 + 4 \frac{\Delta T_{\min}}{\Delta T} + 0.01 \frac{q_p}{q}) \quad (1)$$

$$\frac{U_S}{Q_1 - Q_2} = \sqrt{\left(\frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} U_1\right)^2 + \left(\frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} U_2\right)^2} \quad (2)$$

Dwukrotnie mniejsze straty prowadzą do kolejnego dwukrotnego zwiększenia niepewności pomiaru straty ciepła, a przy 2% stratach ciepła niepewność ich wyznaczania metodą różnicową osiąga 100%. Reasumując, metoda różnicowa nie nadaje się do pomiaru strat ciepła w przypadku, gdy są one niewielkie.

Dużo lepszym rozwiązaniem jest bezpośredni pomiar strat ciepła, także ciepłomierzem, lecz tu pojawia się problem techniczny związany ze znacznym oddaleniem obu końców badanego odcinka rurociągu. Typowe termorezystancyjne czujniki typu Pt (RTD) mają przewody łączeniowe o długości do 5 m. W tym przypadku konieczny jest przelicznik ciepła przystosowany do czteroprzewodowego pomiaru rezystancji, co pozwala na dokonanie odczytu temperatury w znacznej odległości od elektronicznego przelicznika ciepła. I pomimo tego, że pomiar rezystancji metodą czteroprzewodową teoretycznie nie zależy od długości toru pomiarowego, to jednak jest on wrażliwy na zakłócenia, które zwiększą składową niepewności typu A. Możliwe jest też wykorzystanie pętli prądowej, np. 4-20 mA oraz przetworników R/I, lecz należy liczyć się z dodatkowymi niepewnościami pomiaru różnicy temperatur.

Z punktu widzenia eliminacji zakłóceń w torze pomiarowym, najlepszym rozwiązaniem byłaby cyfrowa transmisja wyników pomiaru rezystancji. Rozwiązanie takie może być zrealizowane w oparciu o moduły pomiarowe z transmisją przewodową (np. IEEE 802.3 - Ethernet) lub bezprzewodową (np. IEEE 802.11 - WiFi). Niestety takie rozwiązania liczników ciepła nie są dostępne na rynku, jednak dedykowane rozwiązania oparte o platformę np. CompactRIO i moduły serii C oraz oprogramowanie LabView

z programową realizacją elektronicznego przelicznika ciepła jest możliwe do realizacji. Taki dedykowany licznik ciepła mógłby współpracować z dowolnym przepływomierzem zabudowanym w instalacji. Ale także w przypadku jego braku, możliwe byłoby oszacowanie strat ciepła, wprowadzając wartość strumienia w sposób arbitralny. Oczywiście od tej wartości bezpośrednio zależy wynik pomiaru strat ciepła.

Analizując niepewność pomiaru strat ciepła, zgodnie z równaniem 1 dla licznika klasy 1 i dla np. różnicy temperatur pomiędzy początkiem i końcem równym $\Delta T = 5$ K oraz dla strumienia $q = 2q_p$, otrzymuje się 4,4%. Dla transportowanych mediów typu gorąca woda można zatem liczyć na względnie mały udział w całkowitej niepewności pomiaru ciepła składnika związanego z pomiarem różnicy temperatur, gdyż z licznikiem ciepła otrzymuje się sparowany zestaw czujników temperatury. Większy problem występuje podczas pomiaru strumienia pary suchej, o temperaturze ponad 500°C. Sparowanie czujników dla takich temperatur jest dużo kosztowniejsze, a usługę taką wykonuje niewiele ośrodków. Użycie standardowych czujników Pt nawet klasy A (bez parowania) jest nieodpowiednie, ponieważ niepewność pomiaru tak wysokich temperatur wynosi około 1,2 K, co przy różnicy temperatur np. 5K, spowoduje ponad 30% niepewność tylko pomiaru różnicy temperatur.

