

Identyfikacja modeli matematycznych i sterowanie systemem ogrzewania małych budynków

Modelowanie zasobnika c.w.u.

Szymon Ogonowski

- Wstęp
- Przygotowanie c.w.u.
- Modelowanie
- Optymalizacja
- Podsumowanie

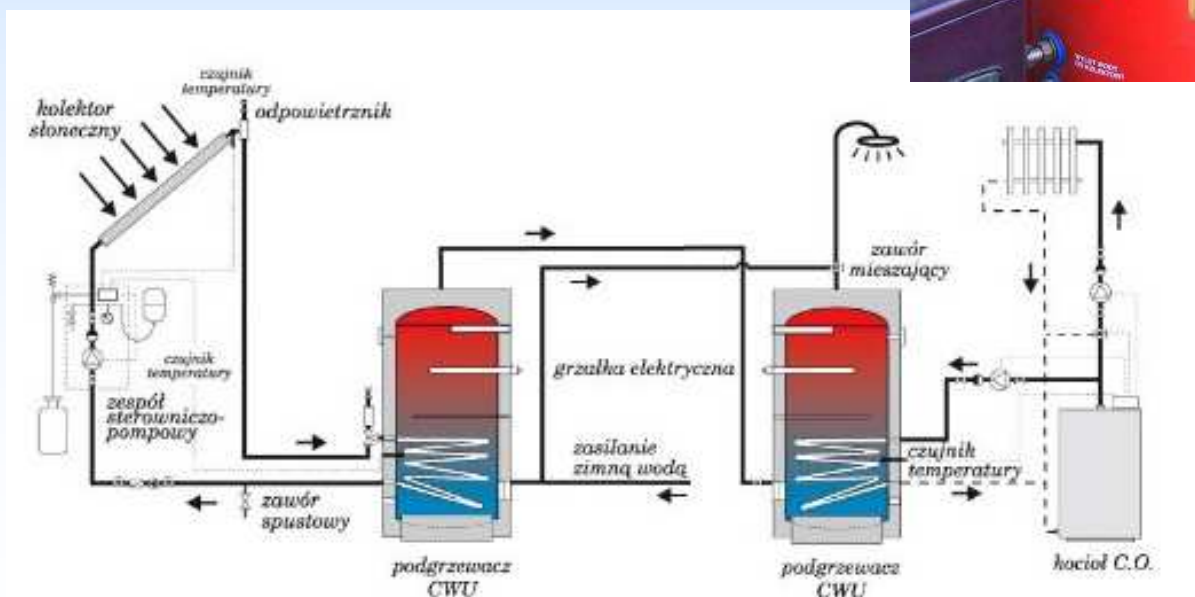
Wstęp

- **Cel pracy:** zbudowanie (parametryzacja) układu sterowania dla typowego systemu ogrzewania, którego zadaniem jest:
 - utrzymywanie komfortu cieplnego
 - minimalizacja wskaźnika zużycia energii
- **Założenie:**
 - brak ingerencji w system ogrzewania
 - jak najmniejsza ingerencja w system pomiarowy
- **Cel badań:**
 - modelowanie układu przygotowania c.w.u. wraz z systemem sterowania
 - wykorzystanie modelu dla celów oceny możliwości optymalizacji parametrów systemu sterowania
 - opracowanie wytycznych dla modelu uogólnionego identyfikowanego na bieżąco

Przygotowanie c.w.u. (1)

- Rodzaje podgrzewaczy wody:
 - przepływowe
 - bez zbiornika
 - z buforem
 - z szeregiem buforów
 - pojemnościowe
 - z płaszczem
 - z wężownicą
 - z wieloma wężownicami
 - z grzałką elektryczną

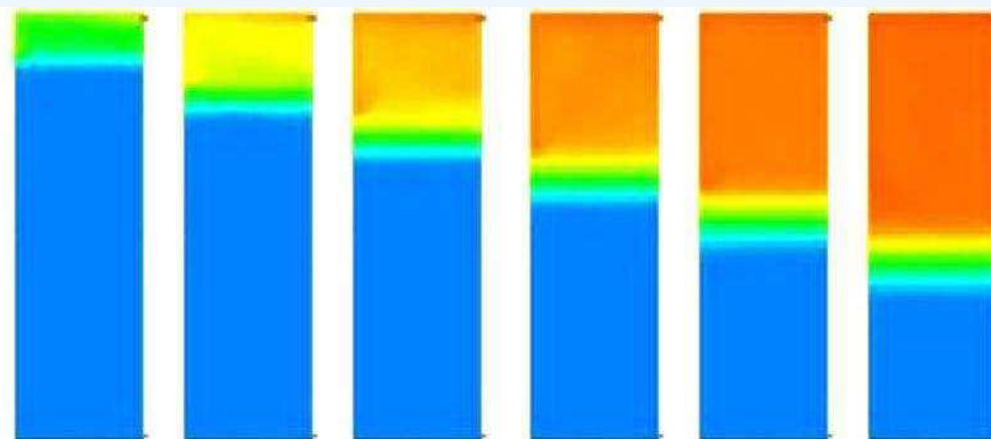
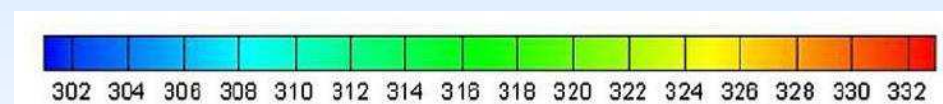
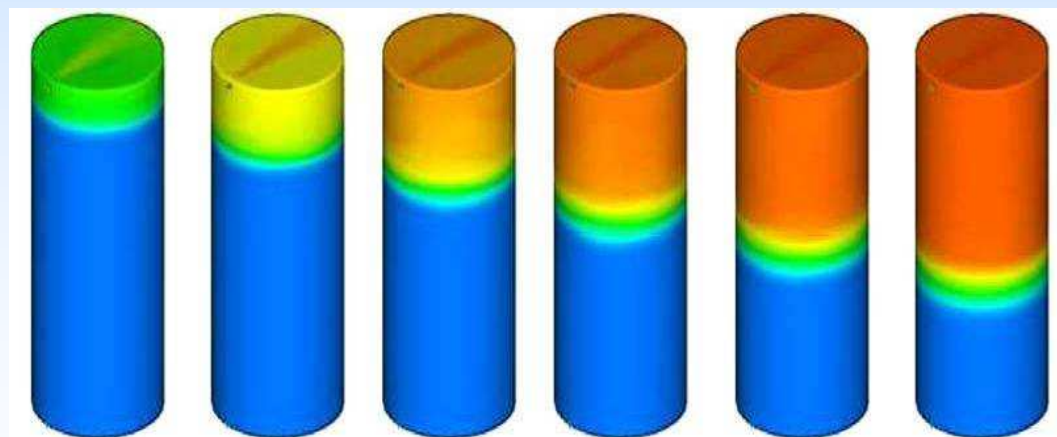
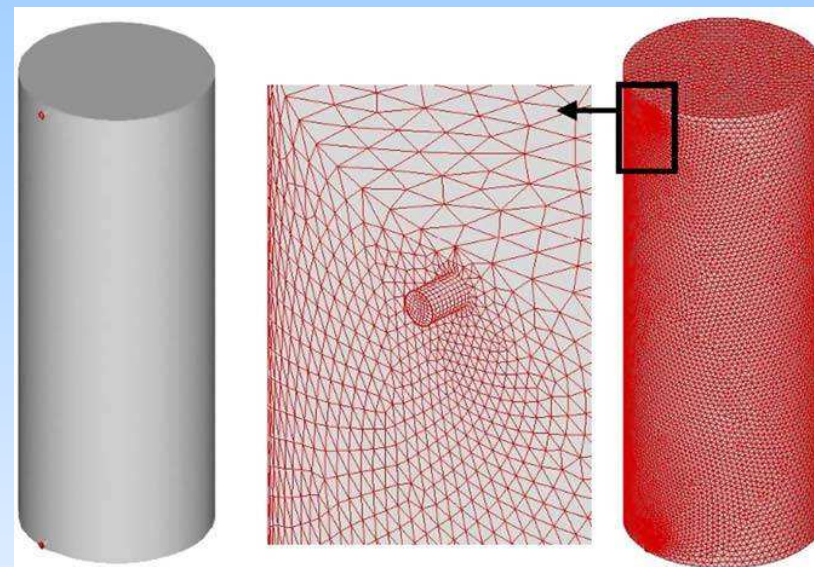
Przygotowanie c.w.u. (2)



Modelowanie zasobnika (1)

Podejścia w literaturze

- Dokładne modelowanie
 - dynamika płynów
 - równanie Naviera-Stokesa
 - modelowanie przestrzenne
 - stałe rozłożone



S. Ievers, W. Lin: „*Numerical simulation of three-dimensional flow dynamics in a hot water storage tank*”, Applied Energy, 2009.

