



Modelowanie systemów dystrybucji energii i wybrane problemy sterowania

Wojciech GREGA

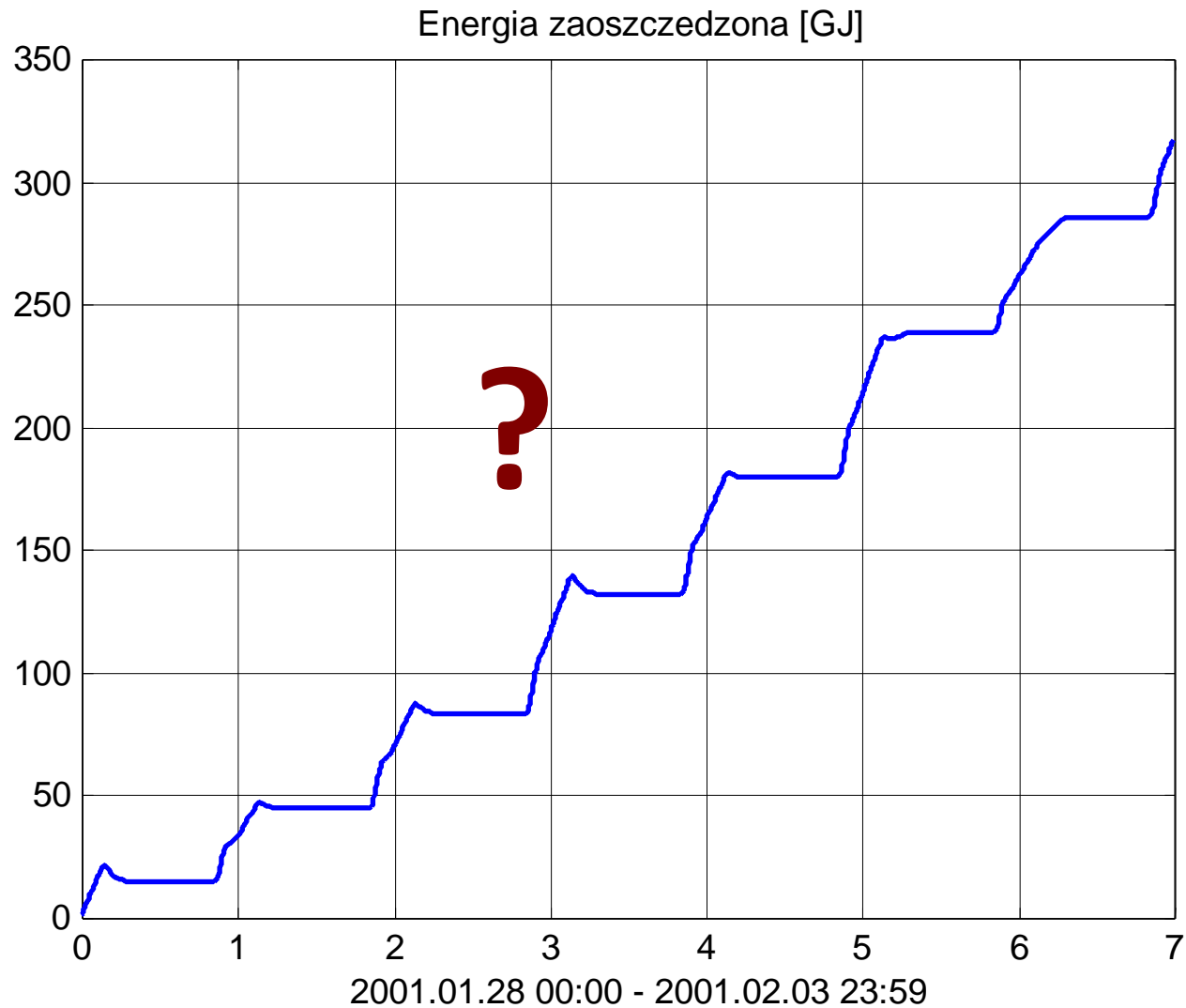
Akademia-Górnictwo-Hutnictwo w Krakowie
Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej

Al. Mickiewicza 30, B1, 30-059 Kraków

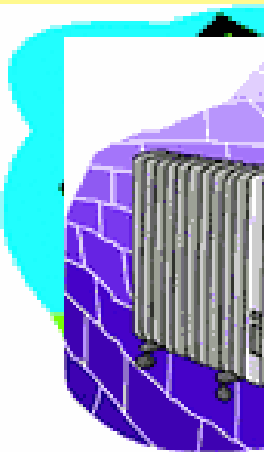
wgr@agh.edu.pl



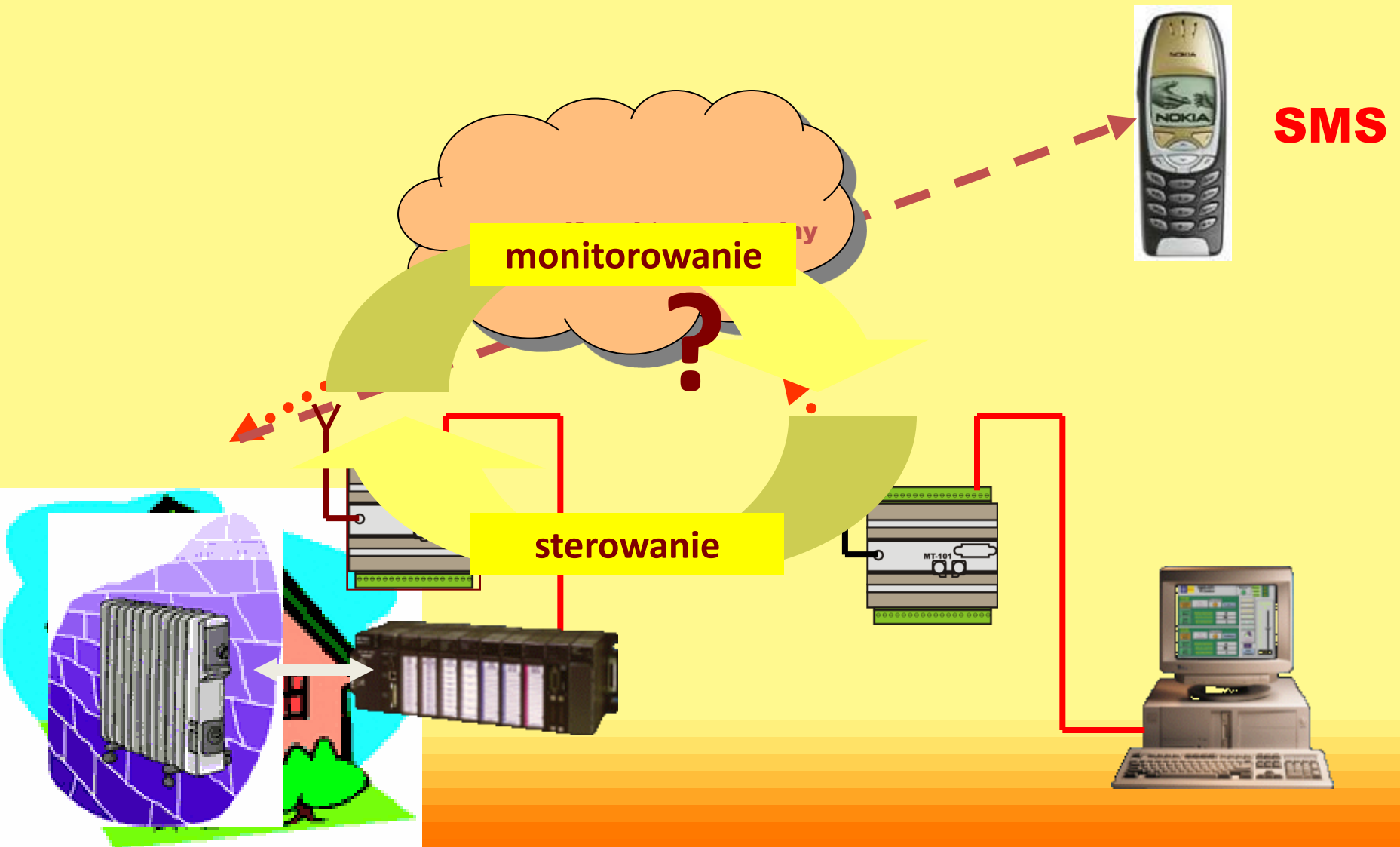
Problem monitorowania i zdalnego sterowania



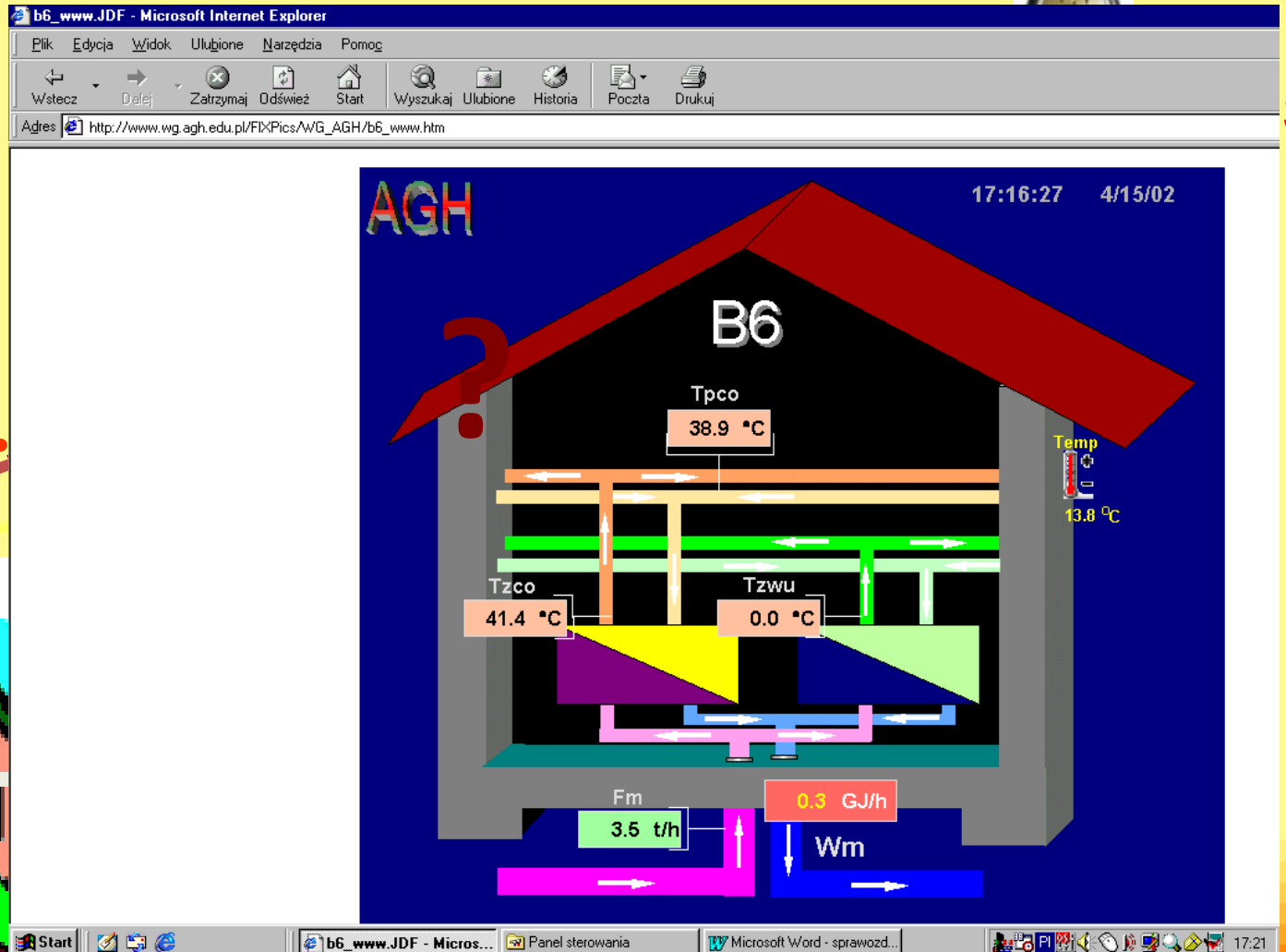
S



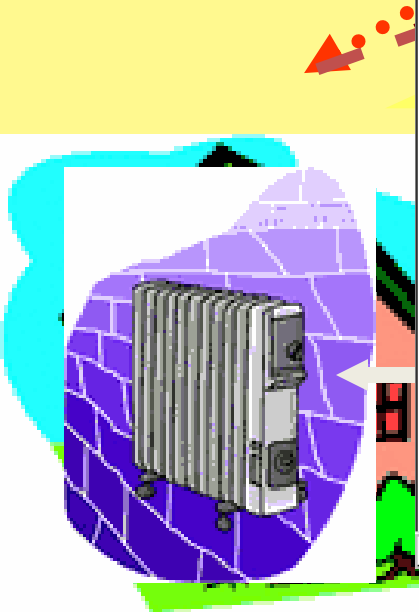
Problem monitorowania i zdalnego sterowania



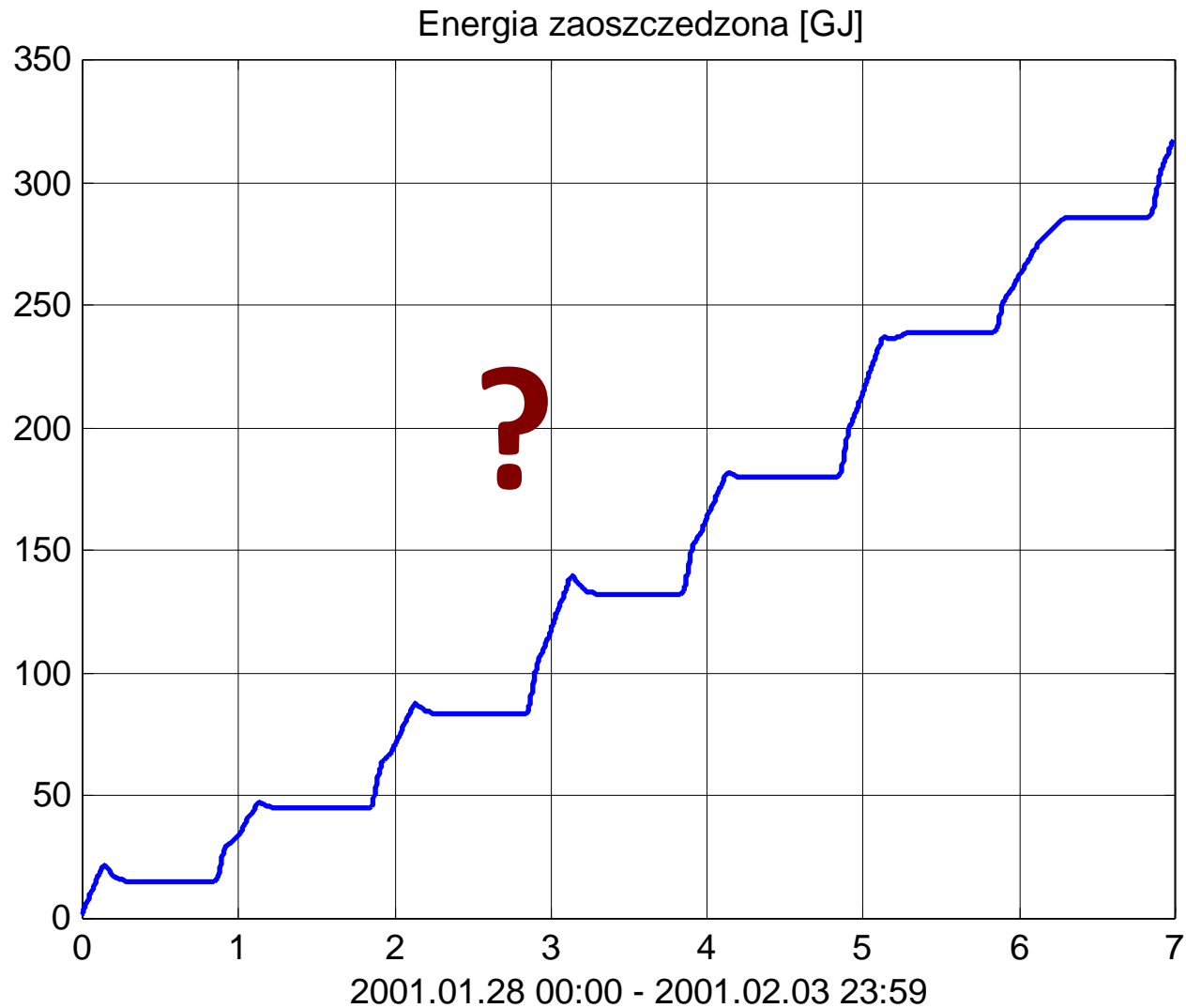
Problem monitorowania i zdalnego sterowania