■ Obliczeniowe wyznaczanie strat ciepła

Z podanych wcześniej powodów dużo częściej straty ciepła określa się obliczeniowo, także w przypadku audytu energetycznego. Wyniki obliczeń odnoszą się do tzw. warunków obliczeniowych szczególnie dotyczących otoczenia zewnętrznego oraz uśrednionych parametrów medium transportującego ciepło. Straty ciepła można także oszacować obliczeniowo, częściowo korzystając z dodatkowych pomiarów pośrednich.

Niezależnie od tego, jaką metodę się wybierze, uzyskane wyniki zawsze związane są z parametrami transportowanego medium, rodzajem osłon termicznych oraz warunkami zewnętrznymi. Sporządzając audyt istnieje zawsze potrzeba oszacowania strat ciepła w istniejącej instalacji, często o złym stanie technicznym, nie tylko odnoszącym się do izolacji. I tu raczej problematyczne jest posługiwanie się danymi producenta czy normowymi wartościami, gdyż obliczone straty będą z reguły niższe od rzeczywistych, co z punktu widzenia audytu prowadzić będzie do mniejszego potencjału oszczędności energii. Najlepszym rozwiązaniem byłoby przyjmowanych w obliczeniach wartości parametrów, zwłaszcza dotyczących izolacji, na podstawie rzeczywistych pomiarów współczynnika przenikania ciepła U.

Sposób obliczania strat ciepła przedstawiono np. w normie dotyczącej izolacji cieplnej wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych [3]. Do wykonania obliczeń wymagana jest znajomość geometrii obiektów i właściwości fizycznych materiałów, z których są one wykonane. Norma nie określa niepewności oszacowania strat ciepła. Strumień ciepła Q_s (moc strat) do otoczenia dla pojedynczego segmentu rurociągu czy przegrody o powierzchni A, o jednakowej geometrii i współczynnika U można obliczyć z zależności 3, przyjmując znaną temperaturę medium T_i oraz obliczeniową temperaturę otoczenia zewnętrznego T_e .

$$Q_s = AU \cdot (T_i - T_e) \quad (3)$$

Do wyznaczenia współczynnika przenikania ciepła U (równ. 4) wymagana jest wartość oporu cieplnego R przegrody, będący sumą cząstkowych wartości oporów przewodzenia kolejnych warstw R_i (ścianka rurociągu, izolacja, płaszcz) oraz oporów przejmowania ciepła na powierzchni wewnętrznej rurociągu R_{si} oraz zewnętrznej R_{se} .



Rys. 1. Temperatuzy przyjmowane do obliczeń strumienia ciepła w izolowanym rurociągu oraz dla przegrody budowlanej

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum R_i + R_{se}} \quad (4)$$

Sposób doboru wartości R_{si} oraz R_{se} w zależności o tego czy rurociąg znajduje się w przestrzeni wewnętrznej czy zewnętrznej oraz sposobu ułożenia poziomego czy pionowego szczegółowo określa norma [3]. Przykład jej praktycznego wykorzystania do oszacowania strat ciepła z instalacji przemysłowych przedstawiono w artykule [4].

Składnikiem decydującym o współczynnika U jest jednak opór cieplny przegrody (w tym głównie izolacji termicznej). Dla nowych izolacji do obliczeń przyjmuje się wartości na podstawie danych producenta. Jednak, jak już wspomniano, dla już istniejących i od wielu lat eksploatowanych izolacji celowe jest wykonanie pomiarów, w celu określenia rzeczywistego oporu cieplnego.

