

BADANIA WPŁYWU TEMPERATURY ŹRÓDŁA NA PARAMETRY ENERGETYCZNE SPRĘŻARKOWEJ POMPY CIEPŁA

Andrzej Chochowski, Dariusz Czekalski, Tomasz Mirski

Zakład Elektrotechniki i Automatyki, Katedra Podstaw Inżynierii,
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

Wprowadzenie

W latach dziewięćdziesiątych na rynku techniki grzewczej w Polsce pojawiły się sprężarkowe pompy ciepła. Urządzenia te znane były już w XIX wieku. Pierwsze opracowania teoretyczne sięgają 1834 roku, a pionierskie wdrożenia roku 1877. Rozwój seryjnej produkcji nastąpił w latach 1938–1940 w Stanach Zjednoczonych, gdzie w roku 1963 pracowało już około 300 tysięcy pomp ciepła, zastępujących ogrzewanie elektryczne i olejowe. Od kilkudziesięciu lat sprężarkowe pompy ciepła znajdują coraz szersze zastosowanie we wszystkich krajach wysoko rozwiniętych (Stany Zjednoczone, Szwecja, Niemcy, Francja, Japonia). W Polsce realne możliwości budowy instalacji grzewczych z pompami ciepła zaistniały po uruchomieniu krajowej produkcji. Obecnie kilkaset obiektów zasilanych jest jednostkami o mocy grzewczej dochodzącej nawet do 200 kW. Stale wzrasta zainteresowanie takimi rozwiązaniami, zwłaszcza w budynkach użyteczności publicznej.

Opłacalność zastosowań pomp ciepła jest nadal problematyczna, także w kontekście ekologicznym. Urządzenia czerpiąc energię ze źródła odnawialnego, wprawdzie same nie emitują szkodliwych związków, jednak potrzebują do napędu energii elektrycznej. Wytwarzana jest ona w Polsce przede wszystkim w elektrowniach węglowych, a spośród tradycyjnych nośników energii należy do najdroższych. Dlatego osiągnięcie wysokiej efektywności pompy ciepła, mierzonej stosunkiem wyprodukowanej energii cieplnej do energii elektrycznej zużytej do napędu urządzenia, jest bardzo ważne zarówno z ekologicznego, jak i ekonomicznego punktu widzenia.

Jednym ze sposobów zwiększenia efektywności pompy ciepła jest współpraca ze źródłem niskotemperaturowym o podwyższonej temperaturze w porównaniu z typowym wymiennikiem gruntowym [CHOCHOWSKI i in. 2000].

Efektywność energetyczna pompy ciepła

Miarą energetycznej efektywności pracy sprężarkowej pompy ciepła jest współczynnik efektywności grzewczej, określany przez stosunek mocy cieplnej P_g przekazanej odbiornikowi, do mocy elektrycznej P_{el} użytej dla realizacji obiegu termodynamicznego.

$$\varepsilon_r = P_g / P_{el} \quad (1)$$

Rozważając obieg Carnota, wartość współczynnika wydajności grzewczej obiegu można uzależnić od temperatury skraplania T_{sk} oraz parowania T_p :

$$\varepsilon_c = T_{sk} / (T_{sk} - T_p) \quad (2)$$

Orientacyjną wartość współczynnika wydajności grzewczej sprężarkowych pomp ciepła wyznacza się na podstawie uproszczonej zależności:

$$\varepsilon_r = \eta_{dr} \cdot \varepsilon_c \quad (3)$$

gdzie η_{dr} – stopień doskonałości rzeczywistego obiegu pompy ciepła.

Można również korzystać z bardziej dokładnych zależności uwzględniających współczynnik wewnętrznej nieodwracalności obiegu, stopień podobieństwa obiegu porównawczego do nieodwracalnego obiegu Carnota, a także sprawność indykowaną sprężarki w funkcji temperatury T_p i temperatury T_{sk} [RUBIK 1996]. Przyjmując sprawność mechaniczną oraz sprawność silnika elektrycznego jako średnie wartości liczbowe, otrzymuje się wzór na współczynnik efektywności grzewczej pompy ciepła w funkcji temperaturowych warunków pracy:

$$\varepsilon_r = 0,74T_p / (T_{sk} - T_p) - (0,0032T_p + 0,765 T_p / T_{sk}) + 0,9 \quad (4)$$

Najistotniejszymi więc parametrami eksploatacyjnymi dla obiegu sprężarkowej pompy ciepła są: wymagana temperatura odbiornika T_{od} , która decyduje o temperaturze skraplania czynnika T_{sk} oraz temperatura źródła T_{zr} , której poziom determinuje temperaturę parowania czynnika T_p . W związku z tym podwyższenie temperatury źródła powinno wpływać na wzrost współczynnika wydajności grzewczej.

