



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA  
W KRAKOWIE**

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI,  
AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII  
BIOMEDYCZNEJ**

Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej

**AUTOREFERAT ROZPRAWY  
DOKTORSKIEJ**

**METODY STEROWANIA  
ROZPROSZONYMI SYSTEMAMI  
GRZEWCZYMI**

**mgr inż. Wojciech Kreft**

**PROMOTOR:**

**prof. dr hab. inż. Wojciech Grega**

Kraków 2014

# 1. Wprowadzenie

Problematyka poruszana w pracy dotyczy zagadnień związanych ze sterowaniem oraz koordynacją pracy systemów grzewczych. W rozprawie pod pojęciem systemu grzewczego jest rozumiany zespół urządzeń technicznych przeznaczonych do produkcji, dystrybucji i wykorzystania energii cieplnej w obiektach. Sprawa najczęściej dotyczy zaopatrywania w ciepło obiektów budowlanych prywatnych lub użyteczności publicznej, w celu zapewnienia komfortowych warunków termicznych dla osób w nich przebywających oraz dostarczenia do nich ciepłej wody użytkowej (CWU). Budynki prywatne lub budynki użyteczności publicznej mogą być zaopatrywane w ciepło z miejskiej sieci ciepłowniczej lub z własnego lokalnego źródła ciepła.

Zagadnienia systemów ciepłowniczych jako systemów energetycznych obecnie są bardzo istotne. Jednym z głównych problemów naszych czasów jest problem zaopatrzenia cywilizacji w energię, a energia cieplna jest jej szczególnym rodzajem. Problem jest ważny z dwóch powodów. Po pierwsze następuje wyczerpywanie się paliw kopalnych, które to tradycyjnie były wykorzystywane do generowania ciepła, a po drugie spalanie paliw kopalnych powoduje emisję do atmosfery szeregu groźnych związków chemicznych powodujących niszczenie środowiska na szeroką skalę. Dodatkowo, są wprowadzane konkretne dyrektywy europejskie, które m.in. wymuszają na naszym kraju zwiększenie udziału energii odnawialnej w bilansie energetycznym.

Główną ideą rozprawy jest wskazanie metod oraz rozwiązanie problemu prawidłowej koordynacji pracy lokalnego źródła ciepła z zewnętrznym systemem ciepłowniczym, w taki sposób aby w odpowiednich chwilach czasowych uruchamiać lokalne źródło grzewcze z określoną wydajnością.

Oryginalny charakter rozprawy przejawia się w sposobie zamodelowania procesu spalania biomasy w kotle i jego nagrzewania się oraz zaproponowania strategii sterowania analizowanym systemem grzewczym, która polega na odpowiedniej koordynacji lokalnego źródła ciepła, jakim jest instalacja kotła na biomasę, z zewnętrznym systemem ciepłowniczym, jakim jest sieć miejska (MPEC).

Teza rozprawy doktorskiej brzmi następująco:

**Skoordynowane sterowanie wytwarzaniem i przepływem energii cieplnej w systemach grzewczych umożliwia efektywniejsze i bardziej bezpieczne dla środowiska wykorzystanie odnawialnych i tradycyjnych źródeł energii.**

## 2. Omawiane zagadnienia w poszczególnych rozdziałach

W rozdziale pierwszym rozprawy opisano miejskie i lokalne systemy grzewcze, ich funkcjonowanie oraz najczęściej spotykane struktury i sposoby sterowania.

Drugi rozdział został poświęcony źródłom energii cieplnej, ze szczególnym naciskiem na paliwa odnawialne. Przedstawiono w nim także aspekty ochrony środowiska, normy emisji spalin oraz prawodawstwo krajowe i europejskie w tym zakresie.

W trzecim rozdziale opisano model lokalnego źródła grzewczego, którego elementami składowymi są kocioł na biomasę, zbiornik akumulacyjny oraz płytowy wymiennik ciepła. Sformułowano w nim równania opisujące procesy zachodzące w analizowanych elementach systemu grzewczego, przedstawiono schemat elektryczny reprezentujący właściwości statyczne i dynamiczne instalacji oraz zaprezentowano schemat blokowy modelu zrealizowany w pakiecie MATLAB/Simulink.