S

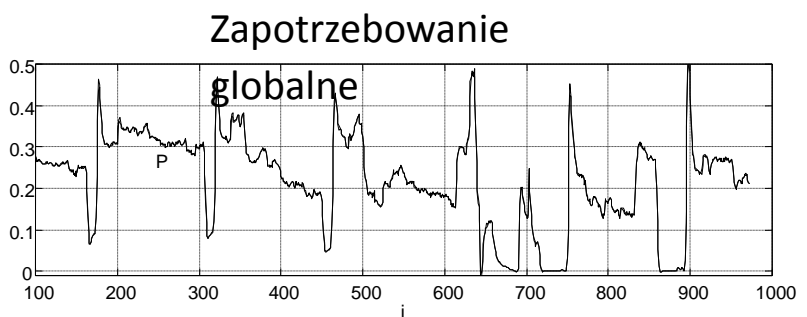
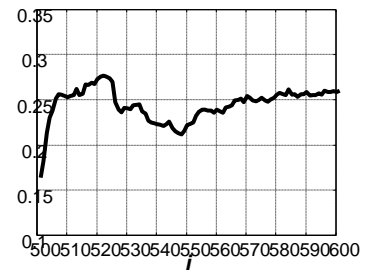
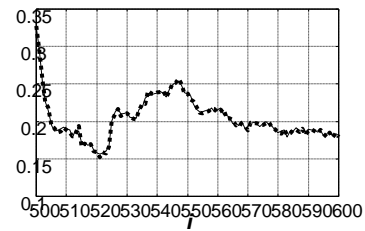
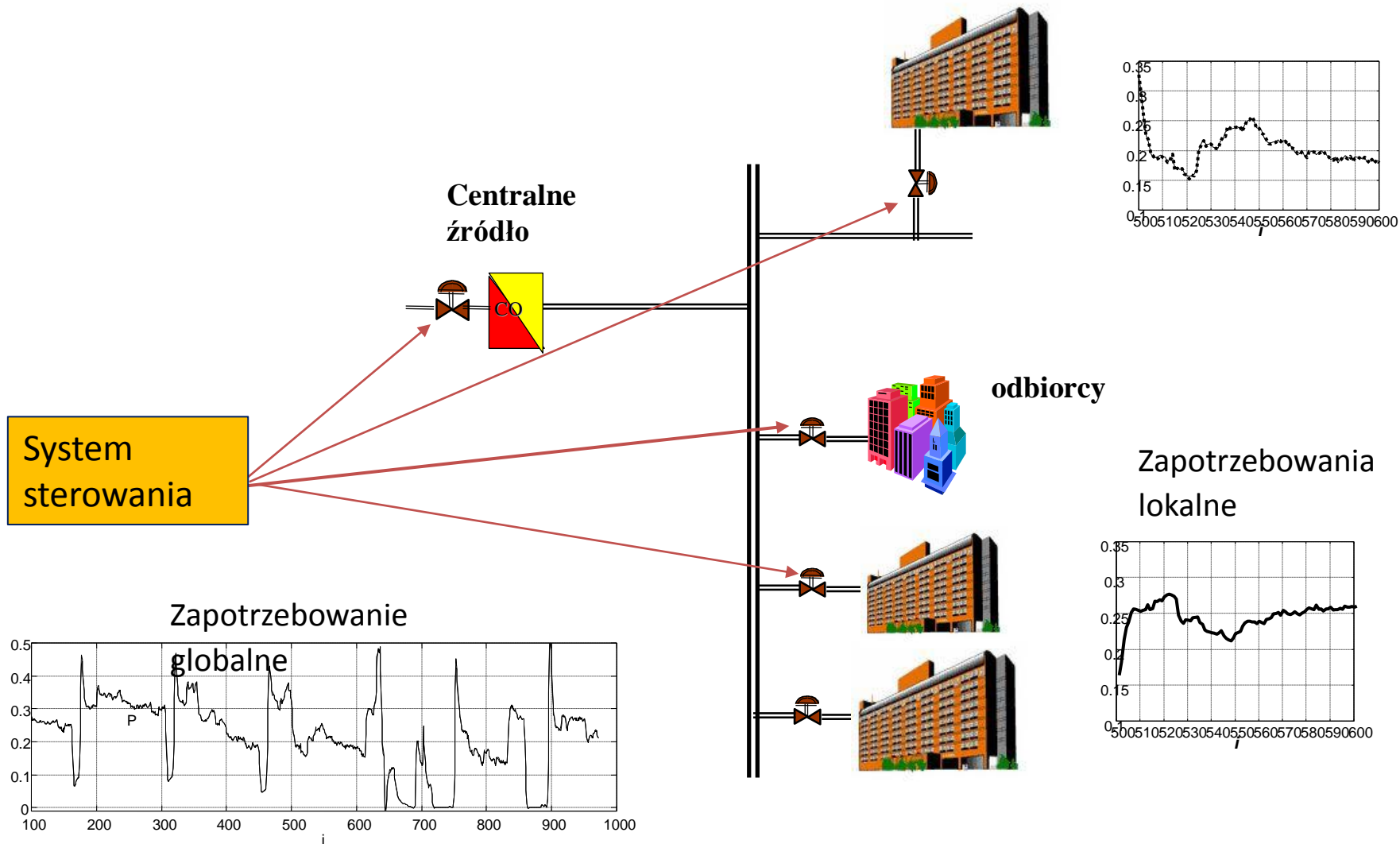


Problem monitorowania i zdalnego sterowania

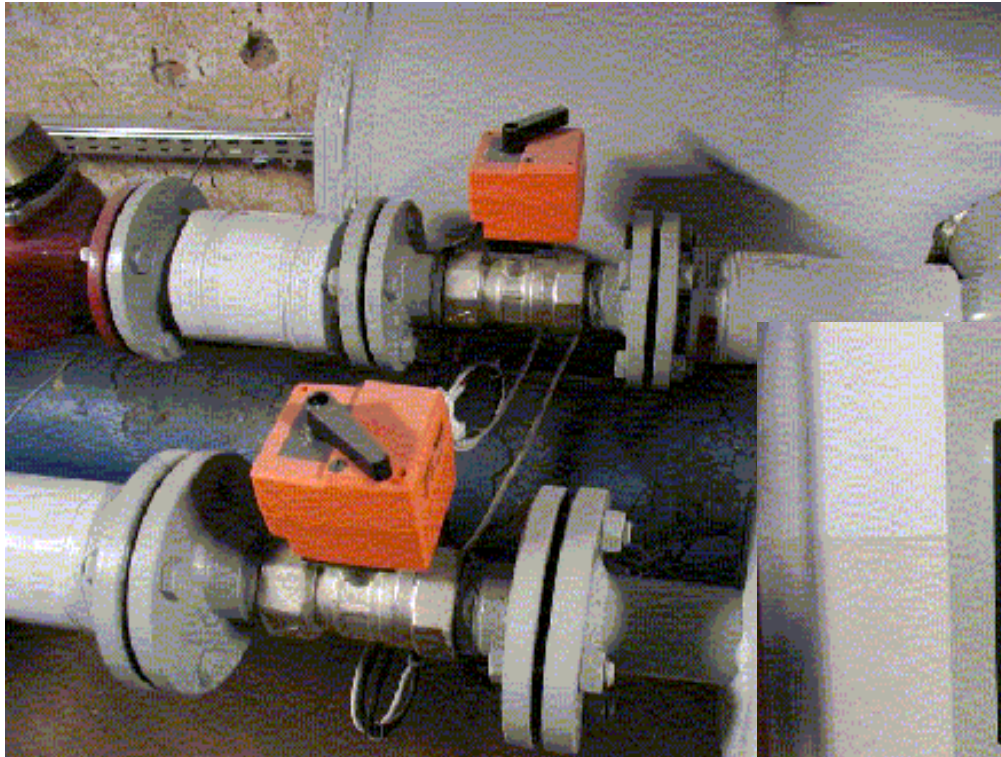


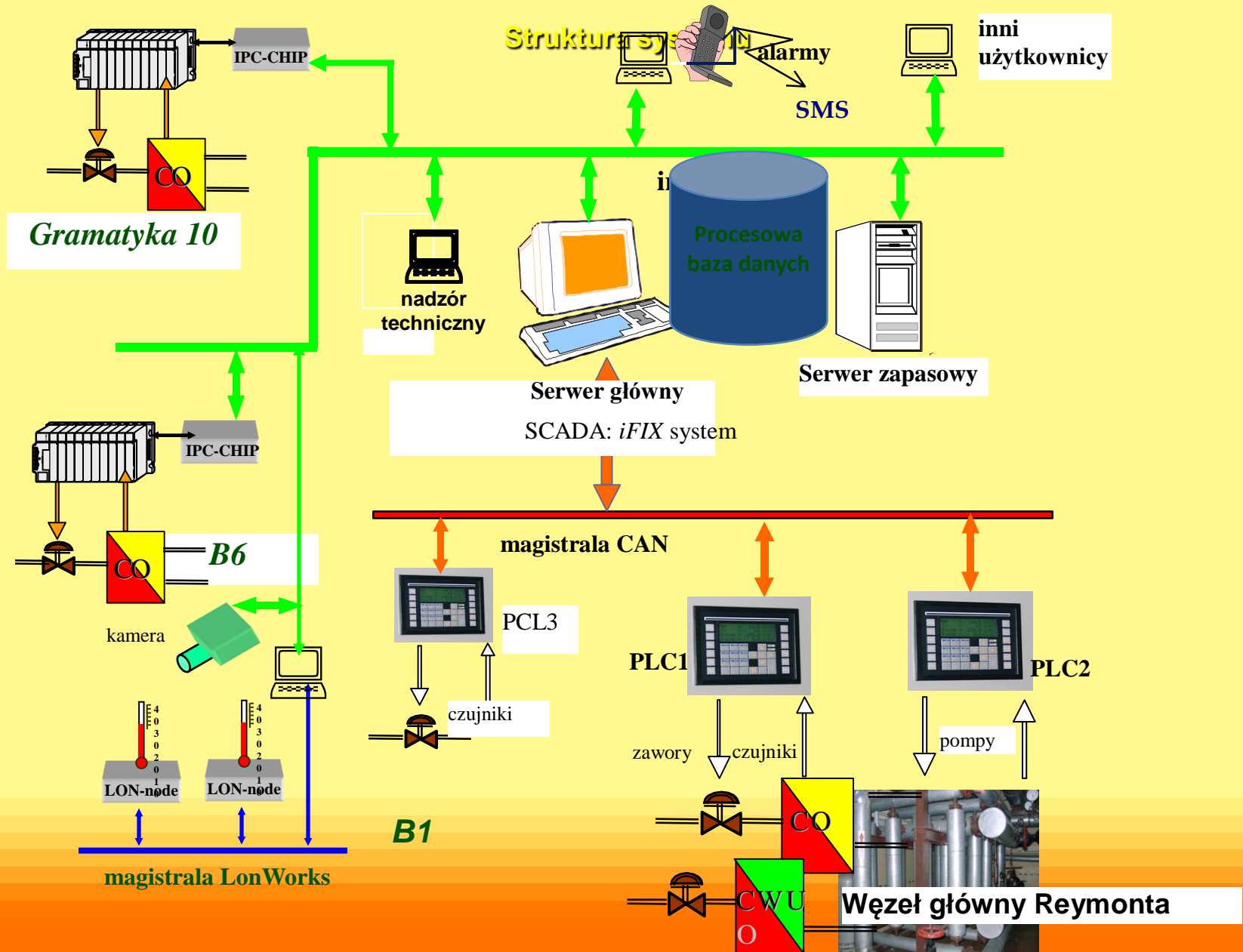
S

Przykład 1 sterowanie dystrybucją energii cieplnej



Sterowniki lokalne





Zastosowane technologie

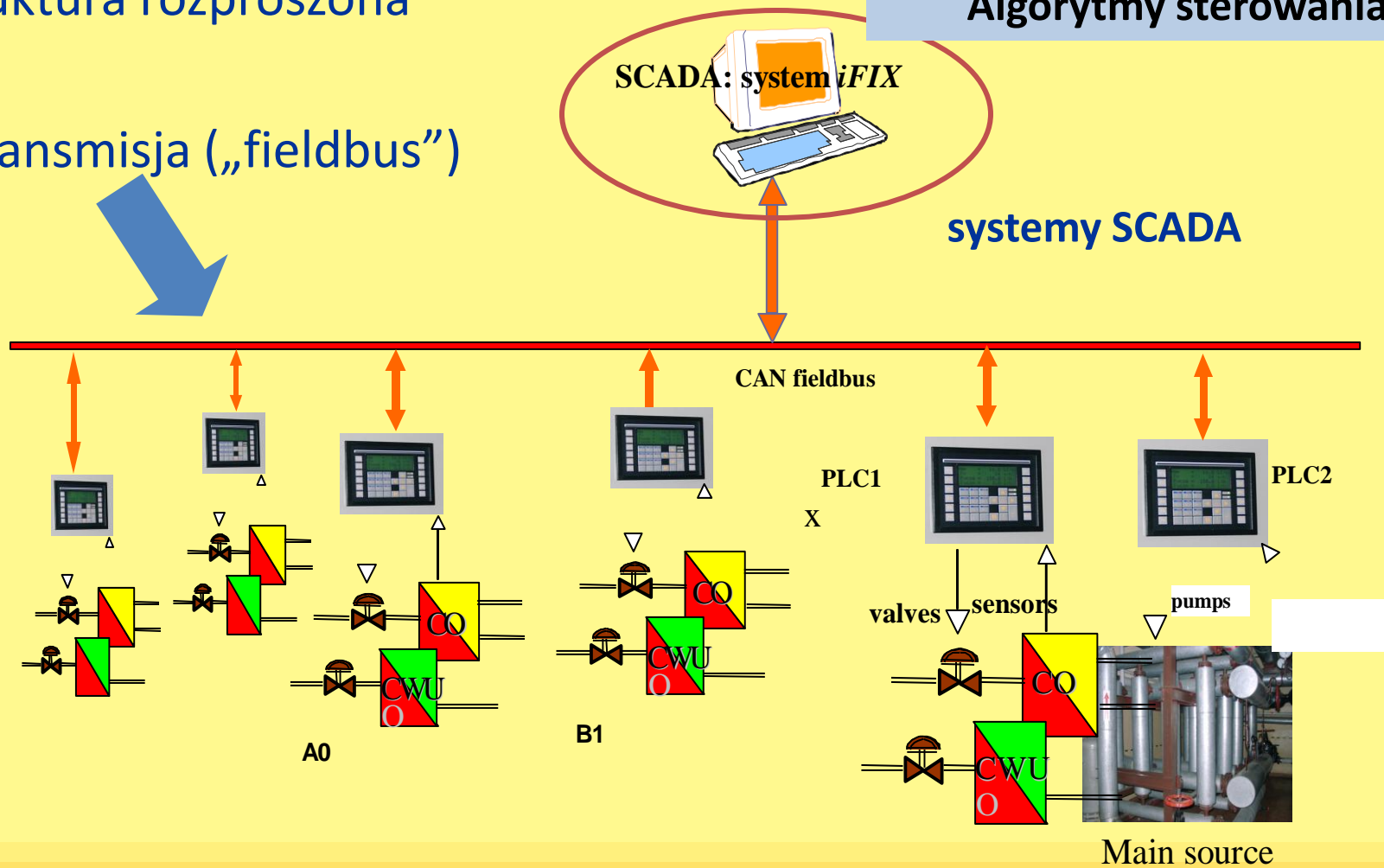
struktura rozproszona

teletransmisja („fieldbus”)

Algorytmy sterowania

SCADA: system *iFIX*

systemy SCADA



Optymalizacja zużycia energii cieplnej (i nie tylko):

Nadrzędny układ sterowania powinien minimalizować różnicę pomiędzy zapotrzebowaniem na energię ciepłą, a jej dostawą

Rezerwy proste:

- regulacja nadążna za zmianami temperatury
- obniżenia nocne i sezonowe (c.o.,c.w.)