Cel, zakres, metoda i obiekt badań

Celem badań jest eksperymentalne określenie wpływu temperatury źródła na parametry energetyczne pracy sprężarkowej pompy ciepła, takie jak: zakresy temperatury czynnika w wymiennikach, moc grzewcza, moc pobierana przez sprężarkę oraz osprzęt, stopień doskonałości rzeczywistego obiegu pompy ciepła, współczynnik efektywności grzewczej. Badania pompy ciepła prowadzono w warunkach laboratoryjnych. Polegały one na pośrednich pomiarach rozkładu temperatur czynnika w obiegu termodynamicznym, odpowiadających temperaturom T_p i T_{sk} oraz wyznaczaniu mocy cieplnej skraplacza P_g i mocy pobieranej przez napęd sprężarki P_{el} . Podczas prób doprowadzono do stanu ustalonego, stabilizując temperatury źródła i odbiornika energii, przy zachowaniu stałego natężenia przepływu mediów. Stosowano temperatury źródła T_{zr} z zakresu 3–32°C oraz temperatury odbiornika T_{od} z zakresu 37–44°C (poziom temperatury występujący w warunkach eksploatacyjnych, gdy pompa ciepła podgrzewa wodę użytkową w zbiorniku akumulacyjnym).

Obiektem badań jest sprężarkowa pompa ciepła PC 12,5 A z czynnikiem R22. Przy podgrzewaniu wody do temperatury +45°C i przy temperaturze źródła +10°C urządzenie ma następujące dane znamionowe:

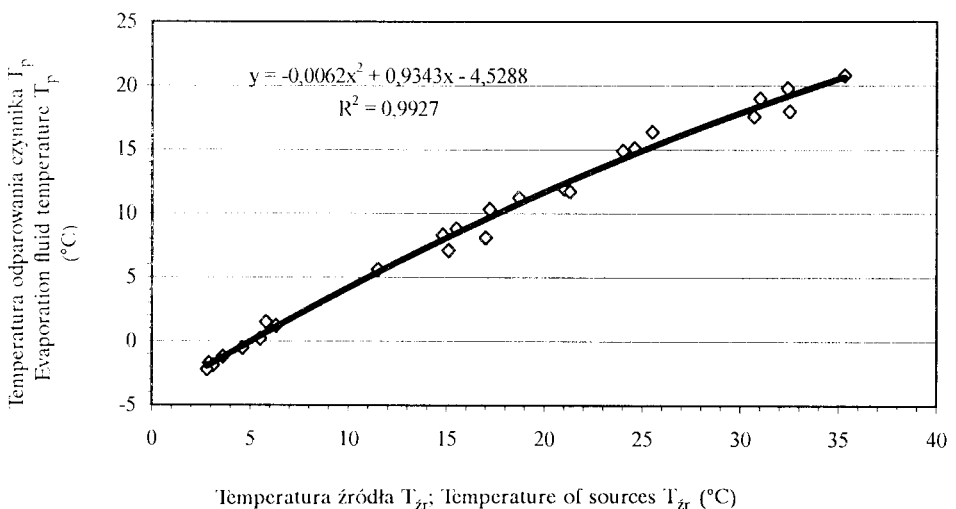
- wydajność cieplna skraplacza 11,5 kW,
- pobór mocy przez silnik i osprzęt 3,5 kW,
- współczynnik efektywności grzewczej 3,3.