Czwarty rozdział zawiera opis identyfikacji parametrów instalacji. Identyfikację tę przeprowadzono w oparciu o dane eksperymentalne z procesów palenia biomasy w kotle. Parametry instalacji uzyskano w wyniku optymalizacji odpowiednio sformułowanego wskaźnika jakości, którego zadaniem była miara rozbieżności pomiędzy odpowiedziami modelu, a rzeczywistymi przebiegami, które zostały zarejestrowane podczas eksperymentów.

Rozdział piąty poświęcono na opis modelu wymiany ciepła dla ogrzewanego budynku. W modelu tym przyjęto, że budynek składa się z jednego dużego pomieszczenia. Opisano w nim również modele wymienników ciepła oraz grzejników. Sformułowano w nim równania opisujące procesy zachodzące w analizowanych elementach systemu grzewczego, przedstawiono schemat elektryczny reprezentujący właściwości statyczne i dynamiczne analizowanego obiektu oraz zaprezentowano schemat blokowy modelu zrealizowany w pakiecie MATLAB/Simulink.

Rozdział szósty przeznaczono na opis sterowania systemem ciepłowniczym. Przedstawiono w nim trójwarstwowy system sterowania badanym obiektem cieplnym, który składa się ze sterowania nadrzędnego, stabilizującego i lokalnego. Celem wspomnianego systemu sterowania jest utrzymywanie zadanej temperatury w budynku. W stanach przejściowych zaproponowano wykorzystanie zgromadzonego ciepła ze zbiornika akumulacyjnego, które pochodzi ze spalania biomasy w kotle. Sformułowano i rozwiązano zadanie optymalizacji sterowania lokalnego oraz przeprowadzono eksperymenty symulacyjne.

W rozdziale siódmym podsumowano rozprawę. W oparciu o przeprowadzone badania i analizy wykazano słuszność tezy rozprawy. Przedstawiono także perspektywy dalszych badań.

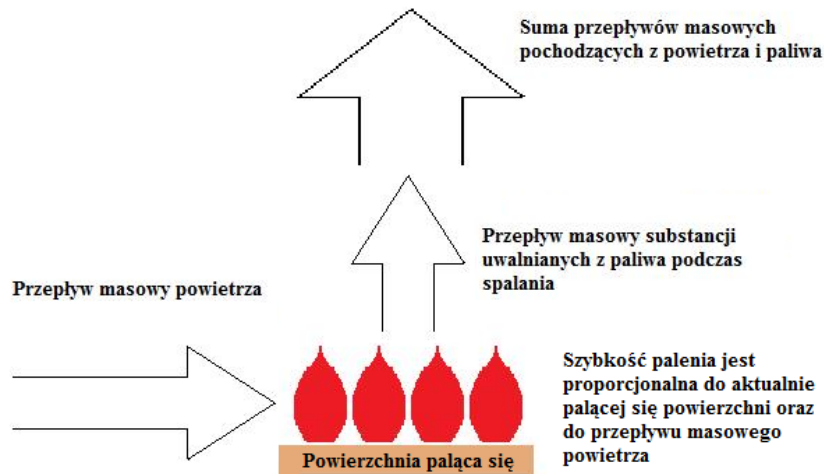
Rozprawę zamyka Aneks oraz opis literatury. W Aneksie umieszczone zostały dodatkowe informacje.

## **3. Wybrane aspekty**

### **3.1 Proces spalania biomasy w kotle**

Zaproponowany w rozprawie model spalania biomasy w kotle bazuje za założeniu, że ładunek biomasy w kotle przeznaczony do spalania ma postać sześcianu. Podczas spalania, wszystkie ścianki z wyjątkiem podstawy palą się i to z jednakową intensywnością. We

wspomnianym modelu zakłada się, że szybkość spalania słomy jest proporcjonalna do aktualnie palącej się jej powierzchni oraz nawiewanego powietrza (rys. 1). Z palącej się powierzchni uwalniają się substancje, które łącznie z nawiewanym powietrzem tworzą spaliny w wyniku reakcji chemicznych. Spaliny zaczynają wypełniać komorę kotła, a następnie uwalniają się do komina.



