

# Sterowanie hybrydowym systemem grzewczym

Wojciech Grega, Wojciech Kreft

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej  
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono problematykę sterowania hybrydowym systemem grzewczym. System ten ma dwa źródła ciepła: sieć miejską oraz kocioł na biomasę ze zbiornikiem akumulacyjnym. Sterowanie tym systemem wymaga odpowiedniej koordynacji pracy obu źródeł. Wartości sterowań dostarcza rozwiązanie odpowiedniego zadania optymalizacji.

**Słowa kluczowe:** hybrydowy system grzewczy, sterowanie, optymalizacja, biomasa, energia odnawialna

DOI: 10.14313/PAR\_212/84

## 1. Wprowadzenie

Hybrydowe systemy grzewcze składają się z co najmniej dwóch źródeł mocy grzewczej. Najczęściej jedno jest źródłem podstawowym instalacji grzewczej, a drugie jest źródłem dodatkowym, które pełni rolę pomocniczą. W opisywanym przypadku podstawowym źródłem ciepła jest miejska sieć ciepłownicza, zaś źródłem pomocniczym – instalacja grzewcza kotła na biomasę. Podstawowe źródło grzewcze pracuje nieustannie, natomiast zadaniem dodatkowego źródła jest uzupełnianie mocy w chwilach szczytowego popytu na moc grzewczą, który przekracza możliwości realizacji przez podstawowe źródło grzewcze [1] (rys. 1). Pojawia się zatem następujący problem sterowania: kiedy i z jaką intensywnością należy wykorzystywać dodatkowe

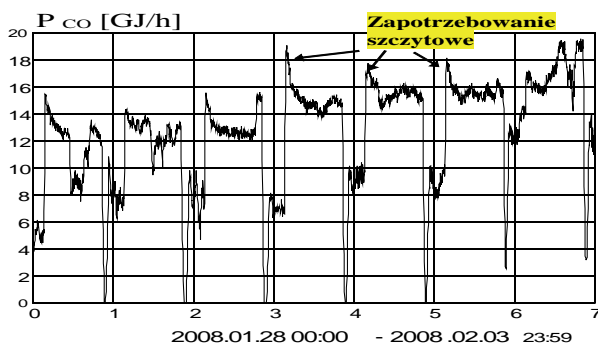
źródło grzewcze, aby dostarczana moc grzewcza jak najdokładniej pokrywała się z popytem?

Popyt na moc grzewczą zależy przede wszystkim od temperatury zewnętrznej, ale również od pojemności cieplnej systemu. Zależy oczywiście także od izolacji cieplnej ścian budynku, gdyż straty mocy grzewczej trzeba ciągle uzupełniać. Problemy równoważenia popytu i podaży, czyli bilansowania, występują szczególnie w systemach grzewczych obejmujących wiele budynków, a zasilanych z jednego centralnego wymiennika ciepła [1, 7]. Może się ono odbywać w obszarze użytkownika lub w obszarze dostawcy. Miarą jakości sterowania będzie wówczas różnica między popytem a podażą w czasie pracy dodatkowej instalacji grzewczej. Czas pracy tej instalacji zaczyna się od chwili rozpoczęcia procedury dogrzewania (po wcześniejszych obniżkach temperaturowych) do chwili, gdy budynek został już dogrzany do temperatury komfortowej. Wówczas dodatkowe źródło grzewcze jest wyłączane, zaś podstawowe źródło pracuje jedynie po to, aby utrzymać ustalone już warunki komfortu termicznego. Podstawowym problemem jest ustalenie momentu, w którym należy rozpocząć wykorzystywanie dodatkowego źródła oraz dobranie intensywności jego działania w funkcji czasu. Aby zrealizować takie działania, potrzebny jest odpowiedni algorytm i system sterowania. Zarówno zbyt wczesne, jak i zbyt późne użycie dodatkowego źródła grzewczego spowoduje straty ekonomiczne.

Z punktu widzenia wytwarzania, przesyłu i akumulacji mocy grzewczej, hybrydowe systemy grzewcze funkcjonują podobnie jak systemy generacji rozproszonej w elektroenergetyce [4]. W przypadku energetyki cieplnej, rozproszone źródła są na ogół odnawialne, jak np. kolektory słoneczne, pompy ciepła, kotły na olej lub gaz, czy też kotły na biomasę w połączeniu z systemami magazynowania takimi jak zbiorniki akumulacyjne.