Modelowanie zasobnika (2)

Podejścia w literaturze

- Modele nieliniowe

- M. Orphelin, J. Adnot: *„Improvement of Methods for Reconstructing Water Heating Aggregated Load Curves and Evaluating Demand-Side Control Benefits”*, IEEE Transactions on Power Systems, 1999.
- I.E. Lane, N. Beute: *„A Model of Domestic Hot Water Load”*, IEEE Transactions on Power Systems, 1996.
- J. Vieira, A. Mota: *„Parameter Estimation of Non-Linear Systems With Hammerstein Models Using Neuro-Fuzzy and Polynomial Approximation Approaches”*, IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2004.
- N. Nassif: *„Self-tuning dynamic models of HVAC system components”*, Energy and Buildings, 2008.

Modelowanie zasobnika (3)

Podejścia w literaturze

- Modelowanie z linearyzacją
 - wykorzystanie fenomenologii
 - linearyzacja wokół punktu
 - liniowy model dyskretny
 - wykorzystanie dla celów sterowania

$$A(q^{-1}) y(k) = q^{-d} B(q^{-1}) u(k-1) + w(k) \quad (2)$$

S. Claquin, A. Carriere, F. Rocaries: „*Modelling and Application of Adaptive Control to a Gas Heater*”, *Control Applications*, 1994.

$$\begin{aligned}
 \frac{\rho_e C_e V_e}{2} \times \frac{\partial T_{es}(t)}{\partial t} &= (\rho_e C_e \pi r_1^2 U_e(t) - \frac{K_e S_e}{2}) T_{ee}(t) \\
 &\quad - (\rho_e C_e \pi r_1^2 U_e(t) + \frac{K_e S_e}{2}) T_{es}(t) \\
 &\quad + K_e S_e \bar{T}_p(t) \\
 \rho_p C_p V_p \times \frac{\partial \bar{T}_p(t)}{\partial t} &= \frac{K_e S_e}{2} T_{ee}(t) + \frac{K_e S_e}{2} T_{es}(t) \\
 &\quad - (K_f S_f + K_e S_e) \bar{T}_p(t) \\
 &\quad + K_f S_f T_{ch}(t) \\
 \frac{\rho_c C_p V_c}{2} \times \frac{\partial T_{ch}(t)}{\partial t} &= + K_f S_f \bar{T}_p(t) \\
 &\quad - (\rho_c C_p S_c \alpha U_g(t) + K_f S_f) T_{ch}(t) \\
 &\quad + \rho_c C_p S_c \alpha U_g(t) T_{ad}
 \end{aligned} \quad (1)$$

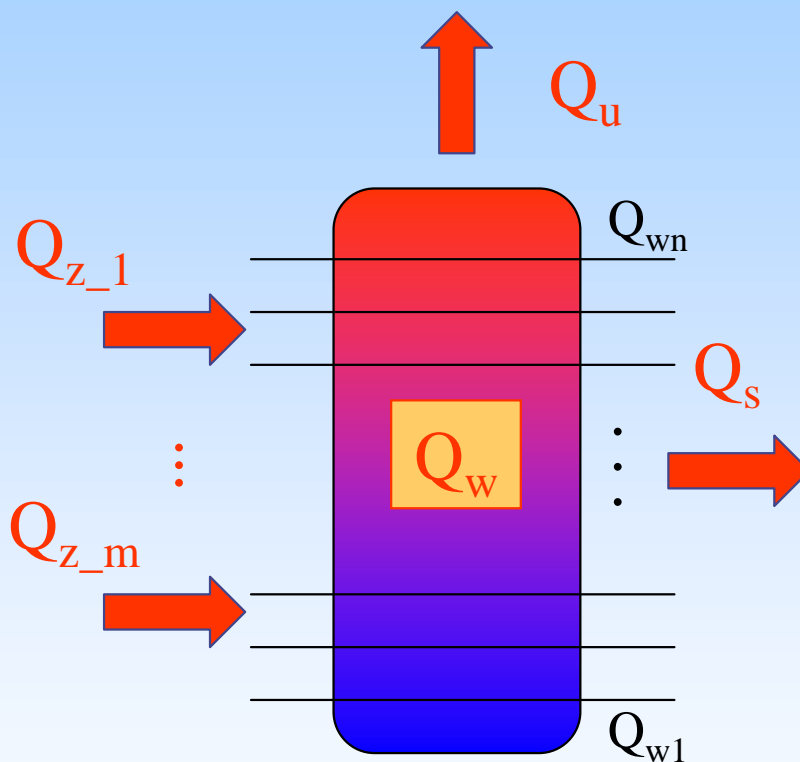
Modelowanie zasobnika (4)

Podejścia w literaturze

- Modelowanie z wieloma uproszczeniami
 - założenie idealnego mieszania
 - założenie braku strat do otoczenia
 - założenie braku strat przy transporcie ciepła
- Modele warstwowe
 - podział modelowanego zasobnika na warstwy
 - różne formy podziału (najczęściej związane z pomiarem)
- M. Y. Haller, J. Streicher: „*Comparative Analysis of Thermal Energy Storage Stratification Efficiency*”, Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability, 2009.
- S. Alizadeh: „*An Experimental and Numerical Study of Thermal Stratification in a Horizontal Cylindrical Solar Storage*”, Solar Energy, 1999.

Modelowanie zasobnika (5)

Model warstwowy



$$Q_w = \sum_1^m Q_m - Q_u - Q_s \quad (1)$$

$$Q_{wn} = \sum_1^{m(n)} Q_{m(n)} - Q_{un} - Q_{sn} \quad (2)$$

Modelowanie zasobnika (6)

Pojedyncza warstwa

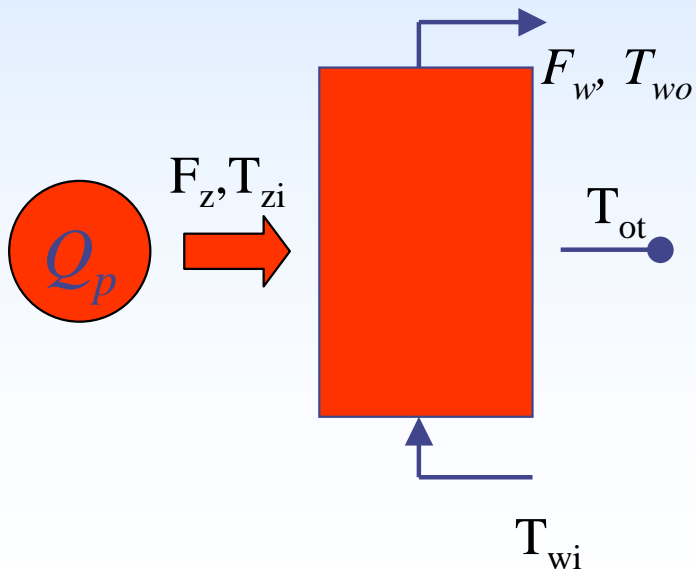
$$\rho C_w V \frac{dT_{wo}}{dt} = \rho C_w F_z (T_{zi} - T_{zo}) - \rho C_w F_w (T_{wo} - T_{wi}) - \frac{\lambda A}{d} (T_{wo} - T_{ot}) \quad (3)$$

$$\rho C_w V_w \frac{dT_{zi}}{dt} = Q_p - \rho C_w F_z (T_{zi} - T_{zo}) - \frac{\lambda_w A_w}{d_w} (T_{zi} - T_{ot}) \quad (4)$$

gdzie:

T_{wi} , T_{zi} – zmienne stanu

T_{zo} – zmienna zależna



Przyjmując za siłę napędową wymiany ciepła średnią temperaturę*:

$$T_{sr} = \frac{T_{zi} + T_{zo}}{2}$$

można zapisać, że:

$$Q_w = a(F_g)^b (T_{sr} - T_{wo})$$

i po podstawieniu, usunąć T_{zo} .