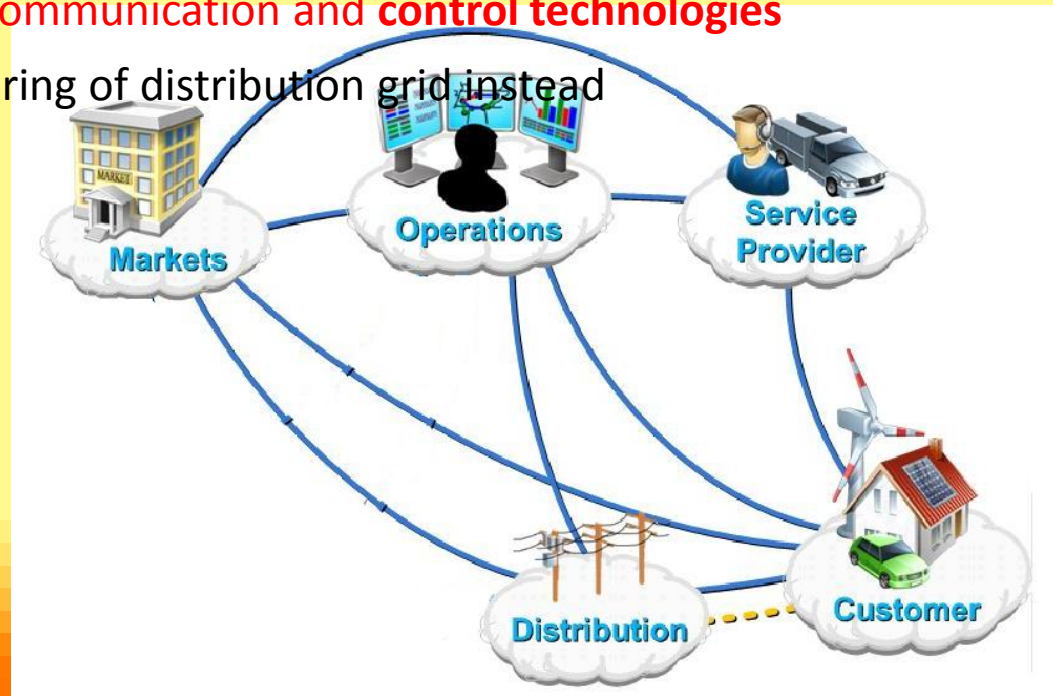
Rezerwy złożone:

- określenie optymalnego wykresu regulacyjnego dla kompleksu ogrzewanych budynków (uwzględnienie indywidualnych cech obiektu, wpływu warunków atmosferycznych),
- predykcja zapotrzebowania na energię (określenie optymalnych obniżeń i podwyższeń z uwzględnieniem warunków atmosferycznych i temperatury wody grzewczej)
- Ale także: *diagnostyka*

Inne przykłady:

Active Distribution Network

- Distribution grid becomes active with the presence of **Distributed Energy Resources (DER)**
- **Distributed generation** is an approach that employs small-scale technologies to produce electricity close to the end users of power
- Bidirectional power flow
- ADN **requires modern/smart communication and control technologies**
- Active supervision and monitoring of distribution grid instead



Inne przykłady:

Smart Grids

Electric power system that utilizes **information exchange and control technologies, distributed computing** and associated sensors and actuators, for purposes such as:

- to integrate the behaviour and actions of the network users and other stakeholders,
- to efficiently deliver sustainable, economic and secure electricity supplies.

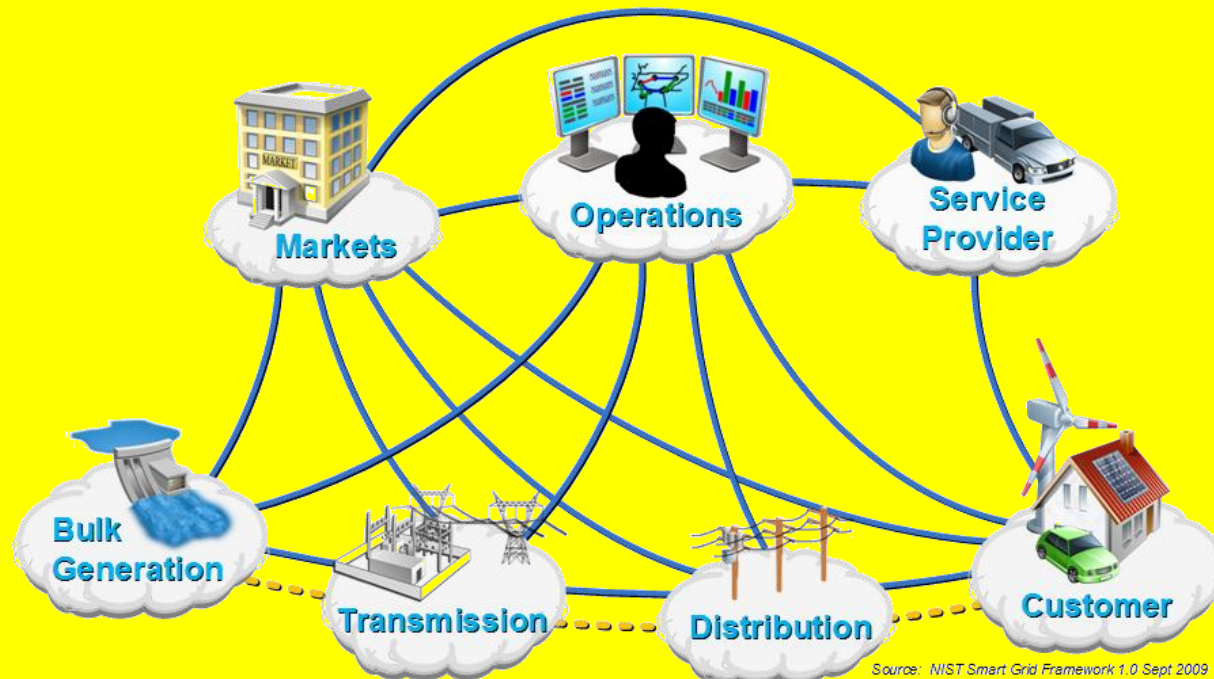
IEC Electropedia

Inne przykłady:

Smart Grids

Electric power system that utilizes **information exchange and control technologies**, **distributed computing** and associated sensors and actuators, for purposes such as:

- to integrate the behaviour and actions of the network users and other stakeholders,
- to effici

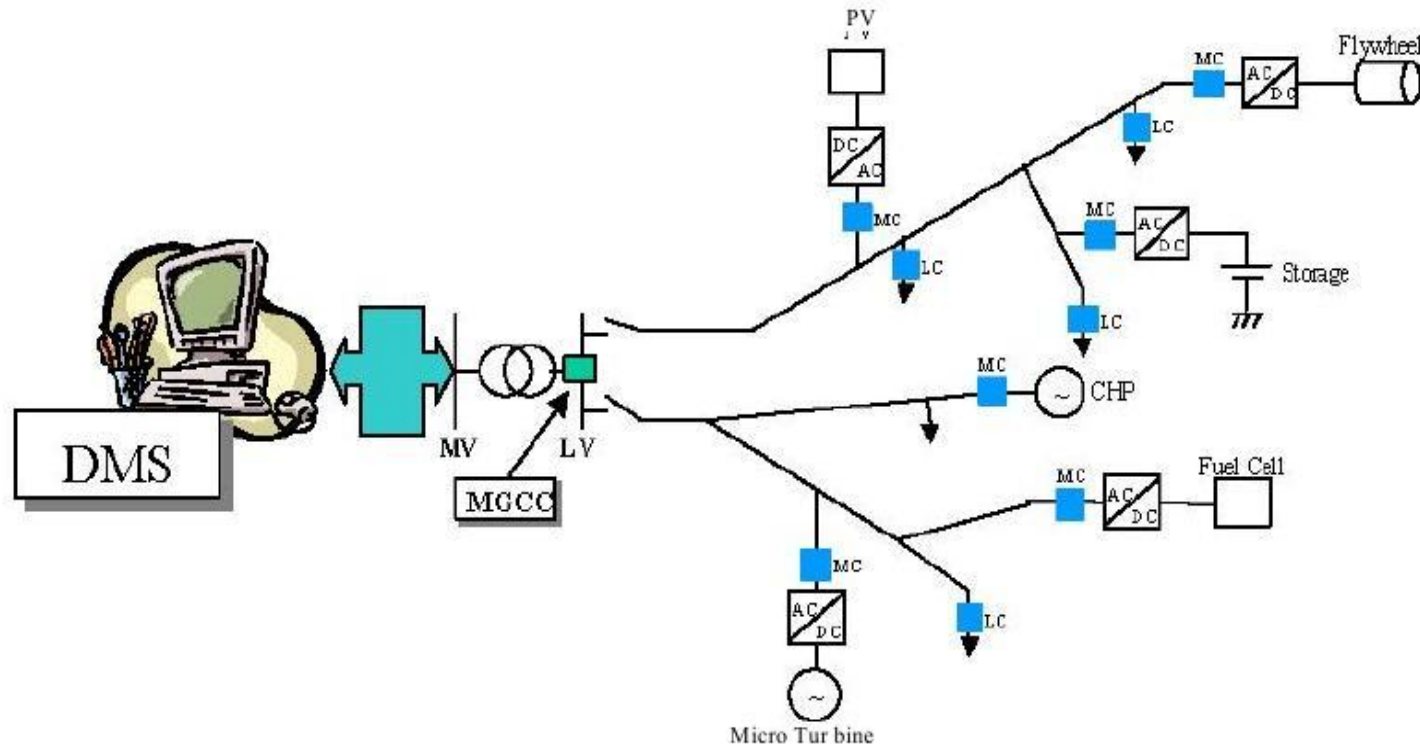


dia

Inne przykłady:

MicroGrid

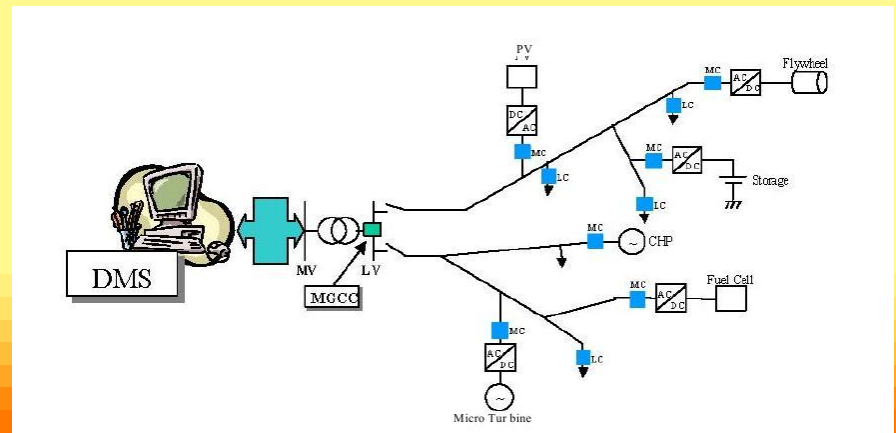
- **Microgrid** is a low-voltage distribution grid with DERs (Distributed Generation such as PV panels, wind turbines, fuel cells, combined heat and power etc. and energy storage) powering small societies or industrial sites.



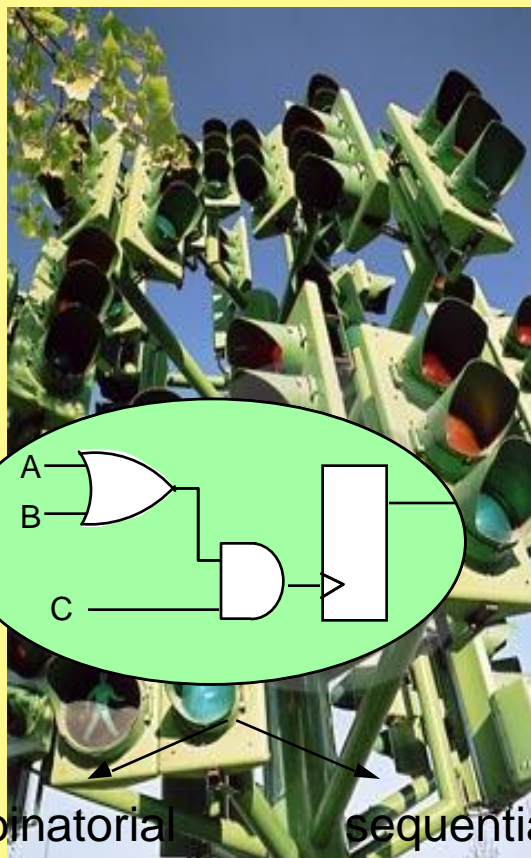
Inne przykłady:

MicroGrid

- From main grid perspective MG behaves as a controllable generator or load
- MG may work in a grid-connected or island mode
- MG electricity demand can be satisfied by its DERs
- MSs generate much smaller amount of energy in comparison to conventional power plants
- MS are located close to end-customers so power losses are smaller
- DERs need to be **controlled** and monitored in a wise manner as they introduce lots of dynamics to the grid which can reduce power quality