Rys. 1. Szybkość palenia oraz bilanse masowe zachodzące w kotle w trakcie spalania paliwa.

Opis analityczny procesu spalania biomasy w kotle przedstawiono za pomocą formuły (1).

$$\frac{d}{dt} M_s = -5\alpha \cdot F_p \left( \frac{M_s}{\rho_s} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 1(t - \theta - \tau) \quad (1)$$

$M_s$  – aktualna masa słomy

$\tau$  – czas zainicjowania spalania słomy

$F_p$  – masowy przepływ powietrza nawiewanego

$\rho_s$  – gęstość słomy

$\theta$  – długość czasu potrzebna na pełne rozpalenie się słomy

$\alpha$  – współczynnik szybkości palenia się słomy

Ideą utworzenia tego równania jest pomysł polegający na tym, że gdy masa wsadowa jest w kotle załadowana w postaci sześcianu, to szybkość jej palenia jest proporcjonalna do aktualnie palącej się jej powierzchni oraz masowego przepływu powietrza nawiewanego  $F_p$ . Zakłada się tu, że w danym momencie pali się 5 ścianek sześcianu. W każdej chwili z jednostki powierzchni palącej się jest emitowany określony przepływ masy z biomasy do postaci gazowej. Wielkość ta przy określonym przepływie powietrza będzie dla każdej substancji palnej inna, ale stała dla określonego paliwa i oznaczona jako  $\alpha$ . W trakcie palenia się sześcianu biomasy zmniejsza się jej masa, a co za tym idzie również jej powierzchnia. Zatem im mniej jest biomasy tym wolniej się ona spala. Dodatkowo, szybkość palenia się słomy będzie proporcjonalna do funkcji skoku jednostkowego  $1(t - \theta - \tau)$ .

Poniżej przedstawiono wyprowadzenie formuły (1).

Objętość słomy:  $V = \frac{M_s}{\rho_s}$ . Z drugiej strony  $V = a^3$ , gdzie  $a$  jest długością boku sześcianu

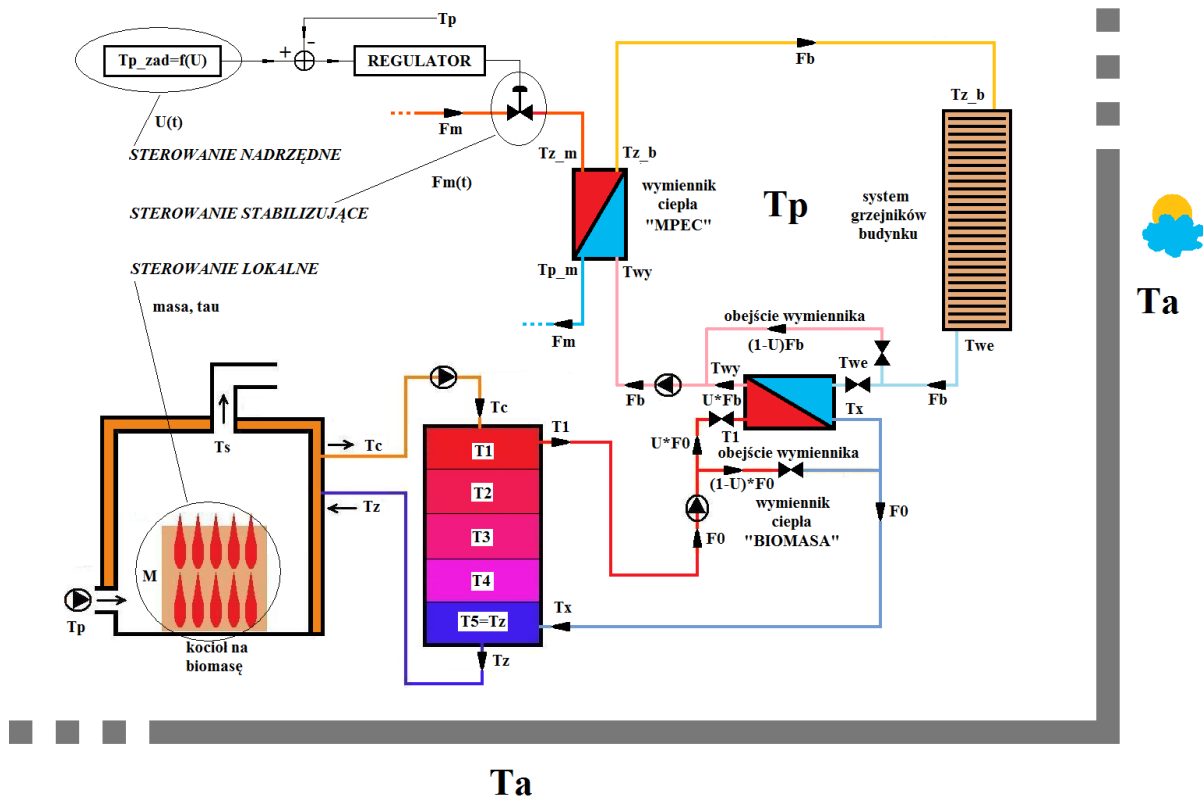
słomy. Powierzchnia paląca się wynosi  $S = 5a^2$ . Zatem  $S = 5 \cdot V^{\frac{2}{3}}$ . Tak więc  $S = 5 \cdot \left(\frac{M_s}{\rho_s}\right)^{\frac{2}{3}}$ .