## 2. Warstwowy system sterowania

Zadanie sterowania rozpatrywanym systemem grzewczym [5] polega na utrzymywaniu temperatury zadanej w budynku. W tym systemie występują stany ustalone i przejściowe. W stanach ustalonych do ogrzewania budynku służy sieć miejska. W stanach przejściowych, przy zmianie wartości zadanej temperatury pomieszczeń, stosuje się

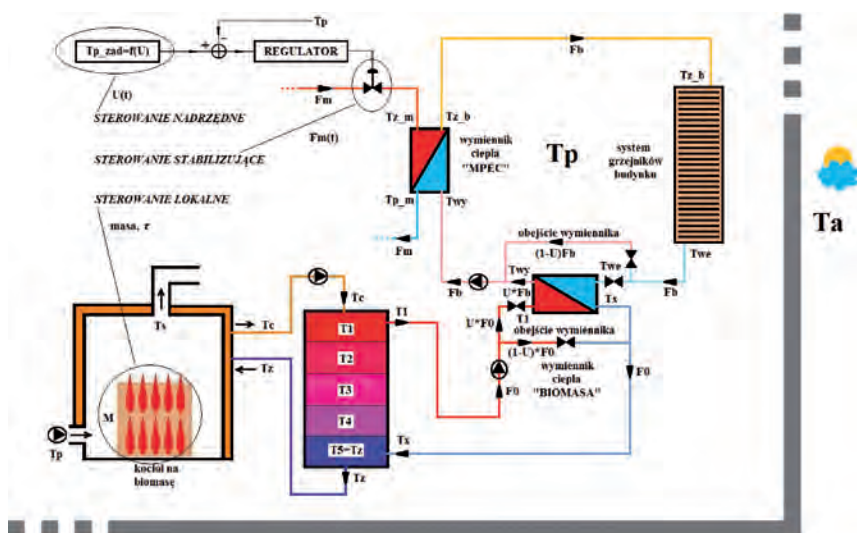


Rys. 1. Przykład wartości szczytowych mocy grzewczej

Fig. 1. An example of heat power peak demands

dotatkowe źródło ciepłe, jakim jest zbiornik akumulacyjny, w którym gromadzone jest ciepło ze spalania biomasy w kotle. Celem użycia dodatkowego źródła ciepłego jest polepszenie dynamiki nadążania za zadanym profilem temperatury pomieszczeń.

Podstawowe sterowanie polega na zmianie przepływu masowego  $F_m$  medium grzewczego (rys. 2) po pierwotnej stronie wymiennika ciepła „MPEC”. Jednak bardzo ważnym elementem analizowanego systemu ciepłowniczego jest kocioł na biomasę. O ile ze strony sieci miejskiej następuje tylko przekaz energii cieplnej do instalacji wewnętrznej budynku, o tyle w przypadku kotła na biomasę oprócz przekazu ciepła, następuje dodatkowo jego wytworzenie.



Rys. 2. Schemat badanego systemu ciepłowniczego wraz ze sterowaniami  
Fig. 2. The scheme of analyzed heating system with control signals

Dla rozważanej instalacji kotła na biomasę, przyjętymi decyzjami sterującymi są: masa wsadowa oraz moment rozpalenia kotła. Założono, że obie pompy cyrkulacyjne oraz wentylator do podawania strumienia powietrza do komory spalania w kotle dostarczają stałe wartości przepływów masowych.