Stanowisko badawcze zostało wyposażone w zestaw czujników umożliwiających pomiary temperatur i strumieni energii. Pomiar energii elektrycznej pobieranej przez pompę ciepła jest dokonywany za pomocą licznika trójfazowego typu 4C52dg, wyposażonego w impulsator (600 impulsów na 1 kW·h). Pomiar przepływu wody przez wymienniki dokonywany jest przepływomierzami typu JS 2,5, wyposażonymi także w impulsatory (2,5 dm³ na impuls). Na wlotowym oraz wylotowym rurociągu zarówno od strony źródła, jak i odbiornika wbudowane są czujniki temperatury I.M 335. Na króćcu wlotowym i wylotowym parownika i skraplacza zostały także umieszczone stykowo czujniki temperatury, pozwalające pośrednio na określenia rozkładu temperatury w obiegu termodynamicznym. Wszystkie sygnały pomiarowe są zapisywane w pamięci komputera za pomocą kart pomiarowych PCI 818 i PCI 836 firmy Advantech. Ich obsługę prowadzi się przy pomocy firmowego oprogramowania.

Wyniki badań

Rozkład temperatury w obiegu czynnika R22

Najniższą temperaturą czynnika w obiegu termodynamicznym jest temperatura na wlocie do parownika T_p' (pomiar temperatury króćca) i została ona przyjęta za temperaturę odparowania $T_p - T_p' = T_p$ [CHOCHOŃSKI i in. 2001]. Znajomość zależności temperatury odparowania czynnika od temperatury źródła T_{zr} umożliwia oszacowanie wpływu podwyższonej temperatury źródła na stopień doskonałości rzeczywistego obiegu pompy ciepła oraz osiąganego współczynnika wydajności grzewczej. Rys. 1 przedstawia przebieg zależności temperatur T_p i T_{zr} . Wysoki współczynnik determinacji $R^2 = 0,99$ wskazuje, że wpływ innych parametrów, w tym temperatury T_{od} wody, stanowiącej odbiornik, jest w badanych warunkach nieistotny.



Rys. 1. Zależność temperatury odparowania czynnika od temperatury źródła
Fig. 1. The impact of temperature sources on temperature fluid evaporation

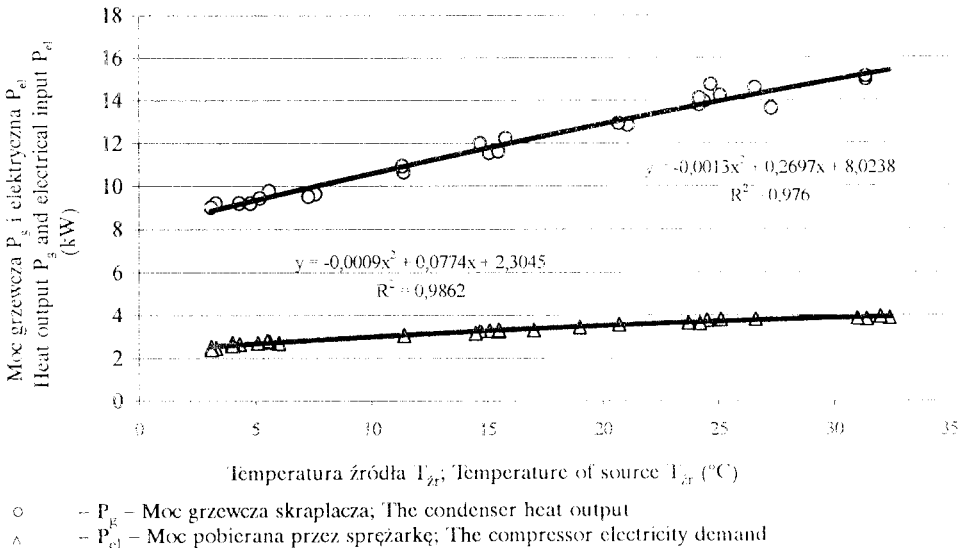
Rozkład temperatury czynnika R22 i podgrzewanej wody w skraplaczu jest charakterystyczny dla wszystkich wykonanych prób. Okazuje się, że temperatura czynnika na wylocie ze skraplacza i końcowa temperatura podgrzewanej wody są jednakowe. Można więc wnioskować, że jest to temperatura skraplania czynnika T_{sk} , przy której następuje oddawanie największej ilości energii w wymienniku. Dla kilku poziomów temperatury $T_{źr}$ wyznaczono funkcję $T_{sk} = f(T_{od})$, uzyskując zależności liniowe, przykładowo:

$$T_{sk} = 1,043 T_{od} + 8,08 \text{ dla } T_{źr} \text{ z przedziału } 30\text{--}35^{\circ}\text{C},$$

$$T_{sk} = 0,900 T_{od} + 7,95 \text{ dla } T_{źr} \text{ z przedziału } 3\text{--}7^{\circ}\text{C}.$$