*) T.E. Marlin: „*Process Control*”, McGraw-Hill, 1995.

Modelowanie zasobnika (7)

Ogólny model warstwowy

- Założenia:
 - uwzględnienie ciepła od każdego źródła połączonego z warstwą lub warstwą sąsiednią
 - wymiana ciepła pomiędzy warstwami sąsiednimi

$$\begin{aligned} \frac{dT_{wo}^n}{dt} = & b_1^n F_z^{n,m} (T_{zi}^n - T_{wo}^n) - b_2^n F_w (T_{wo}^n - T_{wo}^{n-1}) - b_3^n (T_{wo}^n - T_{ot}) \\ & - b_4^n (T_{wo}^n - T_{wo}^{n-1}) + b_5^n (T_{wo}^{n+1} - T_{wo}^n) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dT_{zi}^m}{dt} = p_1^n Q_g^m - p_2^n F_z^m (T_{zi}^m - T_{wo}^n) - p_3^n (T_{zi}^m - T_{ot}) \quad (6)$$

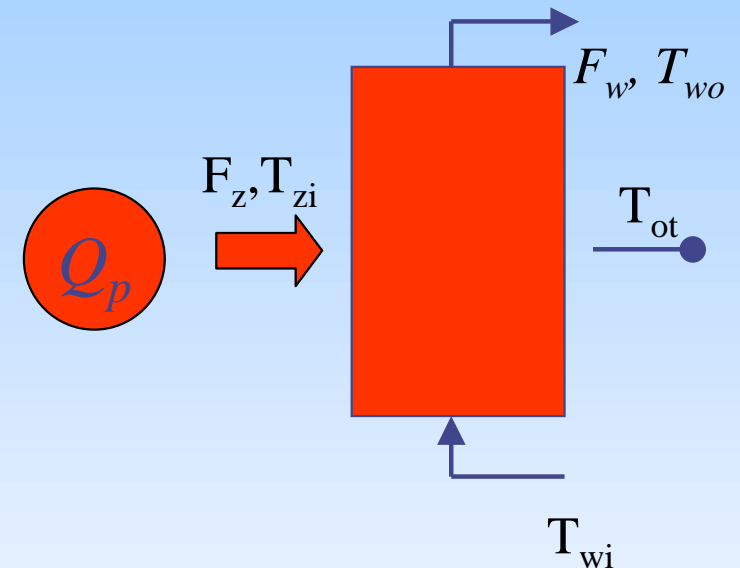
gdzie:

n – numer warstwy, m – numer źródła ciepła

Modelowanie zasobnika (8)

Wyznaczanie parametrów
pojedynczej warstwy

To podejście umożliwia zgrubne
wyznaczenie parametrów modelu



$$\frac{dT_{wo}}{dt} = b_1 F_z (T_{zi} - T_{wo}) - b_2 F_w (T_{wo} - T_{wo}^{-1}) - b_3 (T_{wo} - T_{ot}) - b_4 (T_{wo} - T_{wo}^{-1}) + b_5 (T_{wo}^{+1} - T_{wo}) \quad (7)$$

$$\frac{dT_{zi}}{dt} = p_1 Q_g - p_2 F_z (T_{zi} - T_{wo}) - p_3 (T_{zi} - T_{ot}) \quad (8)$$

Modelowanie zasobnika (9)

Przykład

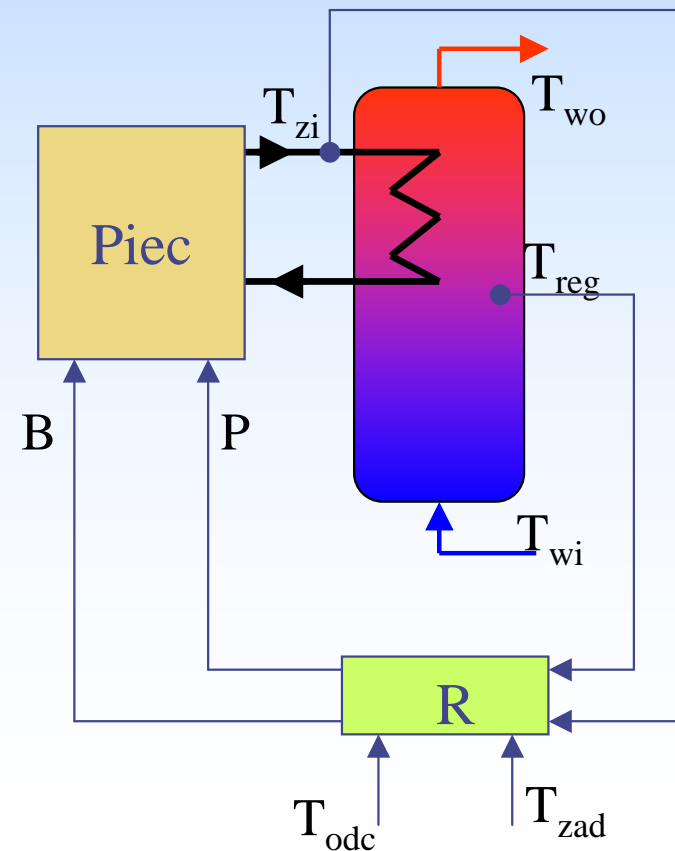
- Zasobnik o pojemności 300l wody
- Dwie węzownice – górna podłączona do pieca gazowego
- Pomiar 10 temperatur, przepływu c.w.u. oraz stanów załączeń pieca i pompy



Przepływomierz turbinowy
Zakres: 2 – 40 L/min

- wyjście analogowe:
0(4) – 20mA
- wyjście impulsowe

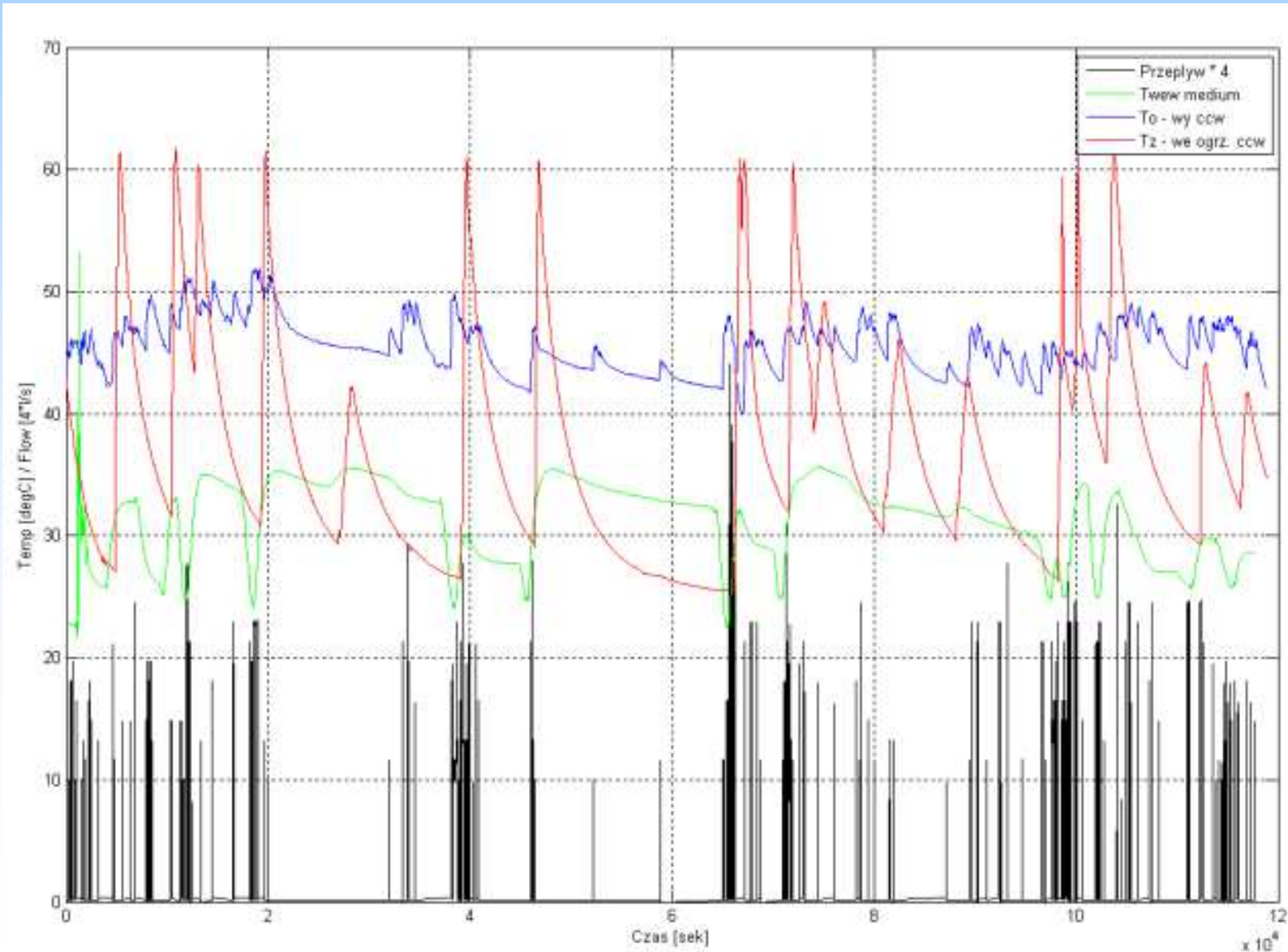
Ingerencja w system
pomiarowy tylko dla
celów modelowania.