System sterowania składa się z trzech warstw (rys. 2). Najwyższa warstwa realizuje sterowanie nadrzędne. Wypracowuje ono wartość zadaną temperatury pomieszczeń, która następnie jest realizowana przez pozostałe warstwy sterowania. Wybór wartości zadanej temperatury pomieszczeń lub ogólnie profilu temperaturowego będzie następował na podstawie pewnych nadrzędnych przesłanek, takich jak predykcja temperatury zewnętrznej czy kwestie ekonomiczne [2]. Niższą warstwą sterowania jest sterowanie stabilizujące, wpływające na ilość energii cieplnej dostarczanej z sieci miejskiej. Funkcjonuje ono w układzie zamkniętym. Sterowanie stabilizujące wspierane jest przez sterowanie lokalne typu „feedforward”. Sterowanie to polega na dostarczaniu dodatkowej ilości energii cieplnej ze zbiornika akumulacyjnego, gdzie zostało nagromadzone ciepło ze spalania biomasy w kotle. Ta dodatkowa ilość energii cieplnej jest potrzebna w chwilach zmian wartości zadanej

temperatury pomieszczeń, gdyż podstawowe źródło energii cieplnej (sieć miejska) wówczas nie wystarcza.

Sterowanie stabilizujące wykorzystuje sygnał zwrotny, którym jest temperatura pomieszczeń  $T_p$  (rys. 3). Sygnałem sterującym jest przepływ masowy  $F_m$  po stronie pierwotnej wymiennika ciepła „MPEC”. Podobne rozwiązanie często stosuje się w węzłach ciepłowniczych budynków, choć na ogół sygnałem zwrotnym jest temperatura wody zasilającej, porównywana z temperaturą zadaną tejże wody, wynikającą z tzw. krzywych grzewczych i poprawek na obniżenie mocy dostarczanej [3, 6].

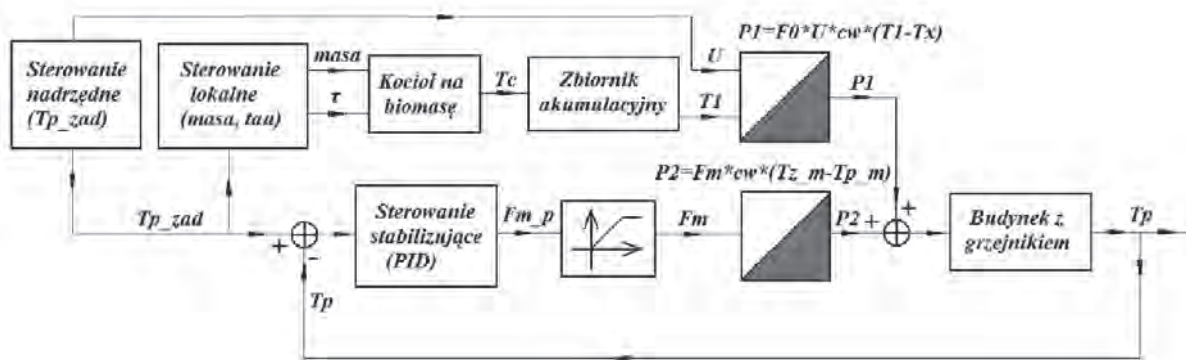
Sterowanie lokalne (feedforward) jest sterowaniem mocą grzewczą gromadzoną i dostarczaną ze zbiornika akumulacyjnego.

Polega ono na doborze wielkości, którymi są: masa wsadowa (*masa*) i czas, w którym następuje jej rozpalenie w kotle ( $\tau$ ). Czas  $\tau$  poprzedza chwilę  $t_0$ , w której następuje zmiana wartości zadanej temperatury pomieszczeń z temperatury obniżonej na temperaturę komfortową. Czas  $t_0$  zmiany tej wartości zadanej jest określany przez sterowanie nadrzędne, jako profil  $T_{p\_zad}$ . Ciepło ze zbiornika akumulacyjnego zaczyna być przekazywane do instalacji wewnętrznej budynku poprzez wymiennik ciepła „BIOMASA” w tej samej chwili  $t_0$ . Wcześniej bowiem wymiennik ciepła „BIOMASA” nie pracuje, w związku z tym media płyną bocznymi obejściami (rys. 2). Przez ten czas nagrzewa się zbiornik akumulacyjny po to, aby z chwilą  $t_0$  rozpocząć dostarczanie do instalacji wewnętrznej budynku (za pośrednictwem wymiennika „BIOMASA”) odpowiednią moc grzewczą. Sygnałami wejściowymi dla wymiennika „BIOMASA” są temperatura  $T_1$  oraz binarna zmienna  $U$ . Schemat przedstawiający zasadę współpracy poszczególnych warstw sterowania przedstawiono na rys. 3.