W pomiarach bezpośrednich, wykonywanych zarówno dedykowanymi czujnikami, jak i z użyciem termografii, najczęściej wykorzystuje się prawo Fouriera, zgodnie z którym przez kolejne warstwy i powierzchnie przenika (w stanie ustalonym) taka sama energia, co można opisać równaniem (5).

$$q = \frac{(T_i - T_{si})}{R_{si}} = \frac{(T_{si} - T_{se})}{\sum R_i} = \frac{(T_{se} - T_e)}{R_{se}} \quad (5)$$

Przykładowo dla przegrody budowlanej, opierając się na np. pomiarach temperatury otaczającego powietrza T_e lub T_i oraz temperatury przegrody budowlanej po stronie odpowiednio zewnętrznej T_{se} lub wewnętrznej T_{si} , oprogramowanie kamer termowizyjnych pozwala oszacować jednostkowe stra-

ty ciepła, przy założeniu konwekcyjnej wymiany ciepła. Wyniki takich pomiarów mają niestety bardzo dużą niepewność pomiaru, od kilkunastu do kilkudziesięciu procent, tym większą im większy jest opór cieplny przegrody, głównie na znaczną niepewność pomiaru temperatury kamerami termowizyjnymi (1÷2 K) oraz niewielką różnicę temperatur powietrza i przegrody budowlanej. Podobnie wygląda to także w przypadku pomiarów strumienia strat ciepła z rurociągów poprzez pomiar temperatury płaszcza osłonowego izolacji i temperatury zewnętrznej, gdy różnice są kilku stopniowe. O wiele mniejszą niepewność wyznaczania wsp. U, bądź strat mocy q można uzyskać, jeśli dokona się pomiaru temperatury medium. Nie popełni się przy tym dużego błędu, jeśli zmierzona będzie temperatura rurociągu (pod izolacją) transportującego medium. Zmianę niepewności wyznaczania współczynnika przewodzenia U oraz jednostkowych strat mocy q w zależności od niepewności pomiaru temperatur, w przypadku jednakowych niepewności pomiaru wszystkich temperatur pokazano na rys. 2.

W przypadku, gdy nie jest możliwy bezpośredni pomiar temperatury medium lub rurociągu pod izolacją, to można w przybliżony sposób określić tę temperaturę na podstawie znanych temperatur na początku i końcu analizowanego odcinka rurociągu, dokonując jej interpolacji w wybranym punkcie. Zakładając nawet stosunkowo dużą niepewność tak oszacowanej temperatury na poziomie 3 K, uzyskać można zadowalające wyniki, z niepewnością powyżej 5%, przy niepewności pomiaru pozostałych niepewności na poziomie 1 K.

Uzyskanie małych niepewności pomiaru temperatury z użyciem kamery termowizyjnej jest trudno osiągalne. Jedną z najnowszych propozycji producentów kamer termowizyjnych jest aplikacja pozwalająca w sposób automatyczny wykrywać naklejane na obiekt znaczniki o znanym współczynniku emisyjności ϵ , który pozwala w tym obszarze zmierzyć temperaturę bez dodatkowego błędu wynikającego z wprowadzenia innej niż rzeczywistej wartości współczynnika emisyjności. Równie dobrym rozwiązaniem jest określenie współczynnika ϵ w sposób bezpośredni, mierząc temperaturę termometrem stykowym obiektu o bliżej nieznanym współczynniku ϵ i dopasowując go w kamerze, aż do uzyskania zmierzonej temperatury bezpośrednio termometrem. Ponadto płaszcze ochronne izolacji często wykonywane są z metalu o niskim współczynniku ϵ , co prowadzi do dodatkowych błędów pomiaru temperatury, związanych z błędną kompensacją temperatury odbitej (RTC). Warto wtedy użyć radiatora Lamberta lub jego substytutu w postaci rozwiniętej po uprzednim zgnieceniu folii aluminiowej, w celu określenia odbijanej temperatury otoczenia. Oszacowanie współczynnika U z użyciem termografii pozwala na jego oszacowanie na całym analizowanym obszarze, podczas gdy korzystając z czujników, dysponuje się tylko wartościami lokalnymi.