Modelowanie zasobnika (10)

Przykład

- Przebiegi czasowe



Modelowanie zasobnika (11)

Przykład

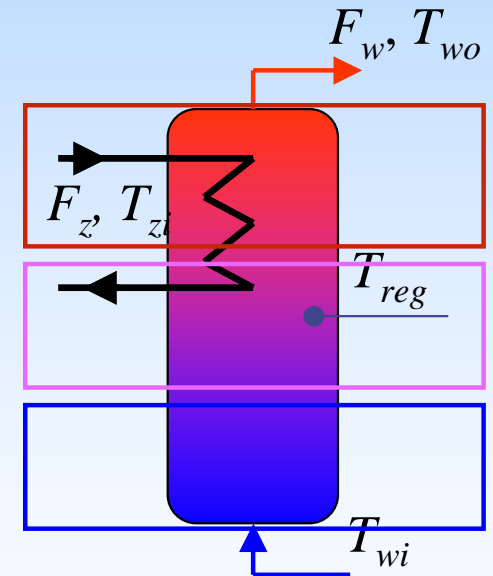
- Równania dla trzech warstw:

$$\frac{dT_{wo}^3}{dt} = b_1^3 F_z (T_{zi} - T_{wo}^3) - b_2^3 F_w (T_{wo}^3 - T_{wo}^2) - b_3^3 (T_{wo}^3 - T_{ot}) - b_4^3 (T_{wo}^3 - T_{wo}^2)$$

$$\frac{dT_{zi}}{dt} = p_1 Q_g - p_2 F_z (T_{zi} - T_{wo}^3) - p_3 (T_{zi} - T_{ot})$$

$$\frac{dT_{wo}^2}{dt} = b_1^2 F_z (T_{zi} - T_{wo}^2) - b_2^2 F_w (T_{wo}^2 - T_{wo}^1) - b_3^2 (T_{wo}^2 - T_{ot}) - b_4^2 (T_{wo}^2 - T_{wo}^1) + b_5^2 (T_{wo}^3 - T_{wo}^2)$$

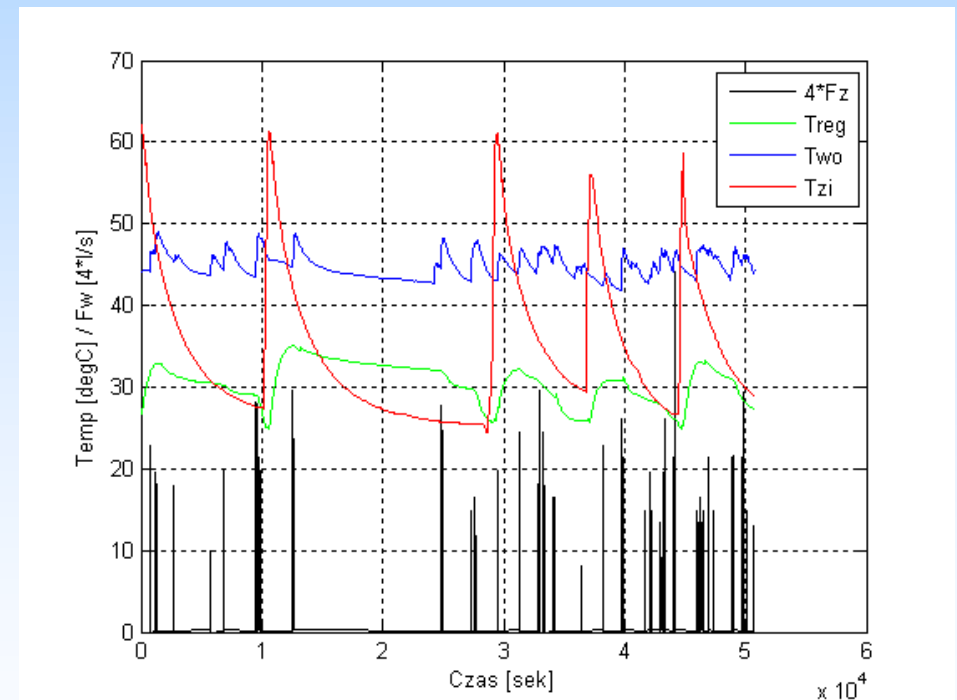
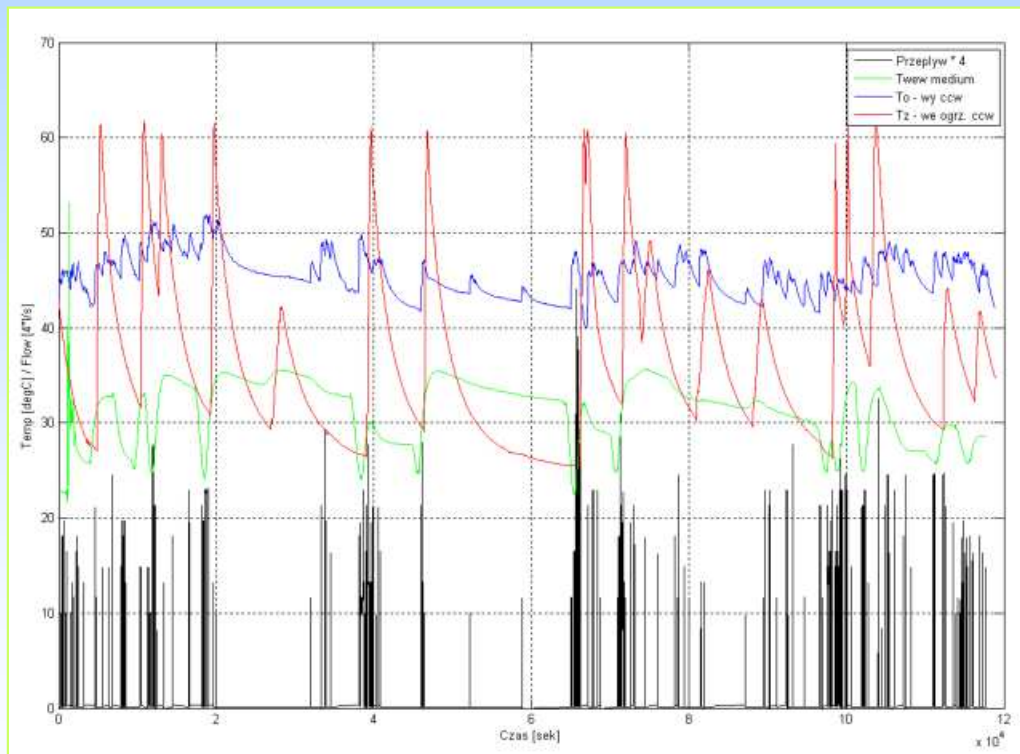
$$\frac{dT_{wo}^1}{dt} = -b_2^1 F_w (T_{wo}^1 - T_{wi}) - b_3^1 (T_{wo}^1 - T_{ot}) + b_5^1 (T_{wo}^2 - T_{wo}^1)$$