W tym celu, aby z chwilą  $t_0$  rozpocząć dostarczanie do instalacji wewnętrznej budynku (za pośrednictwem wymiennika „BIOMASA”) odpowiednią moc grzewczą. Sygnałami wejściowymi dla wymiennika „BIOMASA” są temperatura  $T_1$  oraz binarna zmienna  $U$ . Schemat przedstawiający zasadę współpracy poszczególnych warstw sterowania przedstawiono na rys. 3.

### 3. Optymalizacja sterowania instalacją

Warstwa sterowania nadrzędnego określa profil wartości zadanej temperatury budynku  $T_{p\_zad}$  w taki sposób, że przed chwilą  $t_0$ ,  $T_{p\_zad}$  jest obniżona, a od chwili  $t_0$ ,  $T_{p\_zad}$  jest temperaturą komfortową. Sterowanie stabilizujące realizowane jest za pomocą regulatora PID o optymalnych nastawach, uzyskanych w wyniku procedury projektowania w środowisku MATLAB/Simulink. Zadanie sterowania lokalnego jest natomiast sformułowane jako problem optymalizacji. Należało dobrać takie wartości zmiennych *masa* i  $\tau$ , aby zapewnić jak najdokładniejszą zgodność profilu wartości zadanej  $T_{p\_zad}$  i wartości rzeczywistej  $T_p$ . Miarą jakości tej zgodności jest standardowy wskaźnik – całka z kwadratu błędów (ISE). Wskaźnik ten przedstawia formuła (1).

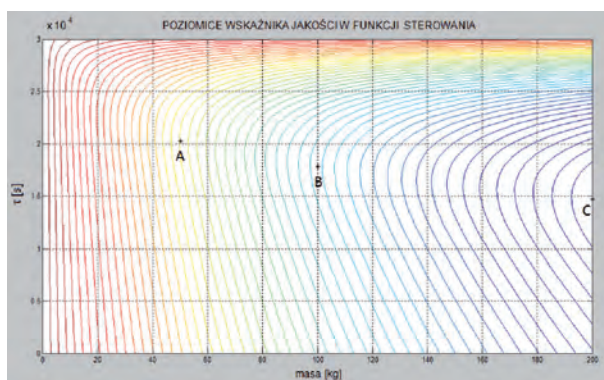


Rys. 3. Współpraca poszczególnych warstw sterowania  
 Fig. 3. The cooperation of particular layers of control

$$Q(masa, \tau) = \int_{t_0}^{t_k} (T_{p\_zad}(t) - T_p(t, masa, \tau))^2 dt \quad (1)$$

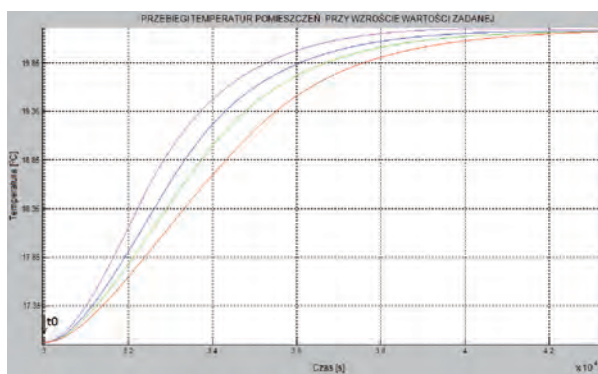
$masa$  – załadunek masy słomy (sterowanie lokalne) [kg],  
 $\tau$  – czas zainicjowania spalania słomy (sterowanie lokalne) [s],  $T_p$  – temperatura pomieszczeń [K],  $T_{p\_zad}$  – wartość zadana temperatury pomieszczeń [K],  $t_0$  – czas przełączenia wartości zadanej temperatury pomieszczeń [s],  $t_k$  – czas końcowy liczenia wskaźnika jakości [s].

Zadanie optymalizacji dla sterowania lokalnego zostało rozwiązane w środowisku obliczeniowym MATLAB/Simulink. Rozwiązanie optymalne jest umiejscowione na ograniczeniu ze względu na masę (rys. 4). Przyczyną takiego położenia jest konfiguracja rozważanego systemu grzewczego i sposób sterowania, który realizuje współpracę dwóch wymienników ciepła.