Wnioski

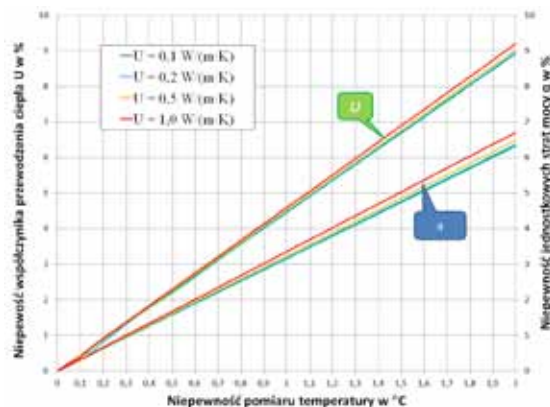
Oszacowanie strat ciepła z istniejących instalacji jest skomplikowanym i trudnym zadaniem, niezależnie od tego, czy wykonuje się je metodą pomiarową czy obliczeniową. Metoda pomiaru bezpośredniego wymaga specjalistycznego sprzętu pomiarowego, natomiast metoda obliczeniowa wymaga znajomości geometrii obiektu i właściwości fizycznych materiałów. O ile w obliczeniach przyjmuje się warunki odniesienia opisujące konwekcyjną i radiacyjną wymianę ciepła, to w pomiarach warunki te należy zmierzyć i uwzględnić, przelicza-

jąc uzyskane wyniki do obliczeniowych warunków odniesienia.

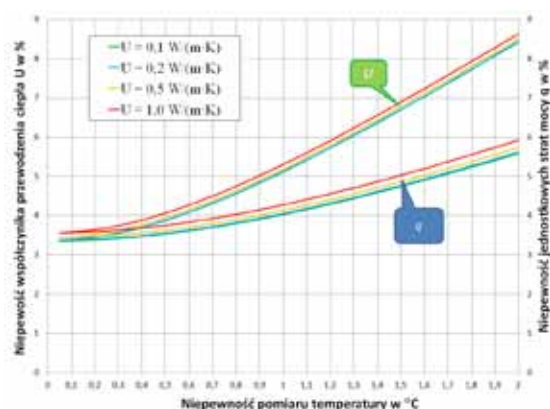
Jednym z narzędzi, które można użyć do pomiarów strat ciepła może być kamera termowizyjna. W zależności od zastosowanej metodyki uzyskiwane niepewności pomiarów nawet na poziomie 20% może być trudne, bez dodatkowych czynności i pomiarów. Należy liczyć się z sytuacją, że oszacowanie strat ciepła różnymi metodami prowadzi będzie do znacznie różniących się wyników, co niejednokrotnie może być przedmiotem do dyskusji nie tyle na temat rzetelności audytu, co uzyskanych rzeczywistych oszczędności energii. □

Literatura

1. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej, zmiany dyrektyw 2009/125/WE i 2010/30/UE oraz uchylecia dyrektyw 2004/8/WE i 2006/32/WE, Dz.U. UE z 14.11.2012 L. 315.
2. Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o efektywności energetycznej, Dz.U. 2016, poz. 831.
3. PN-EN ISO 12241:2010 Izolacja cieplna wyposażenia budynków i instalacji przemysłowych - Zasady obliczania.
4. Zator S., Zator M.: Szacowanie strat ciepła z instalacji przemysłowych, cz.1, Inżynier budownictwa, 4/2016, s. 98-101.



Rys. 2. Zmiana niepewności wsp. przewodzenia U i jednostkowych strat mocy q w zależności od niepewności pomiaru temperatury przy pomiarze temperatury rurociągu i płaszcza z pomiarem strumienia ciepła, w przypadku jednakowych niepewności pomiaru temperatur



Rys. 3. Zmiana niepewności wsp. przewodzenia U i jednostkowych strat mocy q w zależności od niepewności pomiaru temperatury przy pomiarze temperatury rurociągu, płaszcza i strumienia ciepła, w przypadku niepewności pomiaru temp. wewn. 3 K i jednakowych niepewności pomiaru pozostałych temperatur