Ostatecznie równanie (1) ma postać następującą:  $\frac{d}{dt} M_s = -\alpha \cdot S \cdot 1(t - \theta - \tau)$ .

Znak ujemny w równaniu (1) oznacza, że paląca się słoma powoduje ubytek jej masy, a funkcja skoku jednostkowego oznacza, że cały proces spalania rozpoczyna się według opisanego modelu w chwili czasu  $t = \theta + \tau$ .

### 3.2 Sterowanie systemem ciepłowniczym

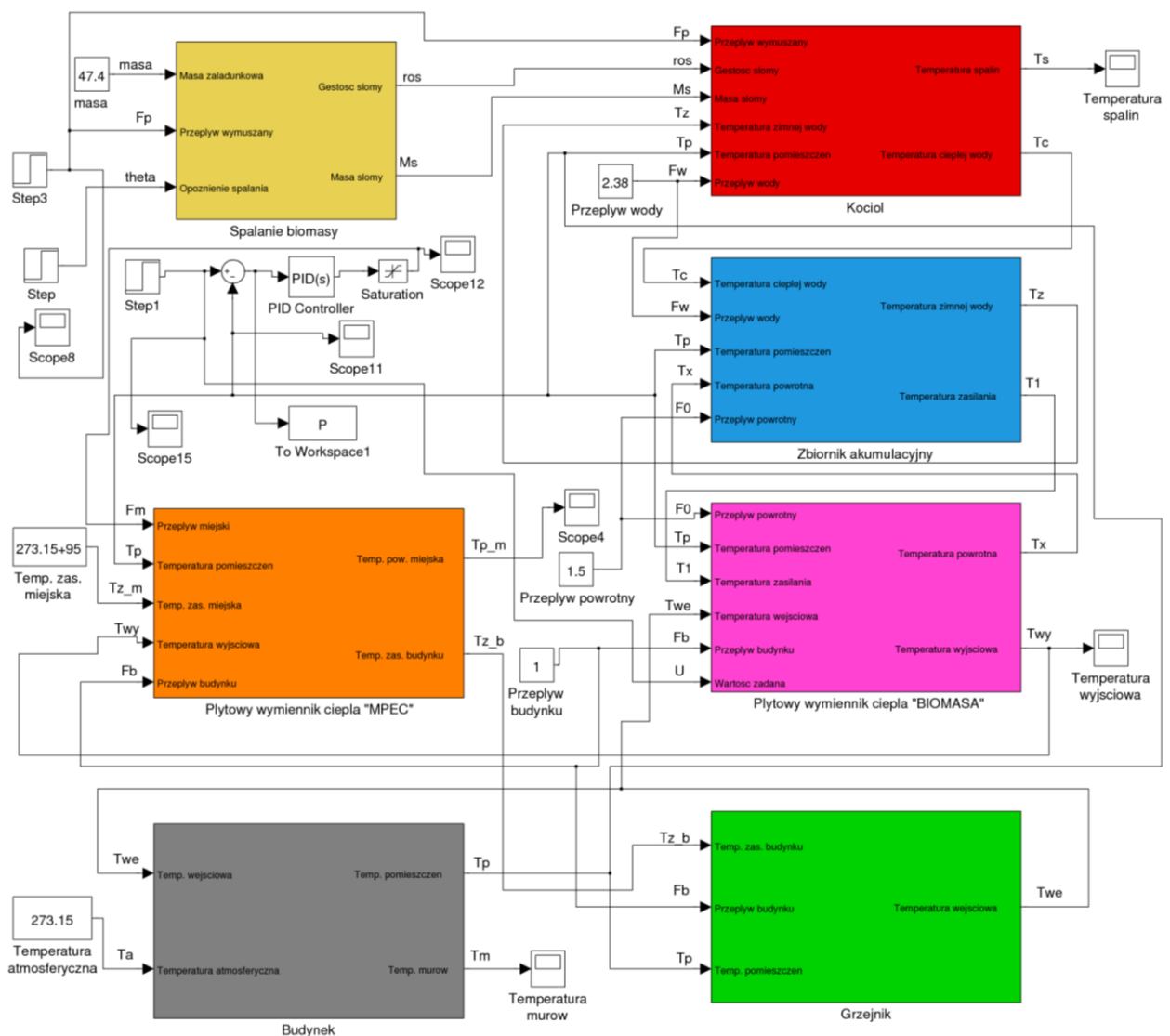
System sterowania składa się z trzech warstw (rys. 2). Warstwą najwyższą jest sterowanie nadrzędne. Ma ono za zadanie wypracowywanie wartości zadanej temperatury pomieszczeń, która następnie będzie realizowana przez pozostałe warstwy sterowania. Wybór wartości zadanej temperatury pomieszczeń lub ogólnie profilu temperaturowego będzie następował w oparciu o przesłanki, które nie są przedmiotem analizy w rozprawie. Takimi przesłankami często są względy