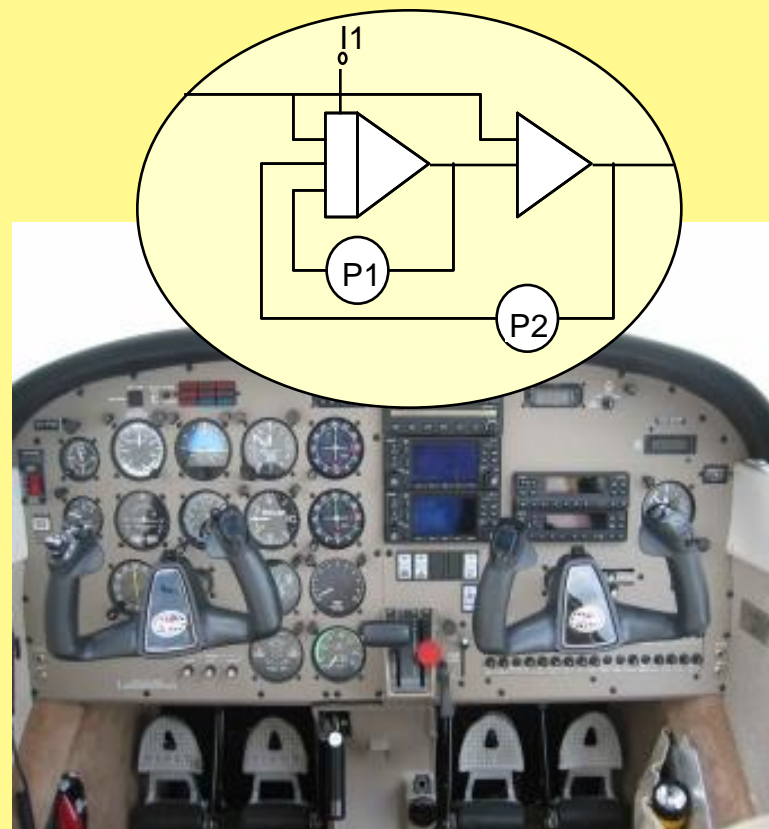
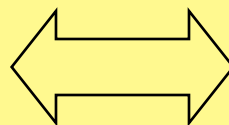


Sterowanie ciągłe, a binarne



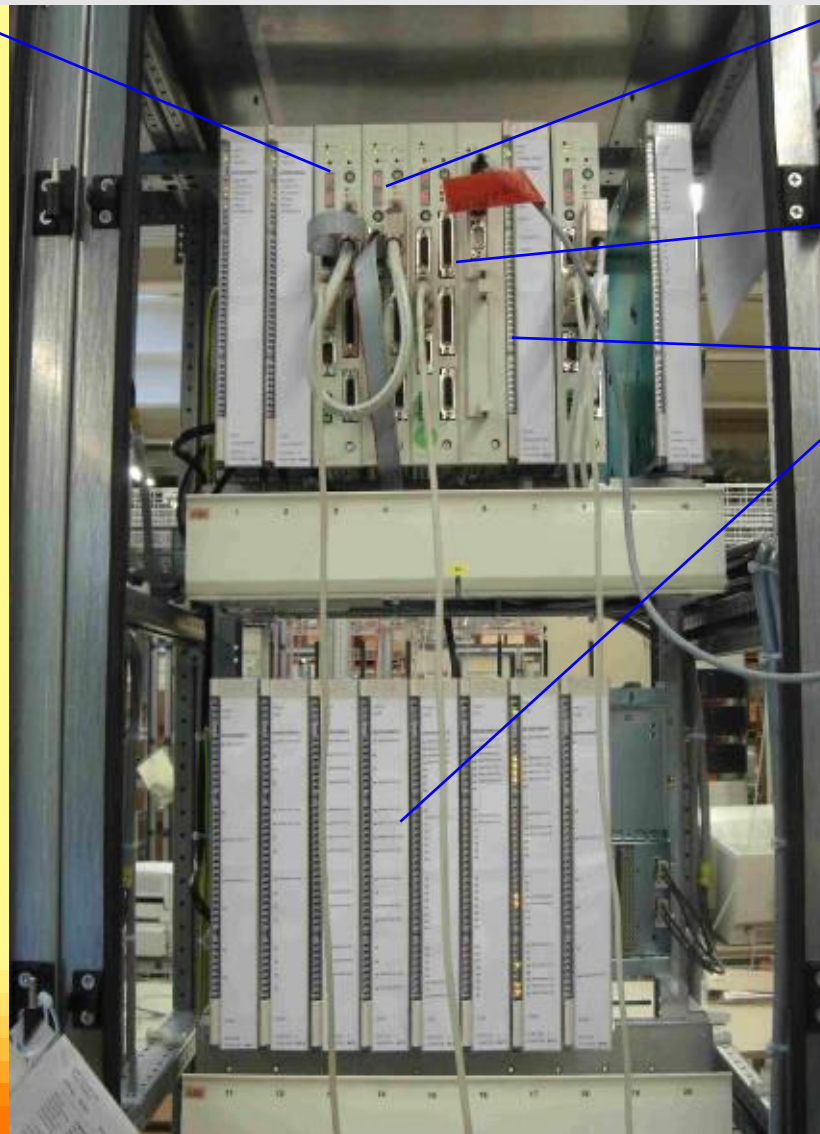
combinatorial sequential

binarne



analogowe

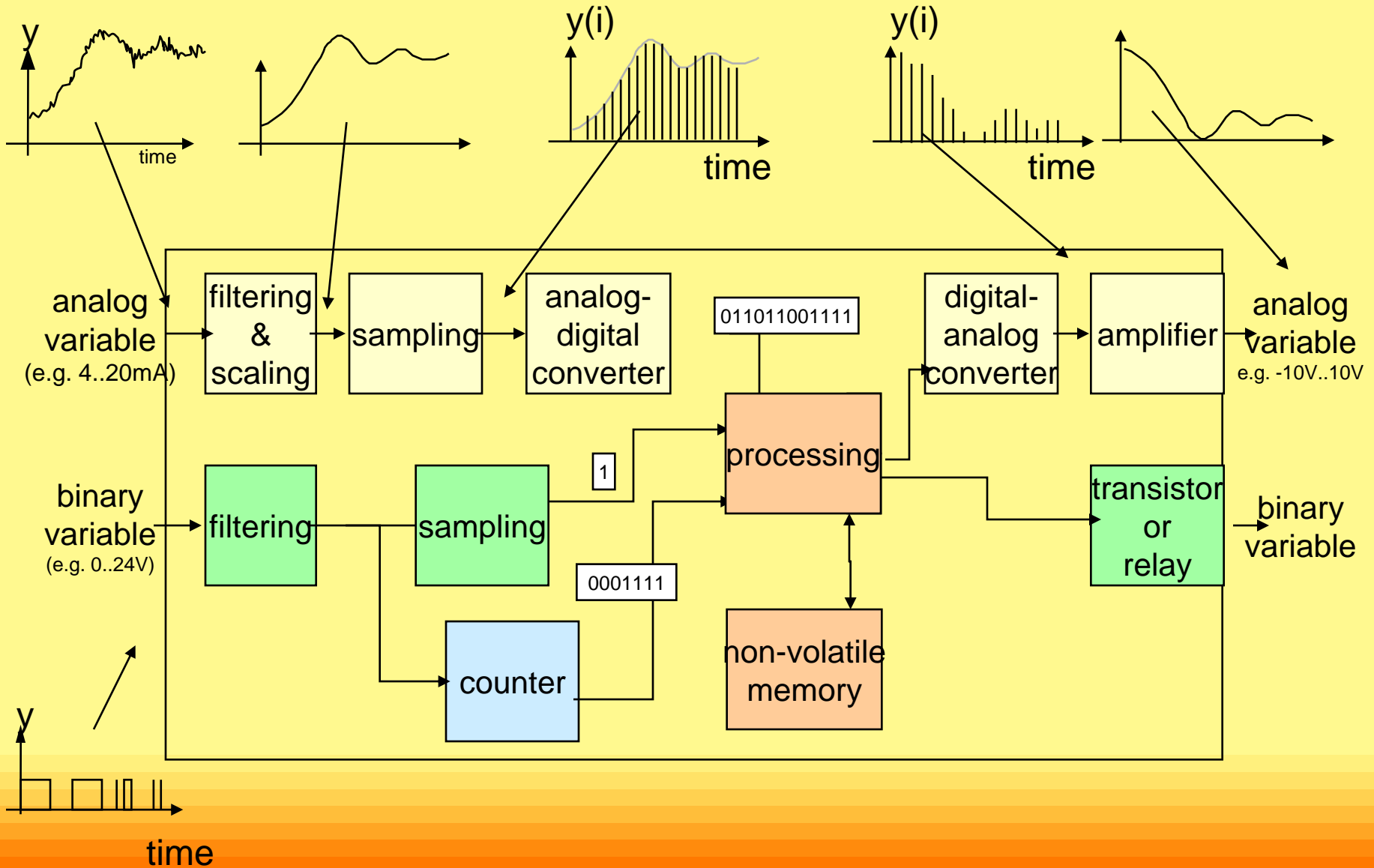
Sygnaly binarne, analogowe i cyfrowe współistnieją w komputerach sterujących



serial connections

inputs/outputs

Sygnaly w PLC



Sterowanie w oparciu o model

I. Model procesu

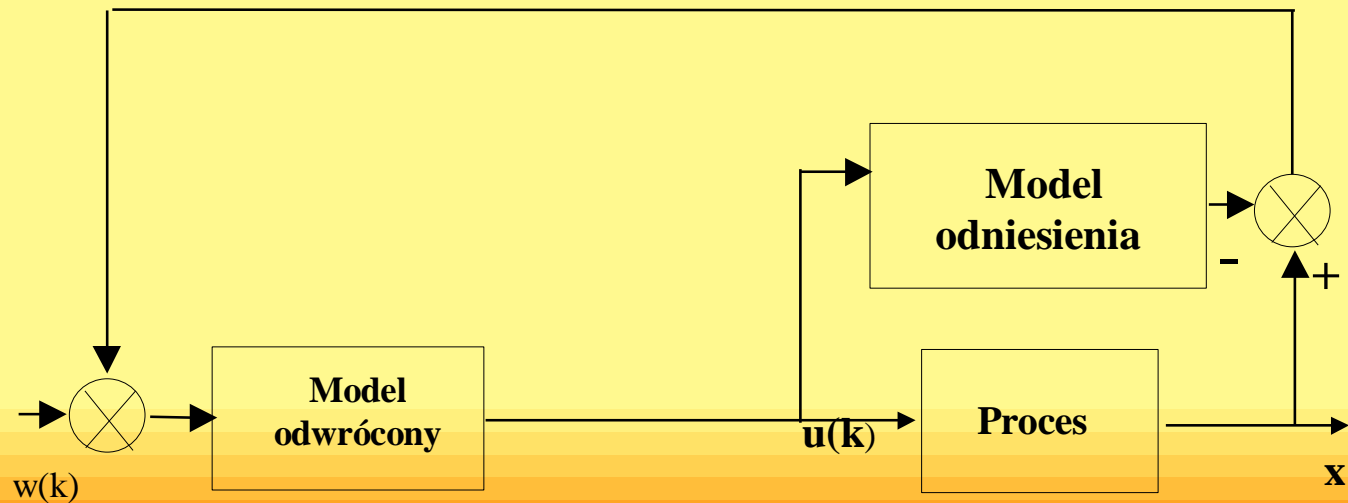
II. Model regulatora

Dwa podejścia:

model-based control v. knowledge based control

I Model stosowany *on-line*

II Model stosowany *off-line*



Model procesu

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ a_3 & a_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad - \text{linearized model of the tank system}$$

$$H^0 = [H_1^0, H_2^0]^T \quad - \text{equilibrium point}$$

$$H_1 = H_1^0 + h_1, \quad H_2 = H_2^0 + h_2, \quad q = q^0 + u,$$

$$b_1 = \frac{1}{S}, \quad a_1 = \frac{-C_1}{2S\sqrt{H_1^0}}, \quad a_3 = \frac{C_1}{2\beta(H_2^0) \cdot \sqrt{H_1^0}},$$

$$a_4 = \frac{-C_2}{2\beta(H_2^0) \cdot \sqrt{H_2^0}}, \quad \beta(H_2^0) = c \cdot w + \frac{H_2}{H_2^{\max}} b \cdot w,$$

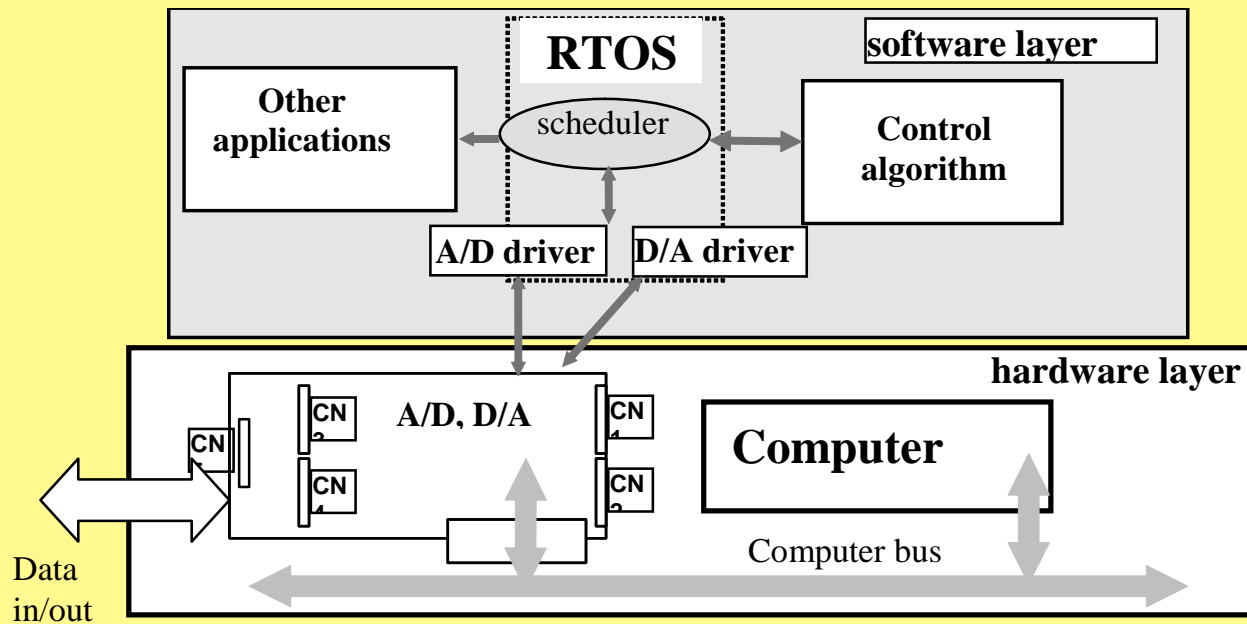
$$b, c, w, S, H_2^{\max} \quad - \text{geometrical parameters}$$