Moc grzewcza skraplacza oraz moc pobierana przez napęd sprężarki

Na podstawie pomiaru natężenia przepływu i przyrostu temperatury odbiornika, w okresach ustalonego rozkładu temperatury czynnika R22 w obiegu termodynamicznym urządzenia, wyznaczono przebieg mocy grzewczej P_g pompy ciepła w zależności od temperatury źródła $T_{źr}$ – górna krzywa na rys. 2. Wyniki prób wskazują, że w miarę wzrostu $T_{źr}$ od 3 do 32°C moc P_g wzrasta od 8,8 do 15,3 kW, a sama zależność charakteryzuje się wysokim współczynnikiem determinacji wynoszącym $R^2 = 0,98$.



Rys. 2. Charakterystyki energetyczne pompy ciepła PC 12,5

Fig. 2. Energetic characteristics of a PC 12.5 heat pump

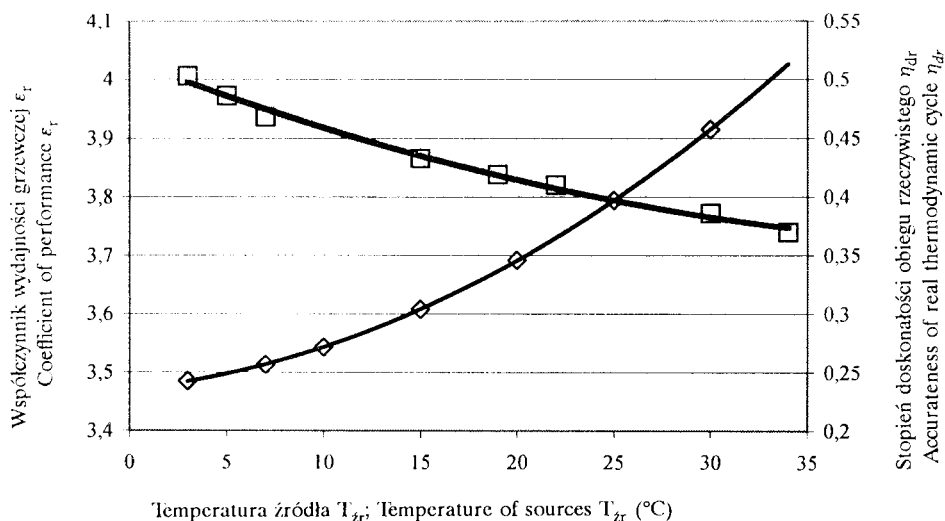
Wykonano także pomiary pobieranej z sieci mocy elektrycznej P_{el} przez silnik sprężarki w okresach ustabilizowanej pracy, prezentując wyniki w funkcji temperatury źródła $T_{źr}$ (dolna krzywa na rys. 2). Badania wykazały, że P_{el} jest najniższa dla granicznej temperatury źródła $T_{źr} = 3^{\circ}\text{C}$ i wynosi około 2,5 kW, następnie rośnie do 3,95 kW, gdy $T_{źr}$ osiąga 32°C.

Stopień doskonałości obiegu rzeczywistego i współczynnik wydajności grzewczej

Korzystając z zależności temperatur skraplania T_{sk} i odparowania T_p czynnika oraz mocy grzewczej P_g i mocy pobieranej przez napęd sprężarki pompy ciepła P_{cl} od temperatury źródła T_{zr} i odbiornika T_{od} wyznaczono ze wzorów (1–3) stopień doskonałości obiegu rzeczywistego:

$$\eta_{dr} = \{P_g (T_{sk} - T_p)\} / [T_{sk} P_{cl}] = f(T_{zr}, T_{od}). \quad (5)$$

Z przykładowych wyników obliczeń, przedstawionych na rys. 3, można wnioskować, że wzrost temperatury źródła powyżej 10°C , tj. poziomu przewidywanego przez producenta dla danej konstrukcji pompy ciepła i związanego z określoną nastawą zaworu rozprężnego, obniża stopień doskonałości rzeczywistego obiegu termodynamicznego.