Modelowanie zasobnika (12)

Przykład

- Przykłady danych dla zgrubnego wyznaczenia parametrów:

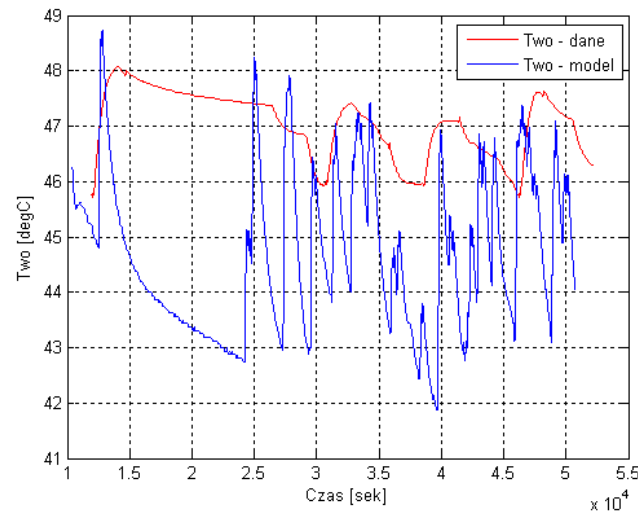
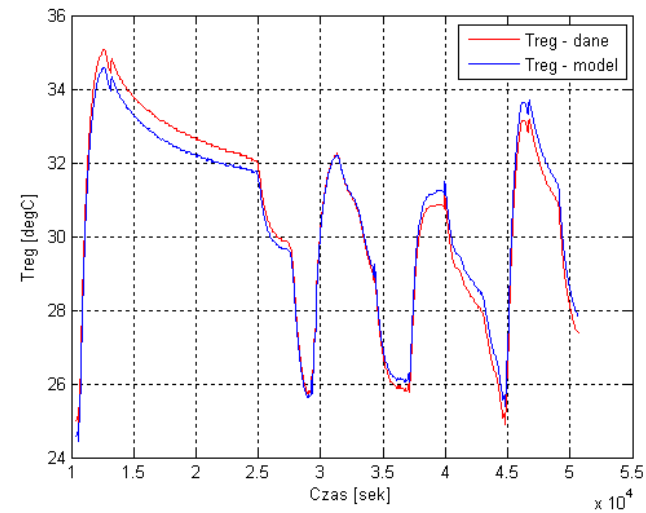
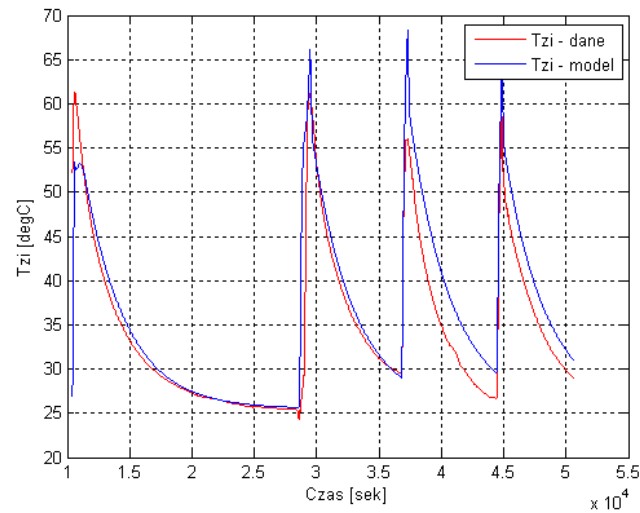


- Wyznaczone parametry zostały następnie poprawione na podstawie danych symulacyjnych

Modelowanie zasobnika (13)

Przykład

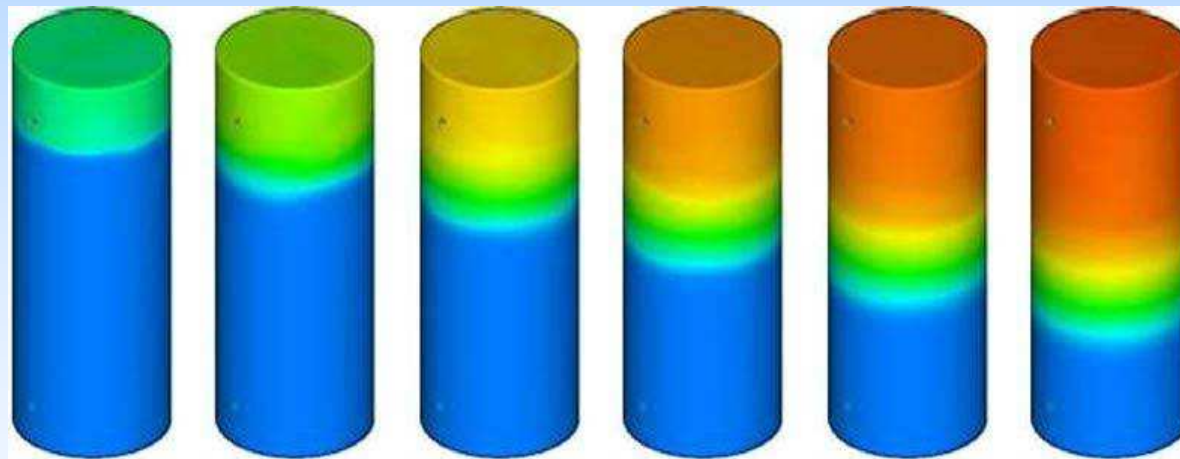
- Przykładowe przebiegi porównawcze:



Optymalizacja (1)