Discrete model

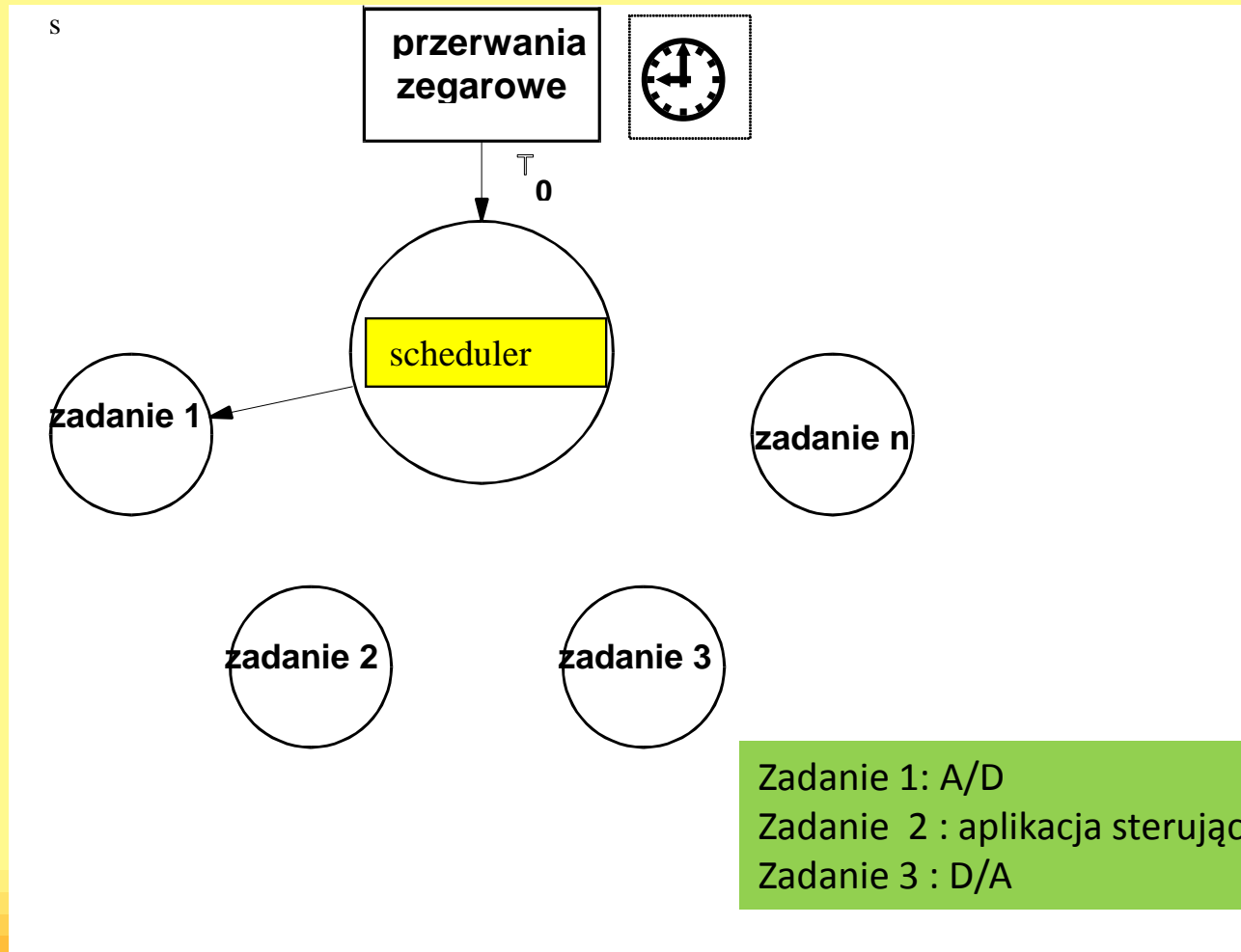
$$\begin{bmatrix} h_1(k+1) \\ h_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{a_1 T_0} & 0 \\ \frac{a_3}{a_1 - a_4} (e^{a_1 T_0} - e^{a_4 T_0}) & e^{a_4 T_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1(k) \\ h_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{b_1}{a_1} (e^{a_1 T_0} - 1) \\ \frac{b_1 a_3}{a_1 a_4} \left[\frac{a_1 (e^{a_1 T_0} - e^{a_4 T_0})}{a_1 - a_4} - (e^{a_1 T_0} - 1) \right] \end{bmatrix} u(k).$$

T_0 – sampling period

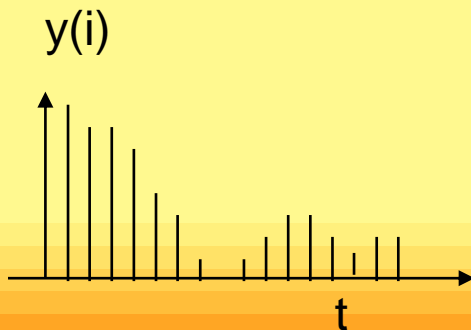
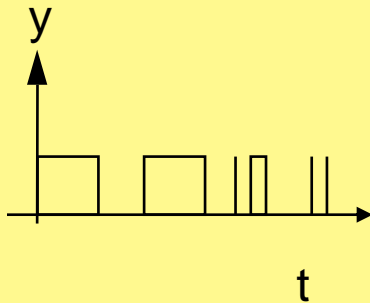
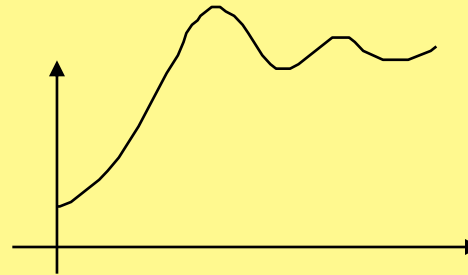
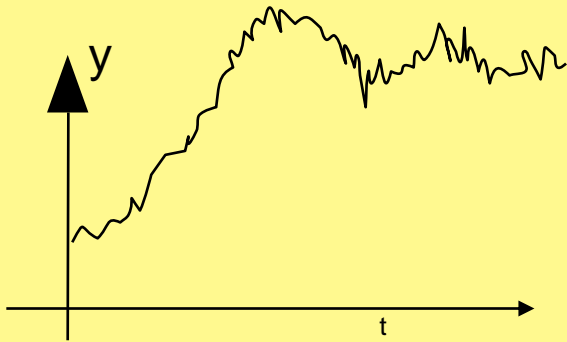
Ale jest też komputer..



Ale jest też komputer pracujący cyklicznie i obsługujący zadanie driverow



Występują różne typy sygnałów



$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right]$$

Aplikacja sterująca wymaga formuł z czasem dyskretnym, np.

$$u(k) = -a_1 y(k) - a_2 y(k-1) + \dots - a_n y(k-n) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2) + \dots + b_n u(k-n).$$

Najprostsze podejście inżynierskie polegające na aproksymacji modelu ciągłego:

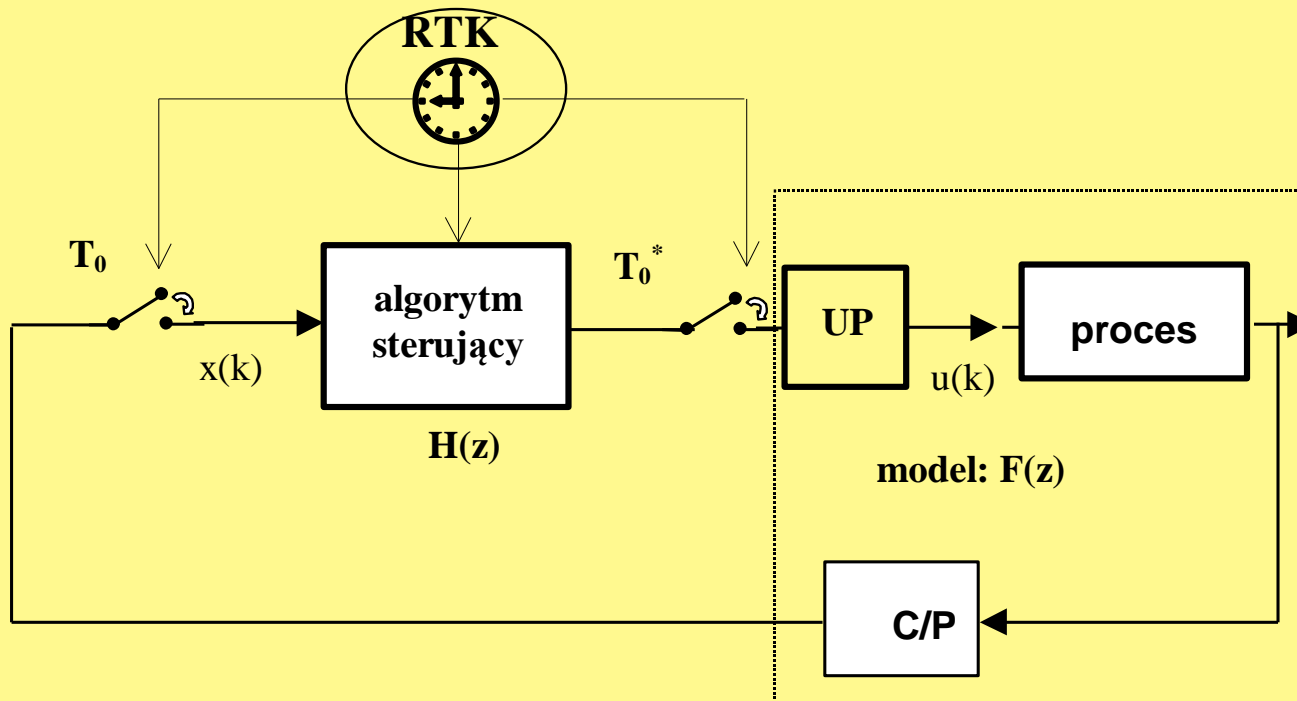
$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=kT_0} \approx \frac{x(kT_0) - x((k-1)T_0)}{T_0}$$

może prowadzić do rozwiązań dyskretnych niestabilnych lub nieprzyczynowych :

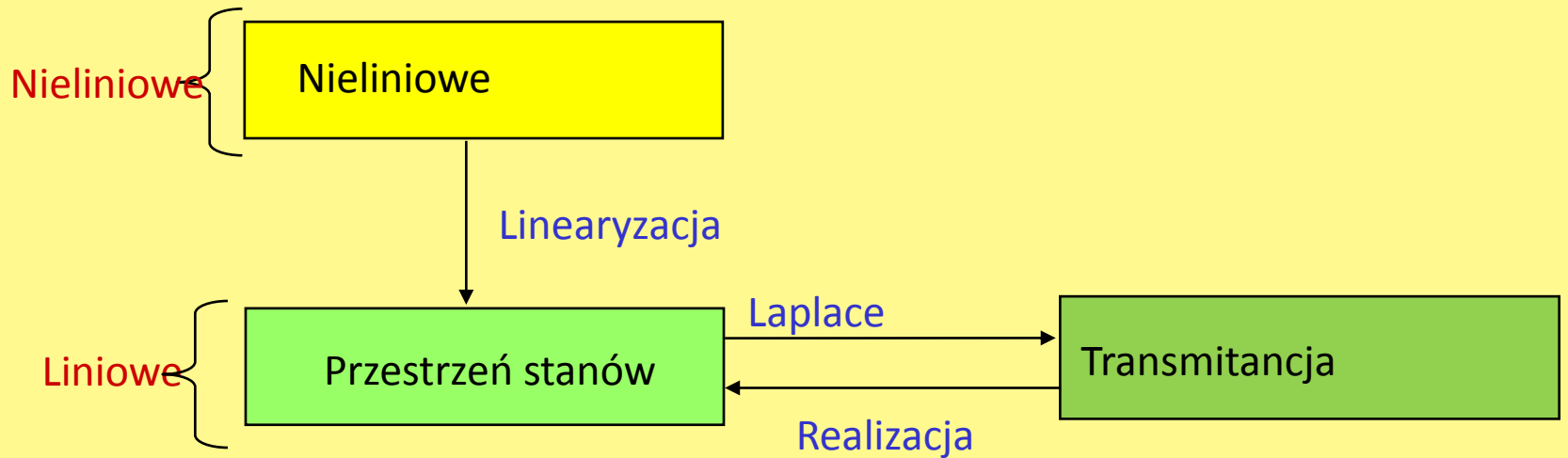
$$u(k) = -a_1 y(k+1) - a_2 y(k) + b_1 u(k-1) + b_2 u(k-2).$$

Modele z czasem dyskretnym (cyfrowe) umożliwiają uwzględnienie przy projektowaniu wszystkich efektów przekształcania sygnału w torze głównym lub/i sprzężenia zwrotnego

Dyskretne modele liniowe



Podstawowe modele systemów dynamicznych



Szukamy odpowiedników z czasem dyskretnym

Przestrzeń stanu

Powiązanie z transmitancją

Nakładając transformatę Laplace'a na równanie stanu
wyznaczamy zależność pomiędzy sygnałem
sterującym $U(s)$ oraz zmiennymi stanu $X(s)$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s)$$

$$\mathbf{X}(s) = (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}\mathbf{U}(s)$$

Na podstawie równania wyjścia

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u}$$

można ustalić zależność pomiędzy sygnałem

wejściowym $U(s)$ oraz wyjściowym $Y(s)$, a stąd transmitancję obiektu

$$\mathbf{Y}(s) = \left[\mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \right] \mathbf{U}(s)$$

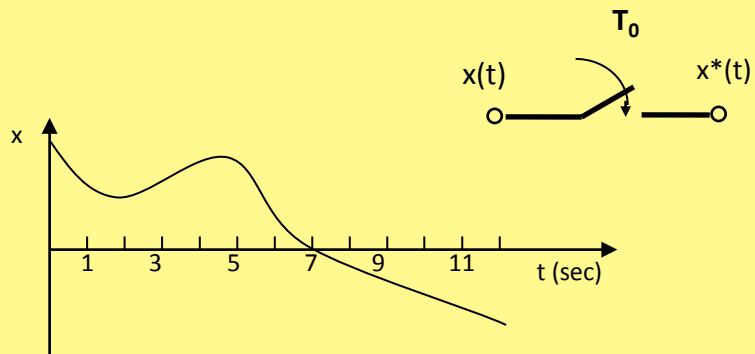
$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D}$$

Uwaga.

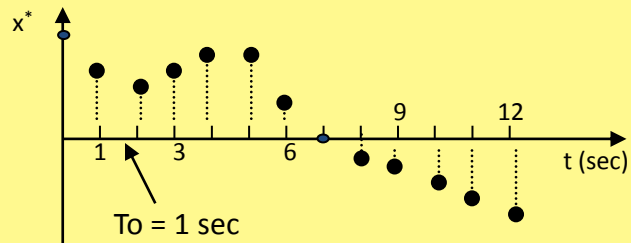
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ – macierze odpowiednio $n \times n$, $n \times m$, $p \times n$, $p \times m$; n -zmiennych stanu, m -wejść, p -wyjść

\mathbf{I} – macierz jednostkowa,

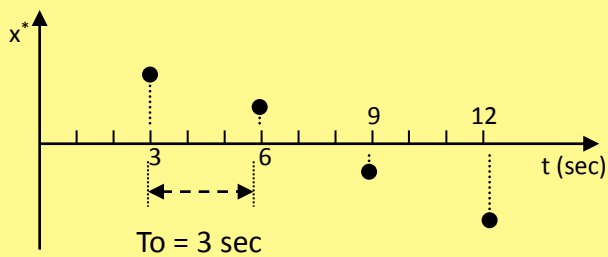
$\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}$ - wektory



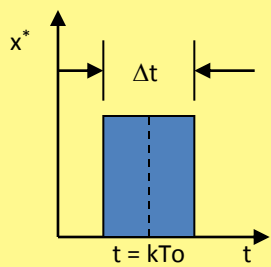
(a)



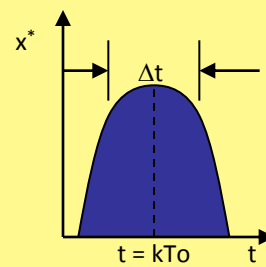
(b)



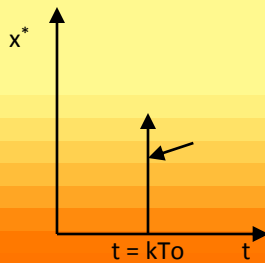
(c)



(a)