Rys. 4. Wykres poziomicowy wskaźnika jakości w funkcji sterowania  $masa$  oraz  $\tau$ . Im poziomic ma barwę bardziej przesuniętą ku fioletowi, tym wskazuje na mniejszą wartość wskaźnika jakości. Dodatkowo gwiazdkami C, B i A oznaczono kolejno sterowanie optymalne ( $masa=200$  i  $\tau=14669$ ) oraz dwa inne sterowania:  $masa=100$  i  $\tau=17793$  oraz  $masa=50$  i  $\tau=20263$

Fig. 4. Contour plot of performance index in relation to control variable  $masa$  and  $\tau$ . The contour line color is more shifted towards violet, this indicates a lower value of the objective function. Additionally asterisks C, B and A represent a sequence: the optimal control ( $masa=200$  &  $\tau=14669$ ) and two other controls:  $masa=100$  &  $\tau=17793$  and  $masa=50$  &  $\tau=20263$



Rys. 5. Wykresy temperatury pomieszczeń przy wzroście wartości zadanej temperatury pomieszczeń dla 4 przypadków:  $masa=200$  i  $\tau=14669$  (wartości optymalne, wykres fioletowy),  $masa=100$  i  $\tau=17793$  (wykres niebieski),  $masa=50$  i  $\tau=20263$  (wykres zielony) oraz brak dodatkowego źródła ciepła (wykres czerwony)

Fig. 5. Plots of room temperature in growth of set point of room temperature for a 4 cases:  $masa=200$  &  $\tau=14669$  (optimal values, violet plot),  $masa=100$  &  $\tau=17793$  (blue plot),  $masa=50$  &  $\tau=20263$  (green plot) and lack of additional heat source (red plot)

W tabeli 1. przedstawiono wyliczone numerycznie wartości wskaźniki jakości dla trzech zestawów wielkości sterowanych. W pierwszej kolumnie znajduje się optymalny zestaw dla wielkości sterowanych z wyliczoną wartością wskaźnika jakości. Pozostałe dwie kolumny zawierają inne przykładowe zestawy wielkości sterowanych, przy których wybranej wielkości  $masa$ , odpowiada optymalna wielkość  $\tau$ . Wynik dla  $masa=200$  i  $\tau=14669$  daje najlepszą wartość wskaźnika jakości. Ze względów konstrukcyjnych kotła, maksymalną masę wsadową ograniczono do wartości 200 kg. Układ poziomic na rys. 3 wykazuje, iż nie wystąpi wtedy przegrzanie systemu grzewczego. Moment zapłonu kotła nastąpi odpowiednio wcześniej, by w chwili  $t_0$  zawartość zbiornika akumulacyjnego miała odpowiednią temperaturę. Gdy wówczas uruchomi się wymiennik ciepła „BIOMASA”, to przekaz ciepła do instalacji wewnętrznej budynku, zarówno ze strony wymiennika „MPEC” jak i „BIOMASA”, zapewni najszybsze śledzenie nowej wartości zadanej temperatury pomieszczeń.



**Tab. 1.** Wartości wskaźnika jakości dla różnych zestawów wielkości sterowanych**Tab. 1.** Performance index values for different sets of control values

No.	Wielkość sterowana	Wartość optymalna	Wartość przykładowa	Wartość przykładowa
1.	masa [kg]	200	100	50
2.	$\tau$ [s]	14 669	17 793	20 263
3.	wartości wskaźnika jakości	16 906	19 585	21 673

Na rys. 5. przedstawiono przebiegi temperatury pomieszczeń w budynku przy wzroście wartości zadanej dla tejże temperatury. Wykres fioletowy odpowiada sytuacji, gdy pracuje dodatkowe źródło ciepła przy optymalnych wartościach sterowania ( $masa = 200$  i  $\tau = 14\ 669$ ), wykres niebieski odpowiada sytuacji, gdy pracuje dodatkowe źródło ciepła przy wartościach sterowania  $masa = 100$  i  $\tau = 17\ 793$ , wykres zielony odpowiada sytuacji, gdy pracuje dodatkowe źródło ciepła przy wartościach sterowania  $masa = 50$  i  $\tau = 20\ 263$  oraz wykres czerwony odpowiada sytuacji, gdy w ogóle nie pracuje dodatkowe źródło ciepła (pracuje tylko sieć miejska). Widać, że najszybsze nadążanie za nową wartością zadaną temperatury pomieszczeń ma miejsce w pierwszym przypadku.