Motywacja

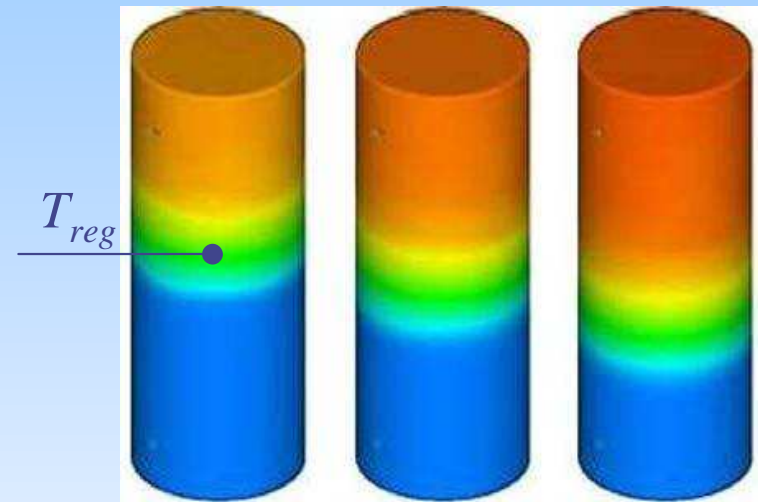
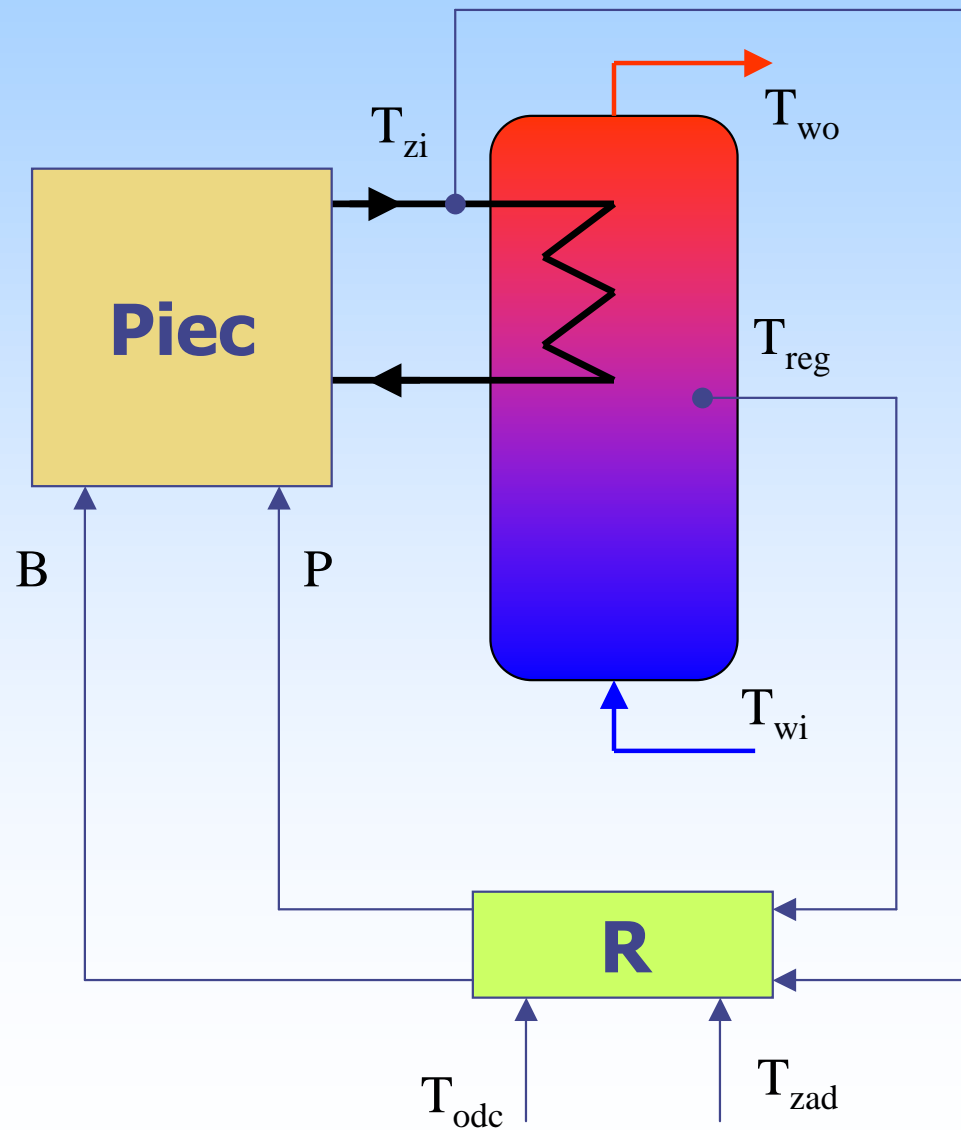
- Przygotowanie c.w.u. pochłania ok. 40 % rocznego zapotrzebowania na energię cieplną



- „Podobny” efekt na wyjściu zasobnika można uzyskać dla różnych parametrów układu sterowania.
- W jaki sposób wyznaczyć parametry warstwy sterowania bezpośredniego?

Optymalizacja (2)

Przykład



Dla jakich wartości T_{zad} i T_{odc} :

$$T_{wo} = T_{wym} \pm \delta$$

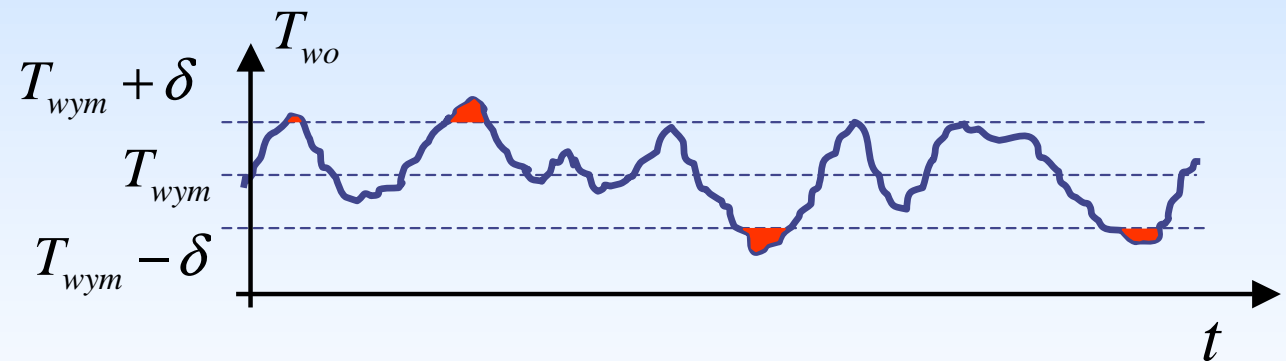
przy najmniejszym możliwym
zużyciu energii?

Optymalizacja (3)

Przykład

- Dla kilku serii danych pomiarowych przepływu c.w.u. zostały wyznaczone wskaźniki:
 - kosztów – zużycie energii (G)
 - komfortu – odchyłki T_{wo} od T_{wym} (J)

$$G = \int p_1 Q_g dt$$



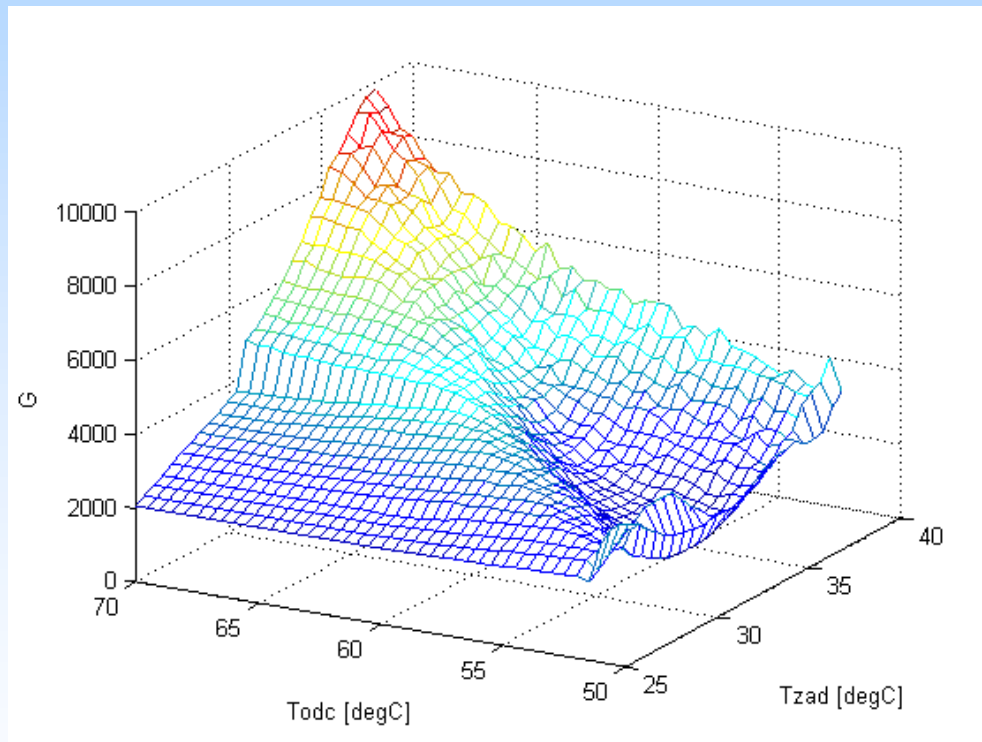
$$J = \int (T_{wo} - T_{wym})^2 \left(\frac{\left| \text{sign}(T_{wo} - T_{wym} - \delta) + \text{sign}(T_{wo} - T_{wym} + \delta) \right|}{2} \right) dt$$

Optymalizacja (4)