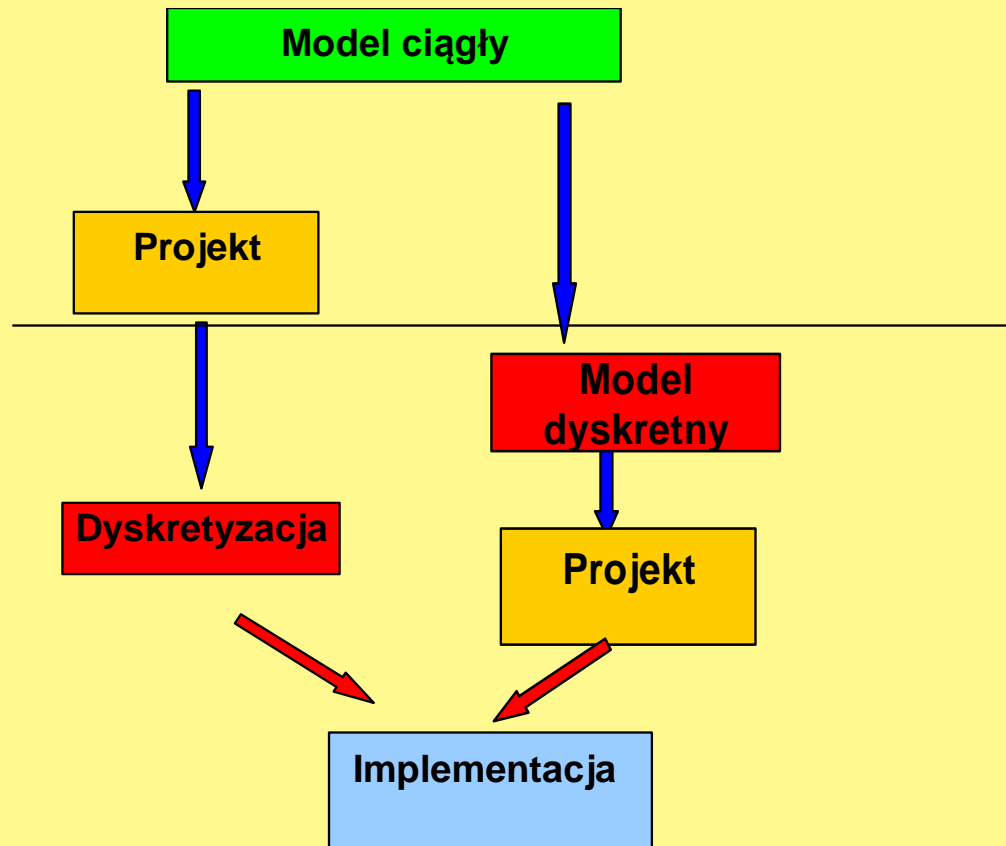


(b)



(c)

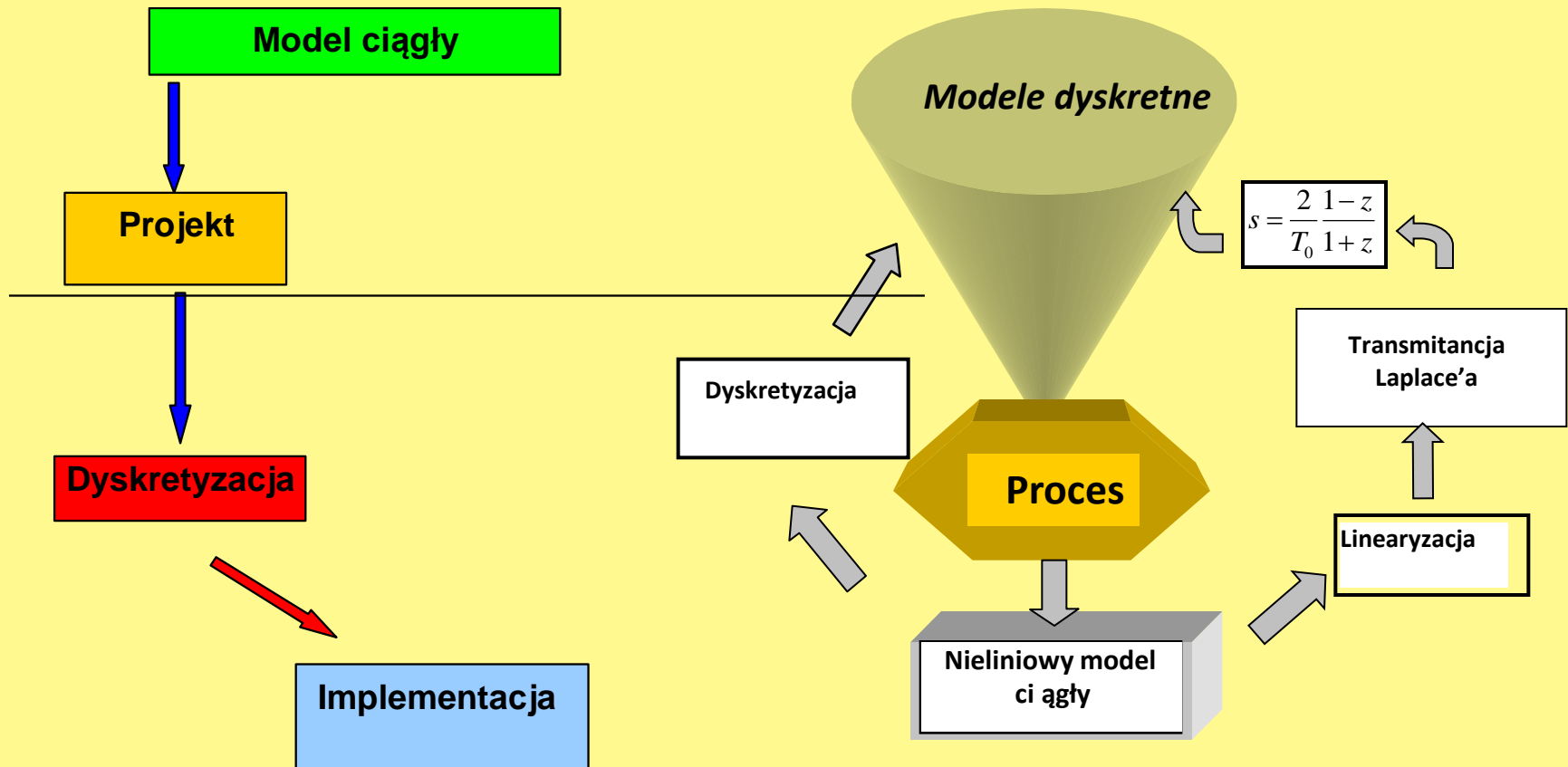
Metody projektowania układów sterowania cyfrowego



Dwa podejścia do projektowania cyfrowych układów sterowania

Dyskretyzacja układów ciągłych

Znaleźć najlepszą aproksymację modelu ciągłego: podobne zachowanie tak w dziedzinie czasu jaki częstotliwości



Metody dyskretyzacji równań różniczkowo-całkowych: aproxymacja pochodnych

$$x(\Delta): \quad \frac{dx}{d\Delta} \approx \frac{x((k+1)\Delta) - x(k\Delta)}{\Delta}$$

Aproxymacja pochodnej „w przód” (Eulera)

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x((k+1)T_0) - x(kT_0)}{T_0}$$

$$z = e^{T_0 s}$$

Po zastosowaniu operatora „z” otrzymujemy:

$$Z \left\{ \frac{x((k+1)T_0) - x(kT_0)}{T_0} \right\} = \frac{z-1}{T_0} X(z) \approx L \left\{ \frac{dx}{dt} \right\}$$

$$z \approx T_0 s + 1$$

$$\delta = \frac{z-1}{T_0}$$

Aproxymacja pochodnej "wstecz" daje

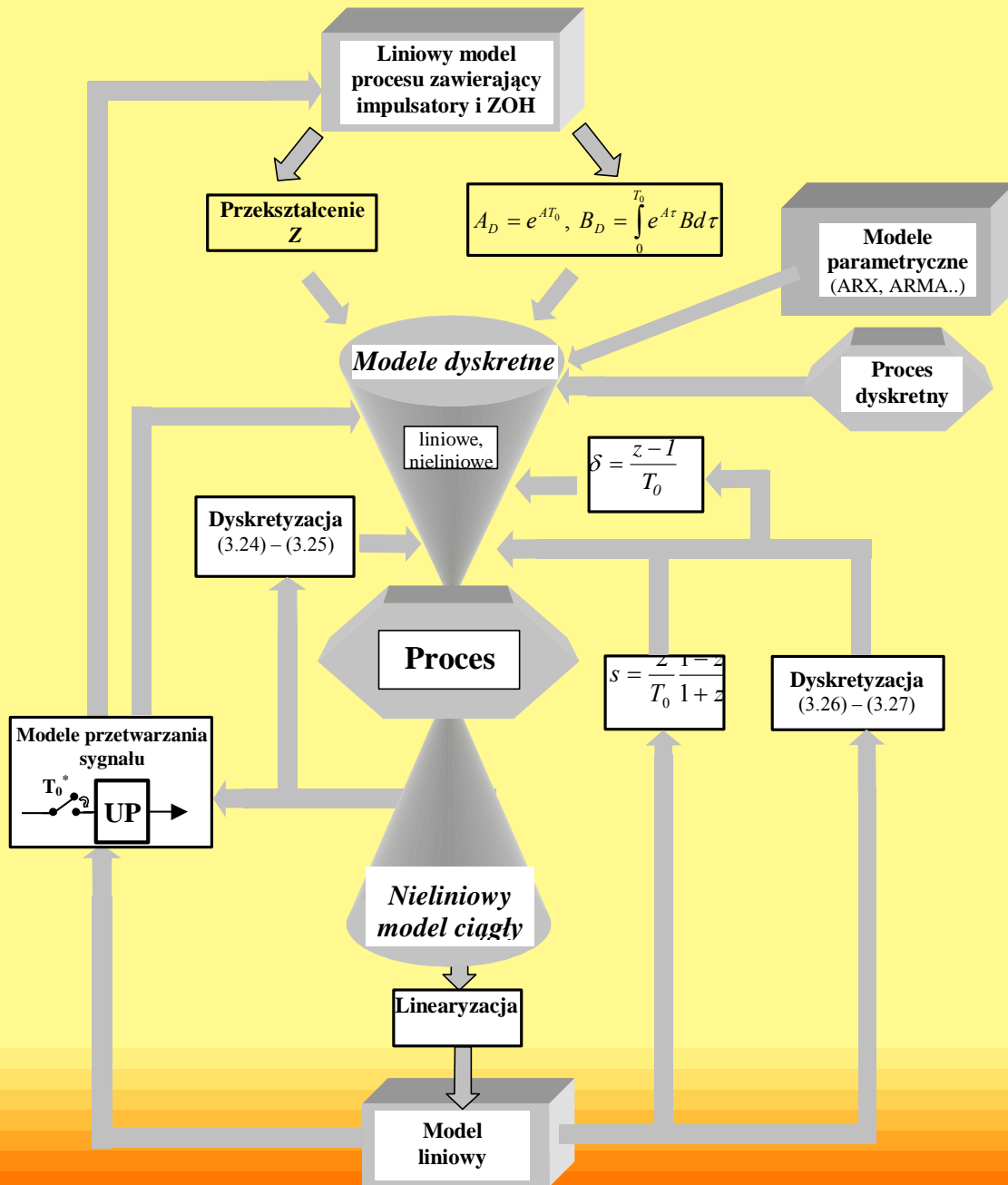
$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(kT_0) - x((k-1)T_0)}{T_0}$$

$$z = e^{T_0 s}$$

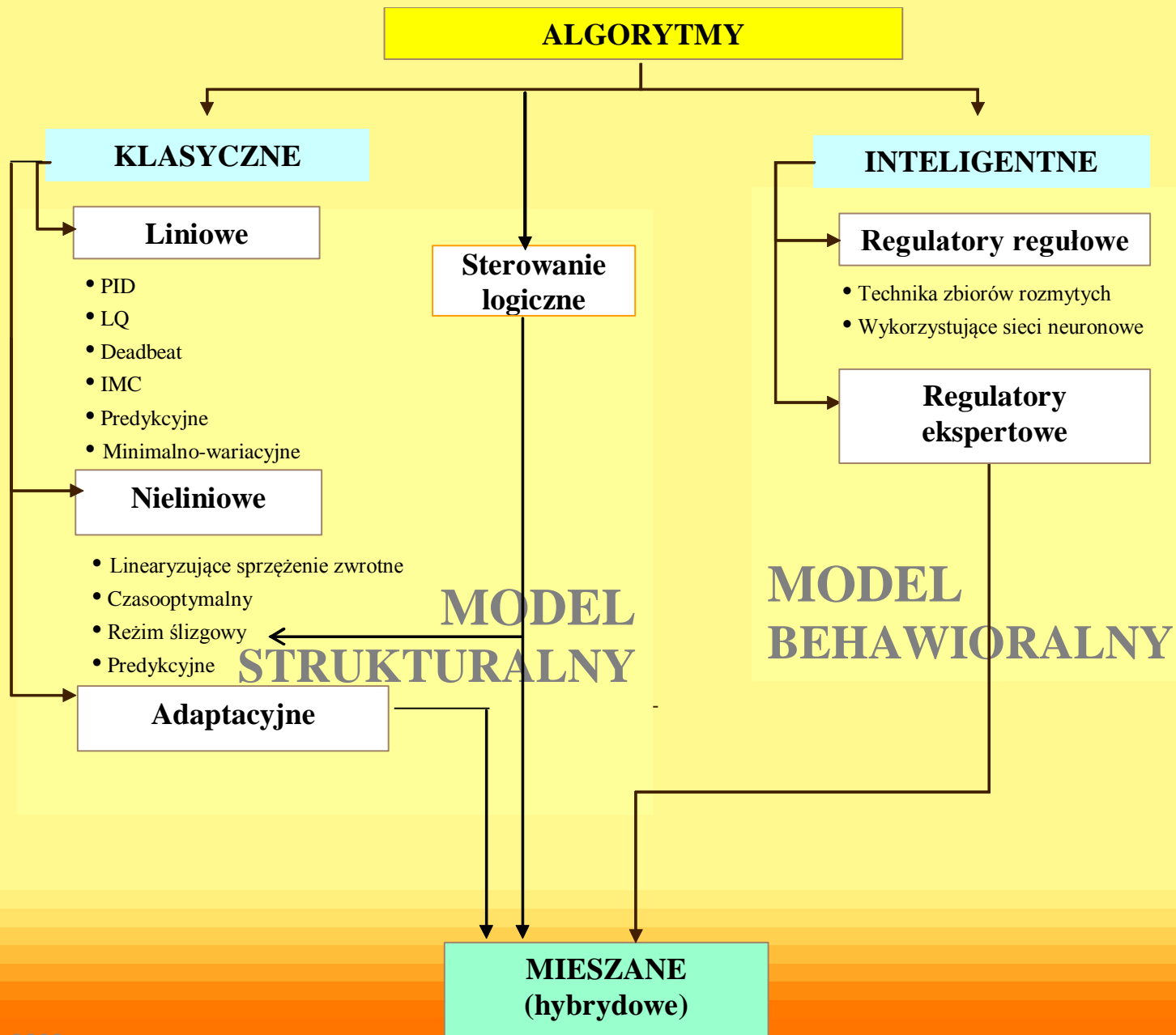
$$T_0 = \Delta$$

$$Z \left\{ \frac{x(kT_0) - x((k-1)T_0)}{T_0} \right\} = \frac{1-z^{-1}}{T_0} X(z) \approx L \left\{ \frac{dx}{dt} \right\}$$

$$z \approx \frac{1}{1-T_0 s}$$

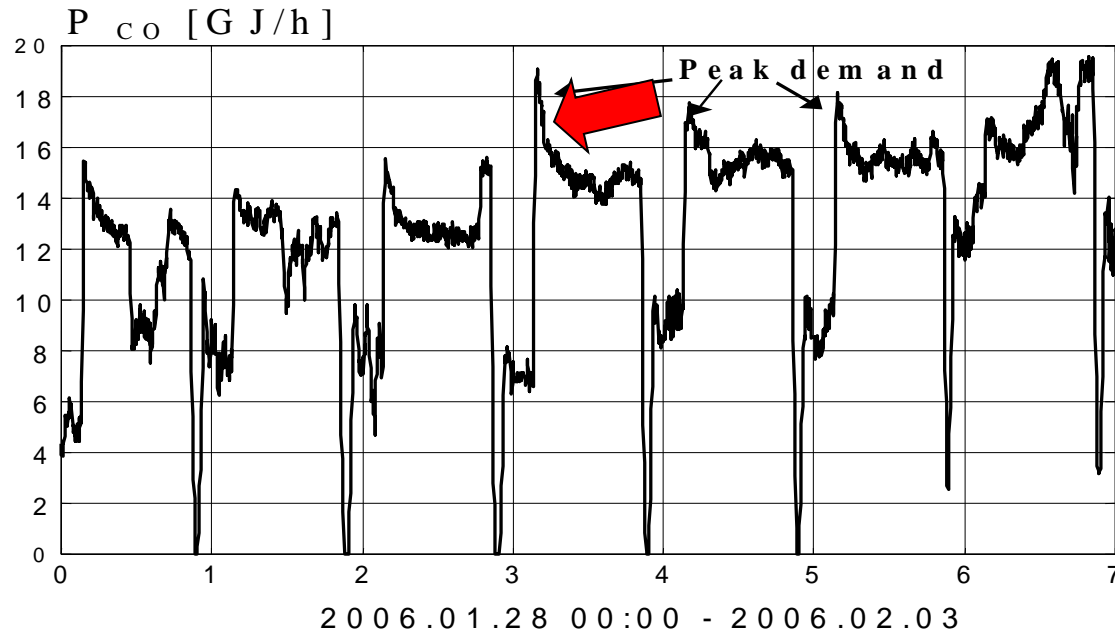


**Emulacja:
aproxymacja
numeryczna**



**Case study 1: INTEGRATED CONTROL OF CENTRALIZED
AND LOCAL HEAT SOURCES WITH PEAK DEMAND
COMPENSATION**

. An important problem of this strategy consists in keeping peak demand of energy below the maximum power of the central energy source. This demand can be supported by HERS, especially biomass boilers and accumulation tanks considered in this paper.