ekonomiczne lub określone uregulowania prawne. Niższą warstwą sterowania jest sterowanie stabilizujące, które wpływa na ilość energii cieplnej dostarczanej z sieci miejskiej. Funkcjonuje ono w układzie zamkniętym.



Rys. 2. Poglądowy schemat całego badanego systemu ciepłowniczego wraz ze sterowaniami.

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, którym jest sieć miejska wówczas nie wystarcza.

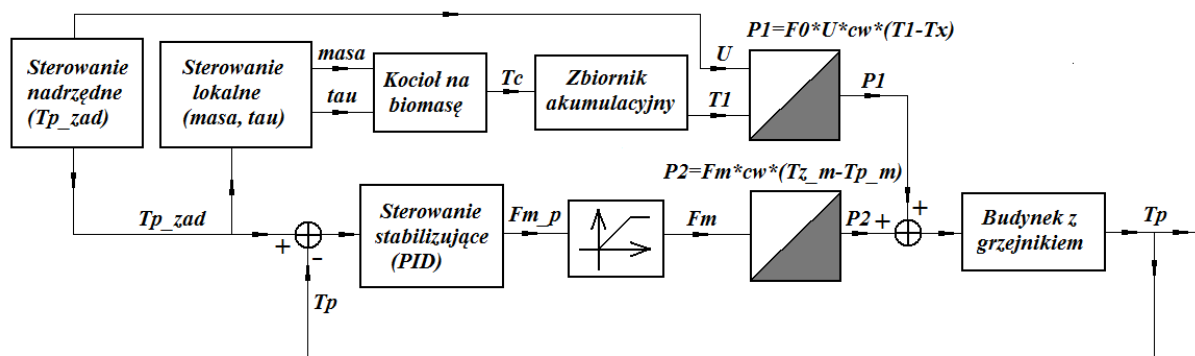
Sterowanie stabilizujące realizuje stabilizację temperatury pomieszczeń dzięki zastosowaniu pętli sprzężenia zwrotnego, gdzie sygnałem zwrotnym jest temperatura pomieszczeń  $T_p$ , a sygnałem sterującym jest przepływ masowy  $F_m$  po stronie pierwotnej wymiennika ciepła „MPEC”. Zastosowanym regulatorem jest regulator PID o nastawach uzyskanych w wyniku procedury automatycznego strojenia w środowisku MATLAB/Simulink.