#### 4. Podsumowanie

Śledzenie narastającego zbocza wartości zadanej dla temperatury pomieszczeń jest lepsze, jeśli prócz podstawowego źródła ciepłego korzysta się też ze źródła dodatkowego. Trzeba je jednak uruchamiać w odpowiednim momencie, jak również podać odpowiednią masę wsadową do kotła na biomasę. Sterowanie wspomnianą instalacją wymaga koordynacji działania obu rodzajów źródeł w kwestii przepływu ciepła, a także w zakresie wytwarzania ciepła w przypadku dodatkowego źródła ciepłego. Oba źródła ciepła stosuje się w jednej instalacji, a ich wykorzystanie jest efektywniejsze, niż gdyby je wykorzystywać osobno. Ciepło ze spalania biomasy pełni tutaj rolę pomocniczą i prawdopodobnie w ogóle nie opłacałoby się go wykorzystywać, gdyby miało pełnić rolę podstawową. Opisany system grzewczy wpisuje się w wytyczne Unii Europejskiej dotyczące ochrony środowiska, w szczególności udziału energii odnawialnej w produkcji energii cieplnej.

#### Bibliografia

1. Grega W., *Integrated control of centralized and removable heat sources with peak demand compensation*, [in:] 17<sup>th</sup> IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, September 17–21, Cracow, Poland, 2012.
2. Grega W., Kołek K., *Sterowanie nadrzędne węzłem cieplnym*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, Vol. 5, Nr 7–8, 18–25, 2001.
3. Grega W., Kołek K., Bania P., *Optymalne sterowanie węzłem cieplowniczym*, XIV KKA, Zielona Góra 24–27 czerwca 2002.
4. Jarventausta P., Repo S., Rautiainen A., Partanen J., *Smart grid power system control in distributed genera-*

*tion environment*, “Annual Reviews in Control”, Vol. 34, 277–286, 2010, DOI: 10.1016/j.arcontrol.2010.08.005.

5. Kreft W., *Metody sterowania rozproszonymi systemami grzewczymi*, Rozprawa doktorska, Kraków 2014.
6. Kreft W., Filipowicz M., Raźniak A., *Architektura i analiza pomiarów węzłów cieplowniczych na przykładzie Miasteczka Studenckiego AGH*, XIV KKA, „Automatyka AGH”, t. 15, z. 3, 2011.
7. Kreft W., Grega W., *Heating energy distribution basing on AGH building complex example*, InBuS 2006, 4<sup>th</sup> International Congress on Intelligent Building Systems Kraków, Ed. Jerzy Mikulik, Polish Academy of Sciences, The Committee on Automatic Control & Robotics, 2006. ■

#### Hybrid heating system control

**Abstract:** This article presents the problem of hybrid heating system control. This system has two heat sources: district heating system and biomass boiler with accumulation tank. The control of this system requires an appropriate coordination of the operation of these sources. The values of controls provides a solution of corresponding optimization problem.

**Keywords:** hybrid heating system, control, biomass, renewable energy, optimization

Artykuł recenzowany, nadesłany 05.05.2014 r., przyjęty do druku 25.07.2014 r.

#### prof. dr hab. inż. Wojciech Grega

Profesor zwyczajny w AGH w Krakowie. Autor ponad 150 prac naukowych, w tym 3 książek. Jego prace dotyczą sterowania komputerowego i optymalizacji, w szczególności algorytmów sterowania cyfrowego, sterowania rozproszonego, modelowania i sterowania systemami wytwarzania i przesyłu energii. Opublikował także szereg prac z zakresu metodyki kształcenia w szkołach wyższych.

e-mail: wgr@agh.edu.pl



#### dr inż. Wojciech Kreft

Asystent w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, w Katedrze Automatyki i Inżynierii Biomedycznej. Zajmuje się sterowaniem systemami dystrybucji energii cieplnej.

e-mail: wkreft@agh.edu.pl