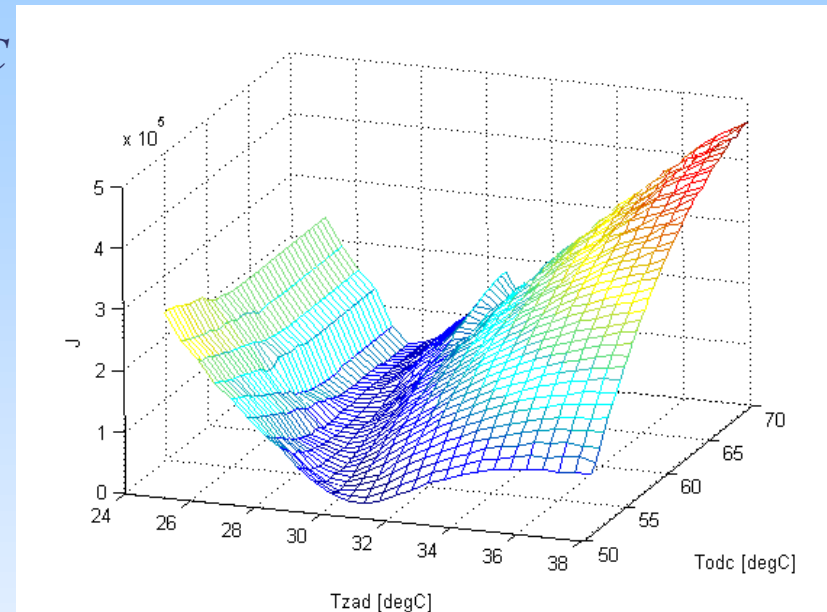
Przykład

$$T_{wym}=47^{\circ}\text{C}$$

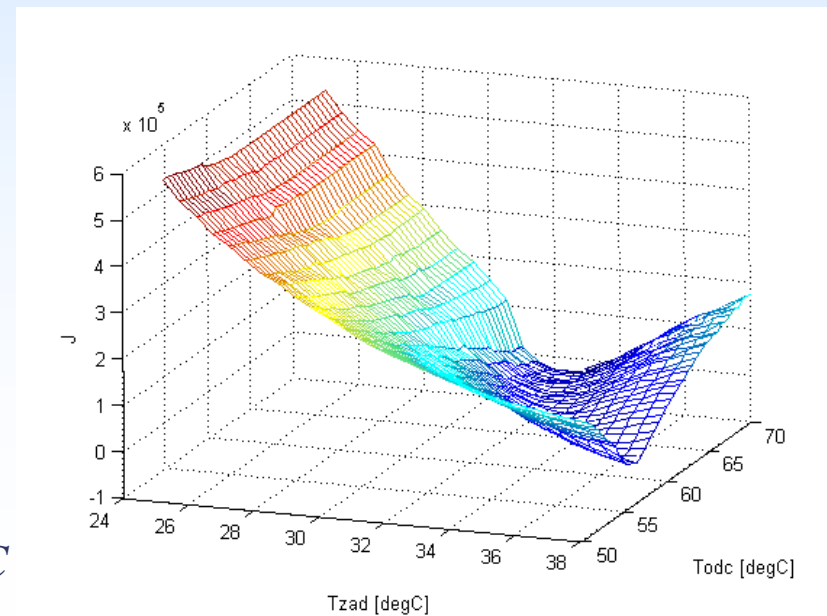
Zużycie energii



Wskaźnik komfortu



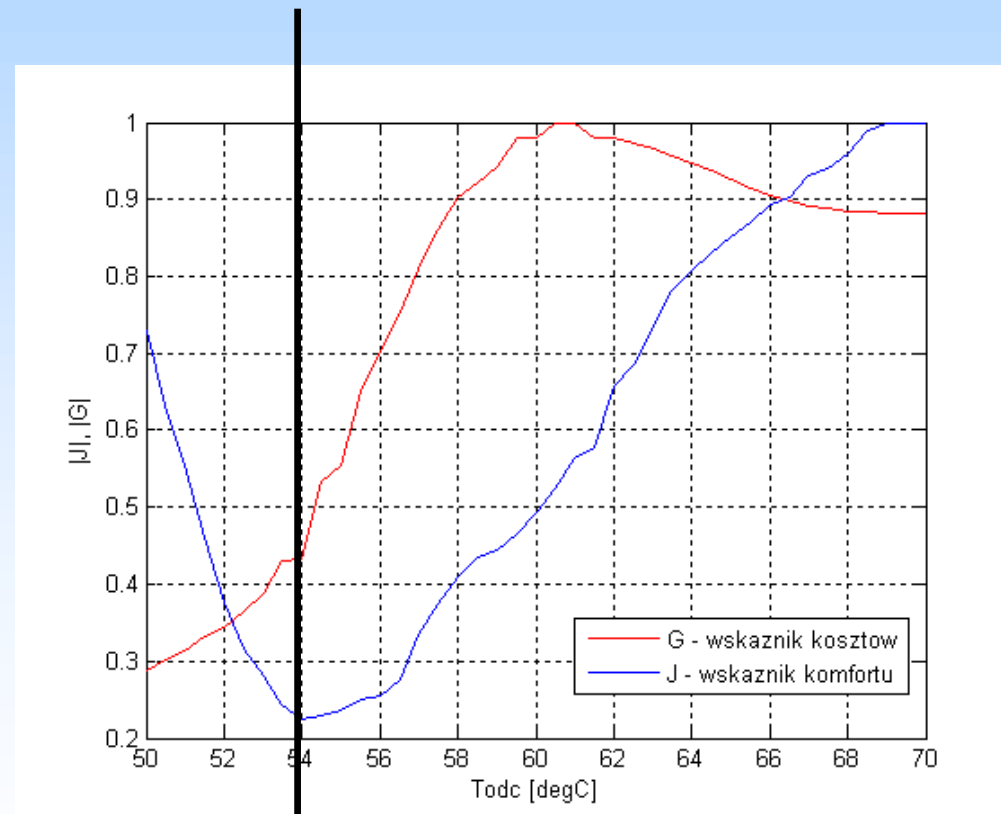
$$T_{wym}=55^{\circ}\text{C}$$



Optymalizacja (5)

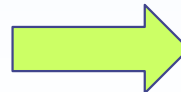
Przykład

- Dla wybranej wartości T_{zad} :



- mniejsze koszty

- obniżenie temperatury T_{wo}



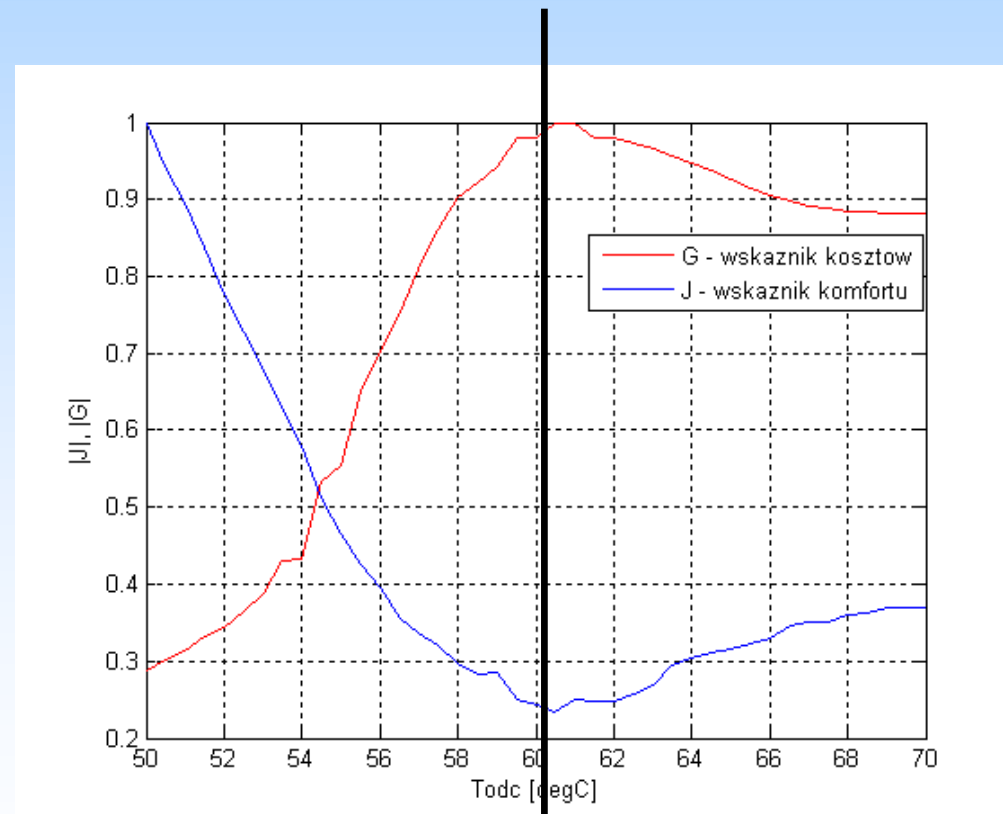
- większe koszty

- podniesienie temperatury T_{wo}

Optymalizacja (6)