Rys. 3. Główny diagram przedstawiający cały obiekt grzewczy wraz z układem sterowania, zrealizowany w środowisku MATLAB/Simulink.

Sterowanie lokalne (feedforward) jest sterowaniem mocą 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 pokojową. 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  $t_0$  dostarczyć do instalacji wewnętrznej budynku za pośrednictwem wymiennika „BIOMASA” odpowiednią moc grzewczą. Sygnałami sterującymi dla wymiennika „BIOMASA” są temperatura  $T_1$  i  $U$ .

Schemat symulacyjny całego badanego systemu wraz z układem sterowania przedstawia rys. 3, zaś zasadę współpracy poszczególnych warstw sterowania, przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Współpraca poszczególnych warstw sterowania.

Zadaniem dodatkowego źródła grzewczego, jakim jest instalacja kotła na biomasę ze zbiornikiem akumulacyjnym, jest przyspieszenie dogrzewania pomieszczeń w sytuacji, gdy wartość zadana temperatury pomieszczeń uległa zwiększeniu. W praktyce, taka sytuacja ma miejsce, gdy stosuje się dwie różne wartości zadane dla temperatury pomieszczeń w zależności od tego czy budynek jest użytkowany czy też nie. W przypadku okresu użytkowania budynku stosuje się zadaną wartość temperatury pomieszczeń na poziomie komfortowym, a poza okresem użytkowania budynku stosuje się zadaną wartość tej temperatury na poziomie obniżonym. Ponieważ główne źródło ciepła jakim jest sieć miejska ma poprzez wymiennik ciepła „MPEC” ograniczoną wydajność, więc uruchomienie dodatkowo instalacji kotła na biomasę sprawia, że zapewnienie temperatury komfortowej w pomieszczeniach nastąpi szybciej. Zadanie to nie jest jednak łatwe, gdyż należy odpowiednio dobrać masę wsadową biomasy (*masa*) oraz czas zapłonu ( $\tau$ ) tak, by w efekcie uruchamiając w ustalonym czasie  $t_0$  wymiennik ciepła „BIOMASA” sprawić, by jak najszybciej temperatura pomieszczeń osiągnęła wyższą wartość zadaną. Określone zadanie sterowania lokalnego sformułowano jako problem optymalizacji. Należało dobrać takie wartości sterowania, które minimalizują odpowiedni wskaźnik jakości. Tym wskaźnikiem jakości jest

całka z kwadratu błędu (ISE), który jest różnicą pomiędzy nową wartością zadaną temperatury pomieszczeń, a rzeczywistym przebiegiem temperatury pomieszczeń na przedziale czasu  $(t_0, t_k)$ .

Postać powyższego wskaźnika jakości przedstawia formuła (2).

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

$masa$  – wartość załadunkowej masy słomy (sterowanie lokalne)

$\tau$  – czas zainicjowania spalania słomy (sterowanie lokalne)

$T_p$  – temperatura pomieszczeń

$T_{p\_zad}$  – wartość zadana temperatury pomieszczeń

$t_0$  – czas przełączenia wartości zadanej temperatury pomieszczeń

$t_k$  – czas końcowy liczenia wskaźnika jakości

W tabeli 1. przedstawiono wyliczone numerycznie wskaźniki jakości dla trzech zestawów wielkości sterowanych. W pierwszej kolumnie znajduje się optymalny zestaw dla wielkości sterowanych z wyliczonym wskaźnikiem jakości. Pozostałe dwie kolumny zawierają inne przykładowe zestawy wielkości sterowanych, przy których dla wybranej wielkości  $masa$ , odpowiada optymalna wielkość  $\tau$ . Wynik dla  $masa = 200$  i  $\tau = 14669$  daje najmniejszą wartość wskaźnika jakości. Ze względów konstrukcyjnych kotła, maksymalną masę wsadową ograniczono do wartości 200 kg. Moment zapłonu kotła  $\tau$  nastąpi odpowiednio wcześniej tak, by w chwili  $t_0$  zbiornik akumulacyjny był odpowiednio gorący. 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.