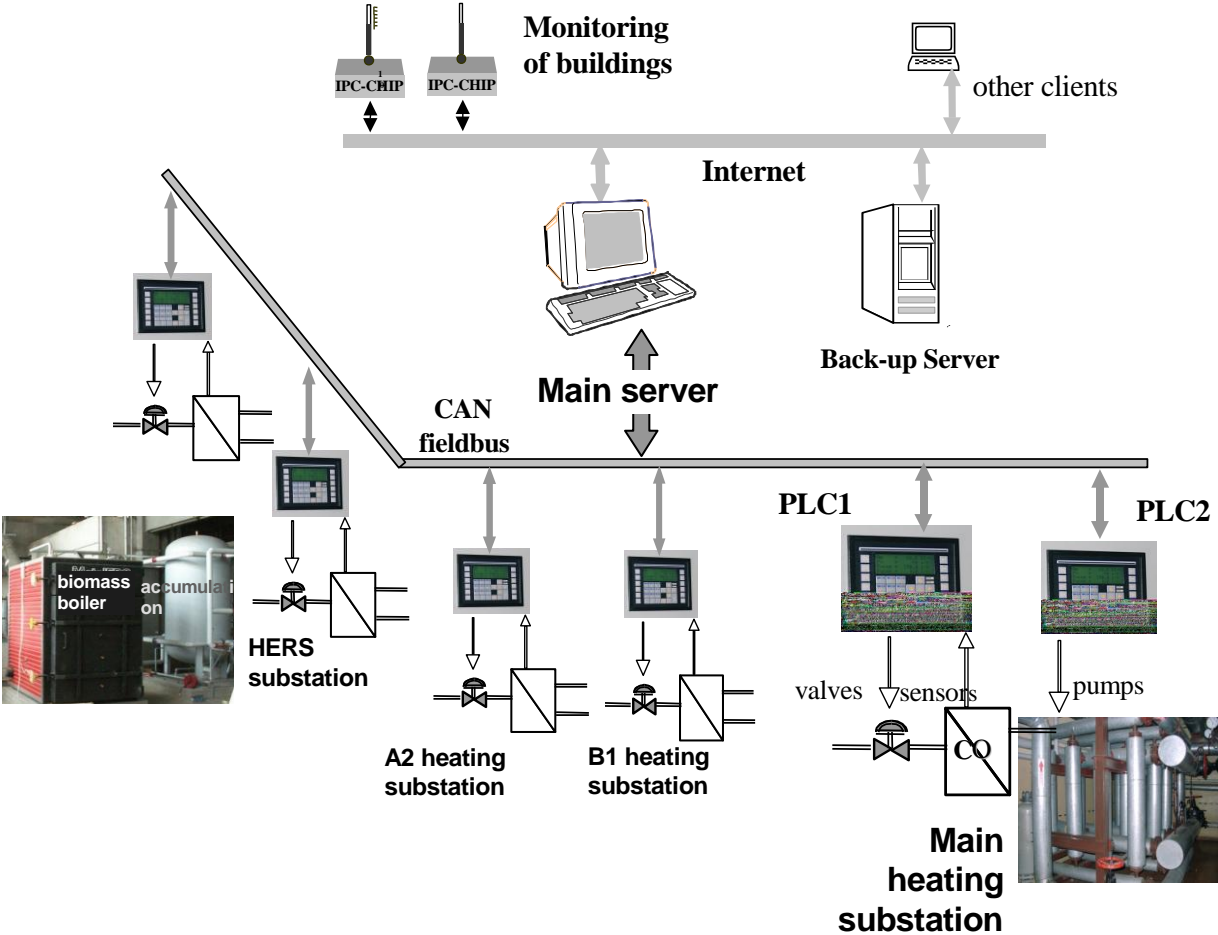
Power consumption in buildings, AGH campus example

Motivations: local heating systems

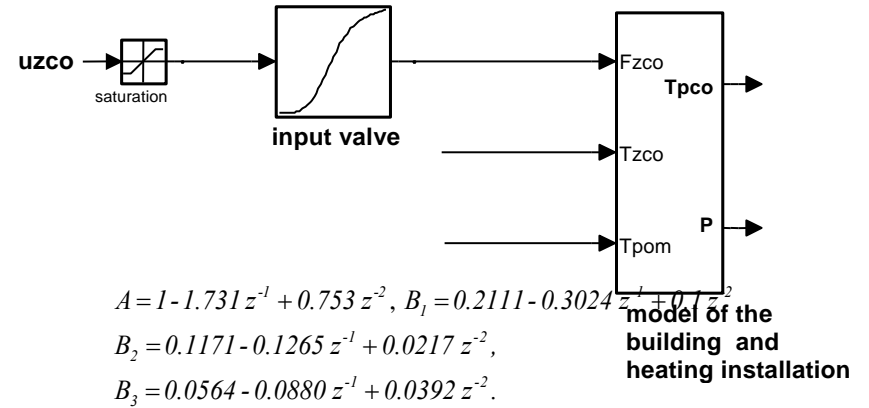
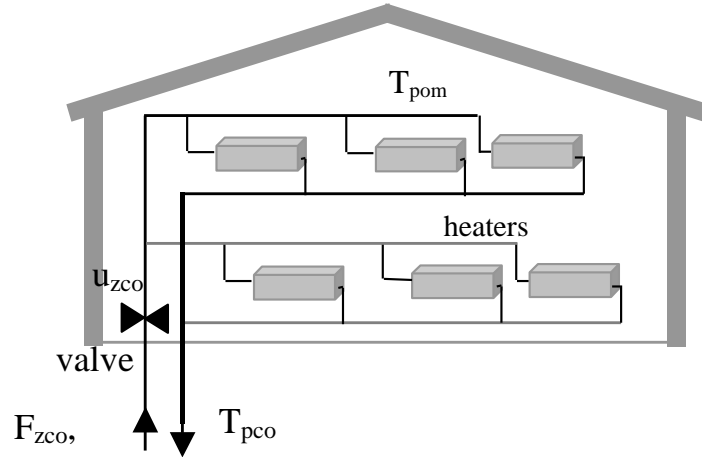
The biomass, for the reason of its nature, as a fuel, must be combusted in nominal power of the boiler, which guarantee the highest efficiency of the energy conversion and the smallest emission of the pollution. However, the maximum heat production seldom corresponds to the demand, since there is a necessity of installation and devices cooperate with heat accumulators, temperature control system or even cooler exchange.



Campus heating system and control system



Modelling of demand: model of the building



The linear part of the building model is described by a standard ARMAX model

$$T_{pco}(i) = \frac{B_1}{A} z^{-k_1} F_{zco}(i) + \frac{B_2}{A} z^{-k_2} T_{zco}(i) + \frac{B_3}{A} z^{-k_3} T_{pom}(i),$$

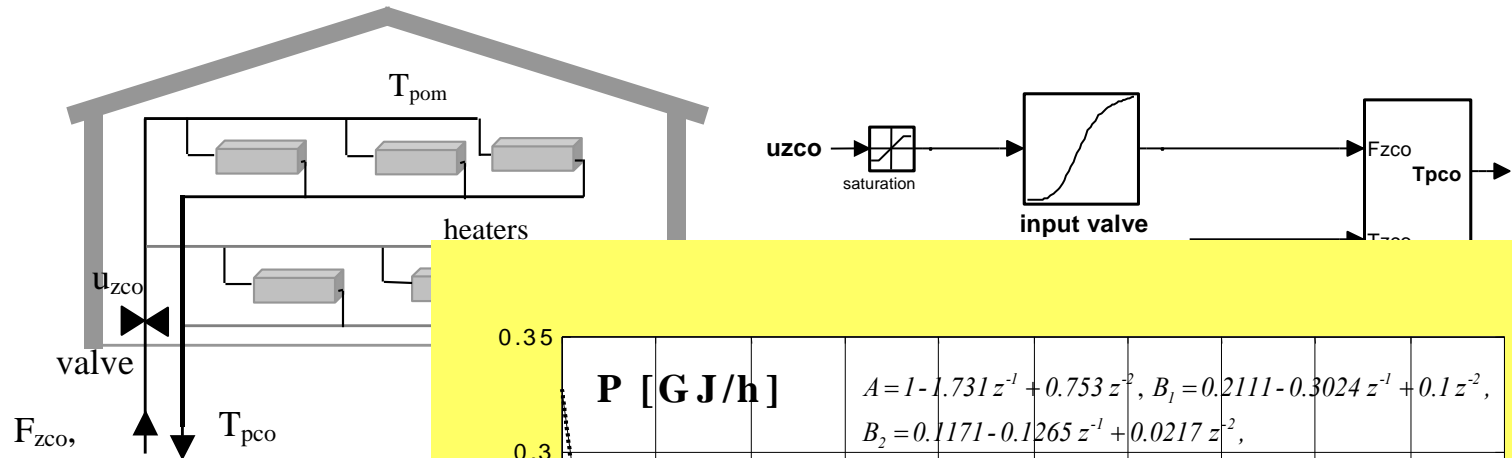
The nonlinear characteristic of the valve was modelled by the nonlinear function

$$F_{zco}(u) = \frac{A_1 - A_2}{1 + (u/u_0)^p} + A_2$$

Therefore, the power consumption of the building during i -step is modelled by

$$P(i) = F_{zco}(i) c_w (T_{zco}(i) - T_{pco}(i))$$

Modelling of demand: model of the building



The linear part of the building

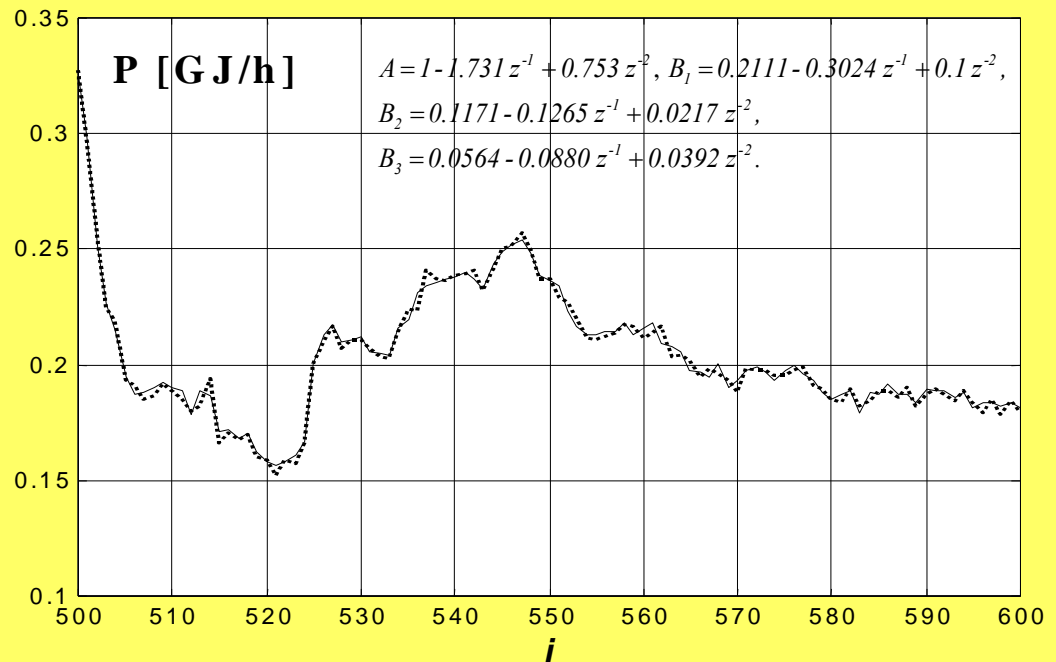
$$T_{pco}(i) = \frac{B_1}{A} z^{-k_1} F_{zco}(i) + \frac{B_2}{A} z^{-k_2} F_{zco}(i)$$