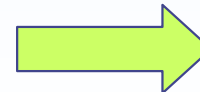
Przykład

- Dla wybranej wartości T_{zad} :



• mniejsze koszty

• obniżenie temperatury T_{wo}



• większe koszty

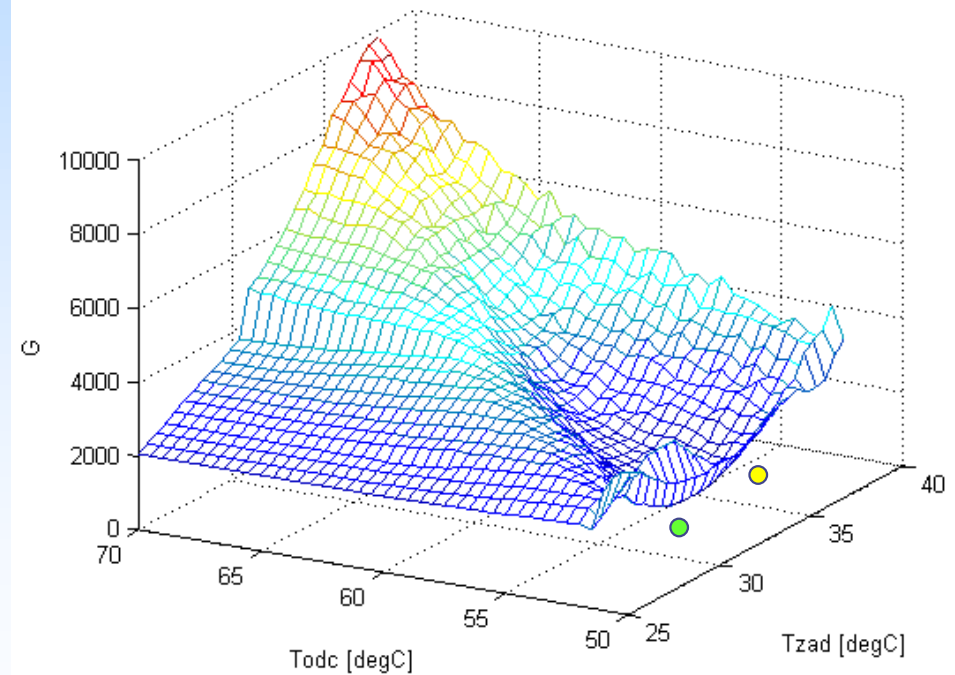
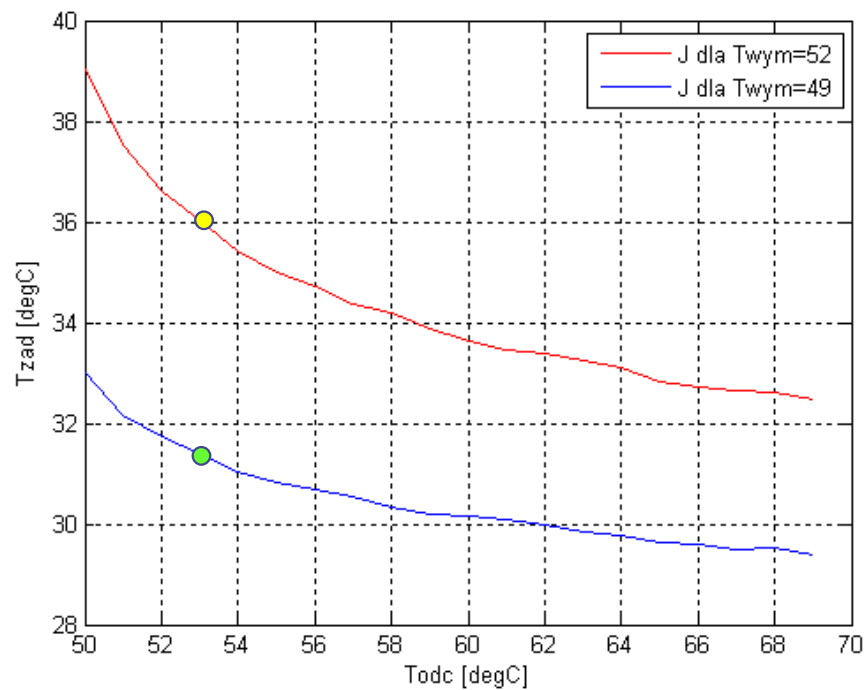
• podniesienie temperatury T_{wo}

Optymalizacja (7)

Przykład

- Zależność obu parametrów:

Zużycie energii



Optymalizacja (8)

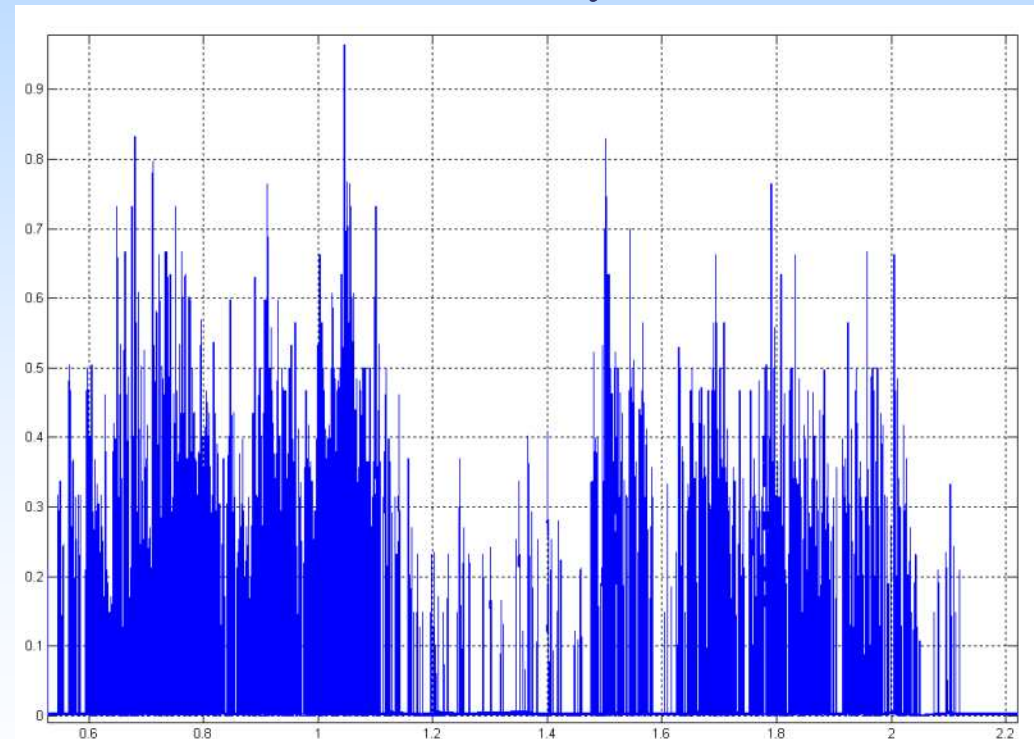
- Model zużycia c.w.u.:

- Funkcja gęstości
prawdopodobieństwa $n(t)$

I.E. Lane, N. Beute: „*A Model of Domestic Hot Water Load*”, IEEE Transactions on Power Systems, 1996.

$$T_{zad_kor}(t) = \mathcal{M}(t)$$

Uśrednione zużycie c.w.u.



Podsumowanie

- Identyfikacja modelu na bieżąco
 - model uogólniony ma strukturę biliniową
 - wektor sterowań ma elementy przyjmujące wartości 0 lub 1
 - można identyfikować modele liniowe o zmiennej strukturze
 - wykorzystany pośredni pomiar przepływu
- Opracowanie algorytmów dla warstwy nadrzędnej i optymalizacji z wykorzystaniem modeli identyfikowanych na bieżąco
- Uwzględnienie potrzeb energetycznych układu c.w.u. w ogólnej strukturze zarządzania energią cieplną budynku

Dziękuję za uwagę