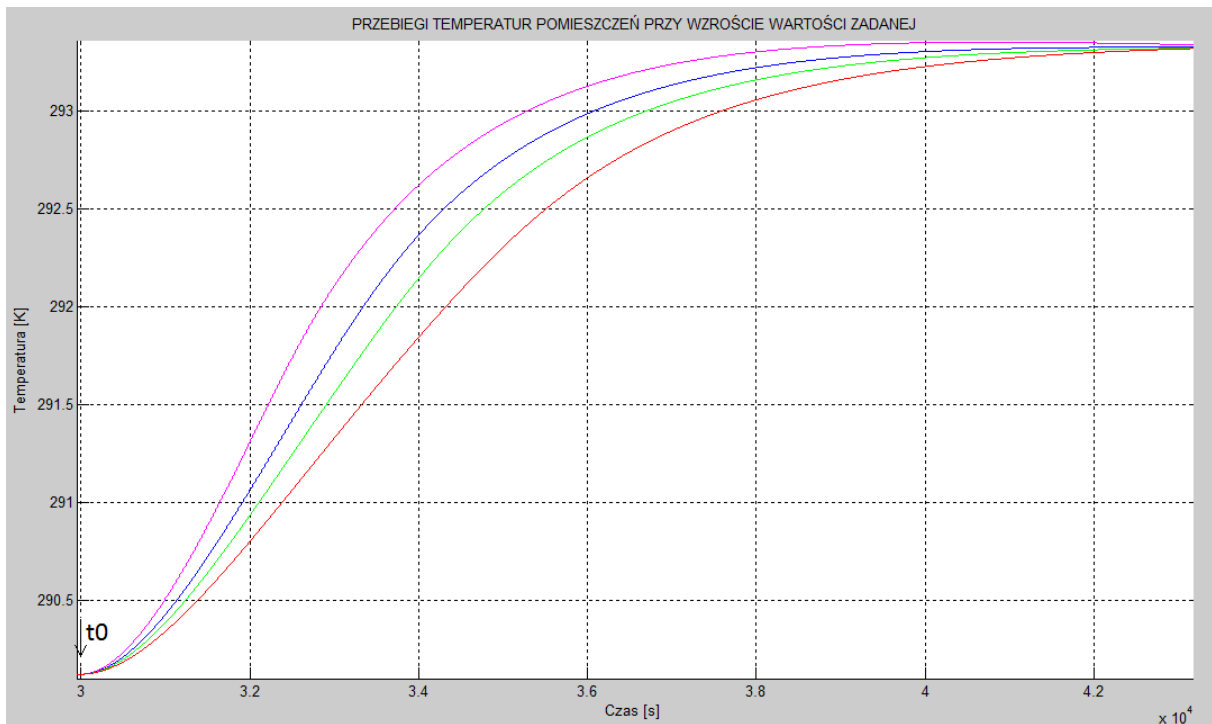
**Tabela 1.**

Otrzymane wyniki wskaźnika jakości dla różnych zestawów wielkości sterowanych.

No.	Wielkość sterowana	Wartość optymalna	Wartość przykładowa	Wartość przykładowa
1.	$masa$ [kg]	200	100	50
2.	$\tau$ [s]	14669	17793	20263
3.	<b>Wskaźnik jakości</b>	<b>16906</b>	<b>19585</b>	<b>21673</b>

Na rys. 5. widać przebiegi temperatur pomieszczeń w budynku przy wzroście ich wartości zadanej. Wykres fioletowy odpowiada sytuacji, gdy pracuje dodatkowe źródło ciepła przy optymalnych wartościach sterowania ( $masa=200$  i  $\tau=14669$ ), wykres niebieski odpowiada sytuacji, gdy pracuje dodatkowe źródło ciepła przy wartościach sterowania  $masa=100$  i  $\tau=17793$ , wykres zielony odpowiada sytuacji, gdy pracuje dodatkowe źródło ciepła przy wartościach sterowania  $masa=50$  i  $\tau=20263$  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.