- ◊ – Współczynnik wydajności grzewczej; Coefficient of performance
- ◻ – Stopień doskonałości obiegu; Degree of accurateness of the cycle

Rys. 3. Wpływ temperatury źródła na efektywność pompy ciepła
 Fig. 3. The impact of temperature source on heat pump effectiveness

Na rys. 3 przedstawiono przebieg współczynnika wydajności grzewczej ϵ_r w zależności od temperatury źródła T_{zr} . Jego wartość wzrasta wraz z podnoszeniem temperatury źródła od 3°C do 30°C w zakresie od 3,485 do 3,915. Stosunkowo niewielki efekt poprawy jest konsekwencją spadku doskonałości obiegu termodynamicznego przy pozyskiwaniu energii ze źródła o temperaturach wyższych od nominalnego poziomu 10°C .

Wnioski

Podniesienie temperatury źródła z 3°C do 32°C powoduje wzrost mocy grzewczej skraplacza badanej pompy ciepła z 8,8 kW do 15,3 kW, co skraca czas

trwania procesów grzewczych, czyli zwiększa pewność zasilania w energię cieplną. Jednocześnie wzrasta pobór mocy elektrycznej przez silnik napędowy z 2,5 kW do 3,9 kW. Poprawa współczynnika wydajności grzewczej jest w efekcie niewielka – ok. 12% w skali względnej. Wynika to z wykazanego spadku doskonałości obiegu termodynamicznego w warunkach pracy urządzenia odbiegających od założeń projektowych dla wymienników i nastaw automatycznego zaworu rozprężnego. Zatem zachowując nastawy fabryczne w zaworze rozprężnym, nie można oczekiwać wzrostu współczynnika efektywności w stopniu proporcjonalnym do wzrostu temperatury źródła.

Literatura

CHOCIOWSKI A., CZEKALSKI D., MIRSKI T. 2000. *Diagnostyka systemu pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych*. I Forum Polska Nauka i Technika dla Ekorozwoju. NOT, Warszawa, 20–22 IX 2000 (compact disk, poz. 5_04).

CHOCIOWSKI A., CZEKALSKI D., WÓJCICKA-MIGASIUK D., SIUTA-OLCHA A., MIRSKI T., MACIEJUK D. 2001. *Diagnostyka urządzeń i systemów niekonwencjonalnego zasilania energią*. Sprawozdanie końcowe projektu KBN nr 7 T07B 074 14. Warszawa: 45–47.

RUBIK M. 1996. *Pompy ciepła – poradnik*. Wydawnictwo Instal. Warszawa: 18–20.

Słowa kluczowe: pompa ciepła, temperatura źródła, energia

Streszczenie

Metodą eksperymentalną określono wpływ temperatury źródła na parametry energetyczne pracy sprężarkowej pompy ciepła, takie jak: zakresy temperatur czynnika, moc grzewcza, moc pobierana, stopień doskonałości obiegu rzeczywistego, współczynnik efektywności grzewczej. Podniesienie temperatury źródła z 3°C do 30°C pozwala zwiększyć moc grzewczą skraplacza z 9 kW do 15 kW, ale współczynnik efektywności wzrasta zaledwie o ok. 12% w skali względnej. Wynika to z wykazanego spadku doskonałości obiegu termodynamicznego.

INVESTIGATIONS OF THE SOURCE TEMPERATURE IMPACT ON ENERGETIC PARAMETERS OF HEAT PUMP

Andrzej Chochowski, Dariusz Czekalski, Tomasz Mirski

Electrotechnology and Automatization Division,
Fundamental Engineering Department, Warsaw Agricultural University

Key words: heat pump, source temperature, energy

Summary

Based on the experimental research the impact of temperature of the source on energetic parameters of a heat pump with an electrically driven compres-

such as: thermal rate, power input, rate of the accurateness of real thermodynamic cycle, coefficient of performance. The raise of the source temperature from 3°C to 30°C enables the enhancement of the condenser thermal rate from 9 kW to 15 kW, however, the coefficient of performance relatively increases only by approx. 12%. This is the effect of the indicated drop of the accurateness of the real thermodynamic cycle.

Prof. dr hab. Andrzej **Chochowski**
Katedra Podstaw Inżynierii
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Nowoursynowska 166
02-787 WARSZAWA
e-mail: chochowski@alpha.sggw.waw.pl