**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).

## 4. Podsumowanie

Wyniki pracy w pełni wykazują prawdziwość tezy rozprawy. Wynika z niej, że efektywnie można skoordynować działanie systemu ciepłowniczego opartego na dwóch źródłach, z których jedno z nich jest źródłem lokalnym wykorzystywanym do celów poprawienia dynamiki pracy systemu. W ramach tej koordynacji, energia cieplna z tego źródła jest nie tylko we właściwy sposób przesyłana, ale jest również w odpowiedni sposób wytwarzana.

Na bazie zaproponowanej metody koordynacji sterowania wspomnianych wcześniej dwóch źródeł ciepła, w ramach dostępnej instalacji laboratoryjnej można analizować o wiele więcej możliwości oddziaływania na wytwarzanie i przesył energii cieplnej ze spalania biomasy. Można np. oddziaływać na wytwarzanie ciepła ze spalania biomasy poprzez regulację nawiewem powietrza, czy też zmieniając intensywność pracy pomp. Szczególnie regulacja intensywnością nawiewu powietrza wydaje się ciekawa, gdyż przy jej pomocy można wpływać na szybkość spalania biomasy, a tym samym na tempo wytwarzania ciepła. Jeśli do instalacji grzewczej na biomasę zainstaluje się odpowiedni podajnik, to kocioł wtedy można w trakcie palenia sukcesywnie doładowywać masą wsadową, praktycznie bez strat energii cieplnej w trakcie kolejnych załadunków.

## Wybrane pozycje autora rozprawy

- [1] W. Kreft: *Model zużycia energii ciepłej przez budynek dla różnych strategii sterowania*, Automatyka t. 9 z. 3 s. 419–436, Kraków, 2005
- [2] W. Kreft, W. Grega: *Heating energy distribution control basing on AGH building complex example*, InBuS 2006 : 4th international congress on Intelligent Building System, s. 85–92, Kraków, 2006
- [3] W. Grega, W. Kreft, D. Obłąkowska, A. Raźniak, M. Filipowicz: *Monitorowanie węzłów ciepłowniczych na przykładzie AGH*, Rynek Instalacyjny t. 15 nr 9 s. 78–85, 2007
- [4] W. Kreft: *Cyfrowe algorytmy sterowania dystrybucją energii ciepłej*, Sterowanie i automatyzacja : aktualne problemy i ich rozwiązania, s. 427–436, Warszawa, 2008
- [5] W. Kreft: *Hierarchiczne i rozproszone sterowanie dystrybucją energii ciepłej*, PAR Pomiary Automatyka Robotyka t. 14 nr 9 s. 61–67, 2010
- [6] W. Kreft, M. Filipowicz, A. Raźniak: *Architektura i analiza pomiarów węzłów ciepłowniczych na przykładzie Miasteczka Studenckiego AGH*, Automatyka t. 15 z. 3 s. 389–401, 2011
- [7] M. Filipowicz, M. Dudek, A. Raźniak, W. Grega, W. Kreft, M. Rosół: *Monitoring temperatury komory kotła na biomasę oraz instalacji grzewczej*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja t. 42 nr 7–8 s. 310–316, 2011
- [8] W. Kreft: *Stanowisko laboratoryjne do badania procesów spalania biomasy*, PAR Pomiary Automatyka Robotyka t. 15 nr 12 s. 127–128, 2011
- [9] W. Kreft: *Modelling of biomass fuelled heating system*, chapter in the monograph titled: *Modelling and Identification Algorithms for Emerging Applications in Data and Signal Processing* (przyjęte do druku), 2014
- [10] W. Kreft: *Identification of biomass fuelled heating system*, chapter in the monograph titled: *Modelling and Identification Algorithms for Emerging Applications in Data and Signal Processing* (przyjęte do druku), 2014
- [11] W. Grega, W. Kreft: *Sterowanie hybrydowym systemem grzewczym*, PAR Pomiary Automatyka Robotyka (przyjęte do druku), 2014