The nonlinear characteristic of

$$F_{zco}(u) = \frac{A_1 - A_2}{1 + (u/u_0)^p} + A_2$$

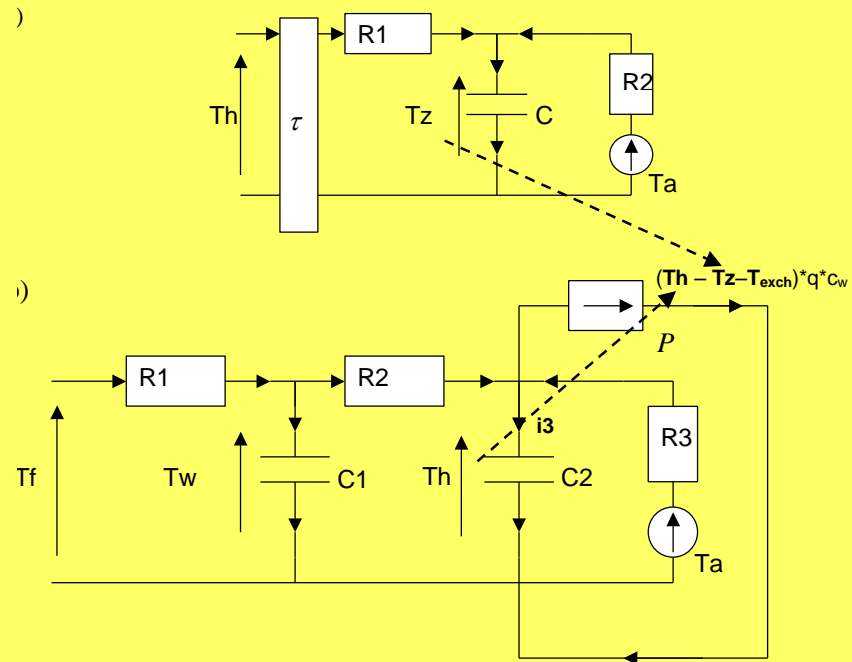
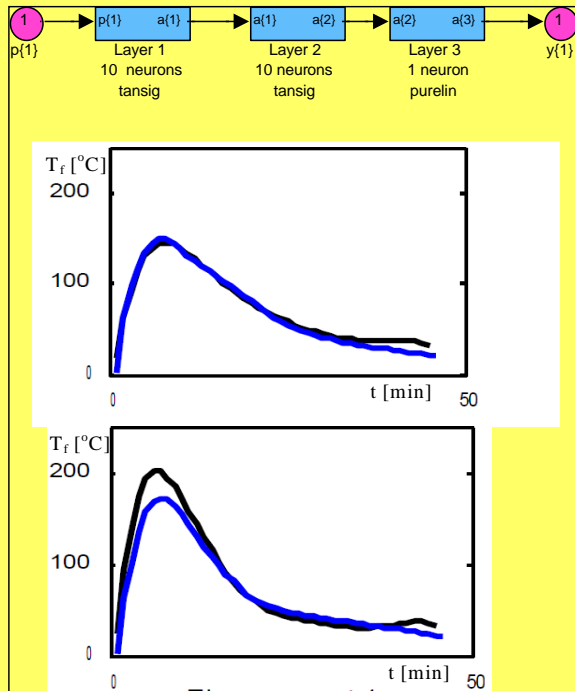
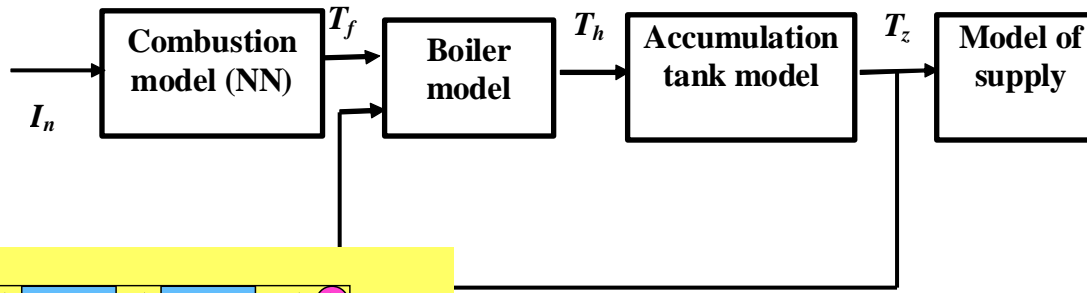
Therefore, the power consumption

$$P(i) = F_{zco}(i) c_w (T_{zco}(i) - T_{pco}(i))$$

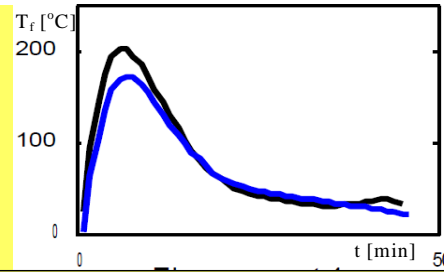
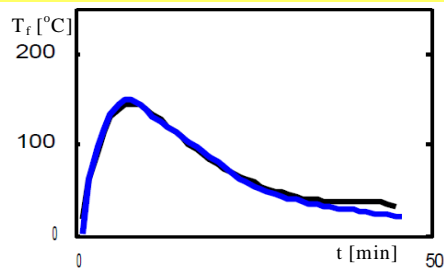
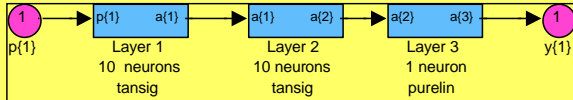
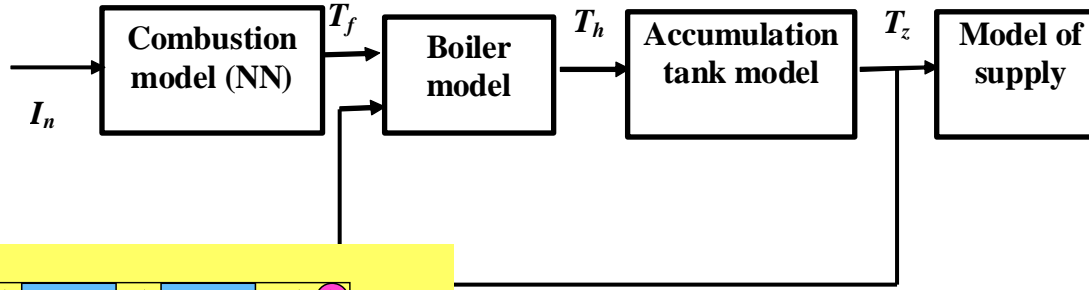


ation

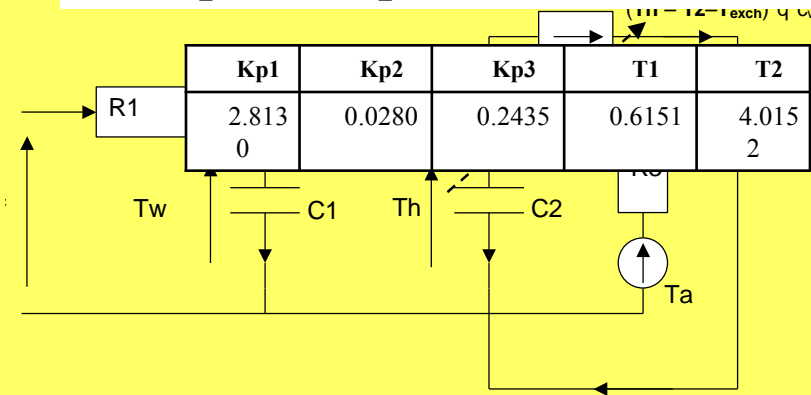
Modelling of supply: model of biomass HERS



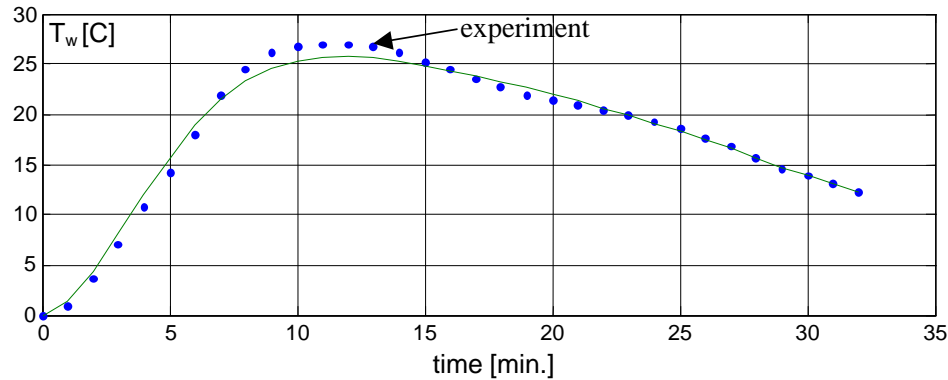
Modelling of supply: model of biomass HERS



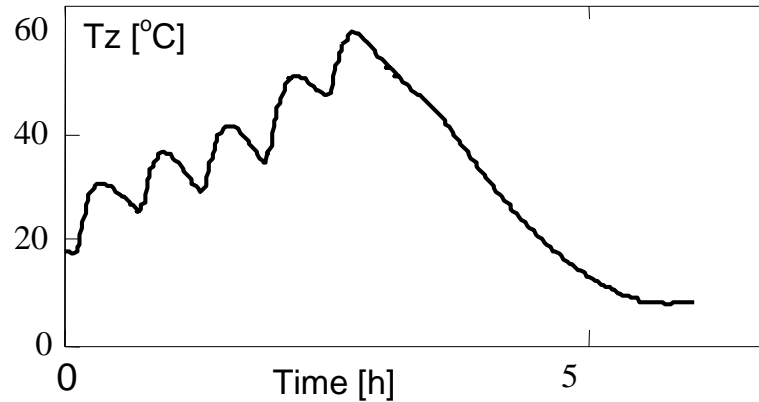
$$\begin{bmatrix} \frac{dT_w}{dt} \\ \frac{dT_h}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_1} & a_{12} \\ a_{21} & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_w \\ T_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Kp_1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot T_f + \begin{bmatrix} 0 \\ Kp_2 \end{bmatrix} \cdot T_z + \begin{bmatrix} 0 \\ Kp_3 \end{bmatrix} \cdot T_a$$



Modelling of supply: model of biomass HERS

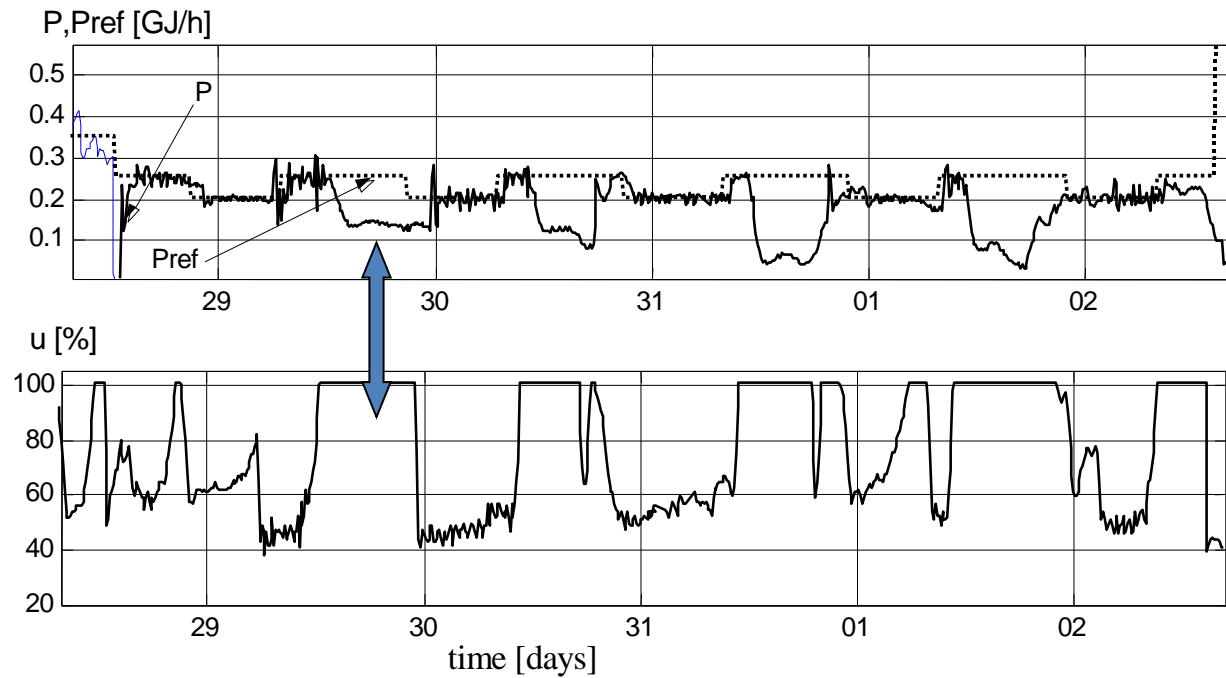


Verification of the boiler model, 54 kg of biomass experiment



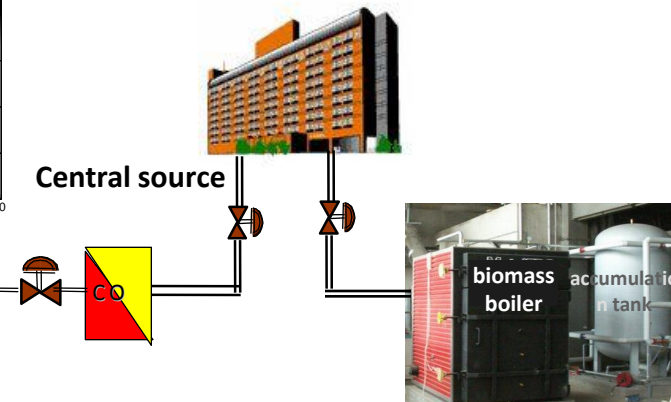
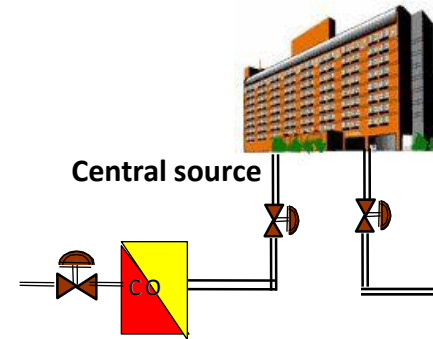
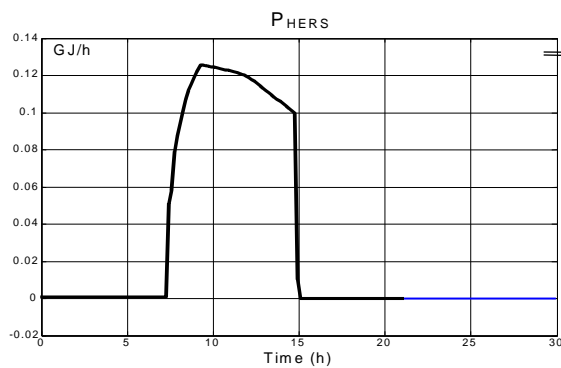
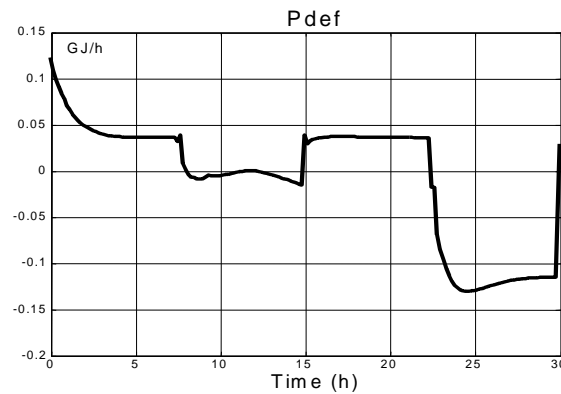
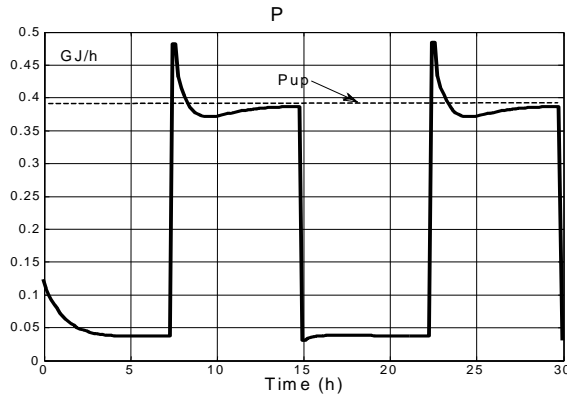
Verification of the combustion & boiler & accumulation tank model:
Loading the accumulation tank: load of 28 kg, 43 kg, 58 kg, 73 kg, 43 kg of fuel was used.

Using the models: peak demand compensation



Typical power reference control of the building.

Using the models: peak demand compensation



Przykład 2: Optymalizacja zużycia energii cieplnej:

Nadrzędny układ sterowania powinien minimalizować różnicę pomiędzy zapotrzebowaniem na energię ciepłą, a jej dostawą

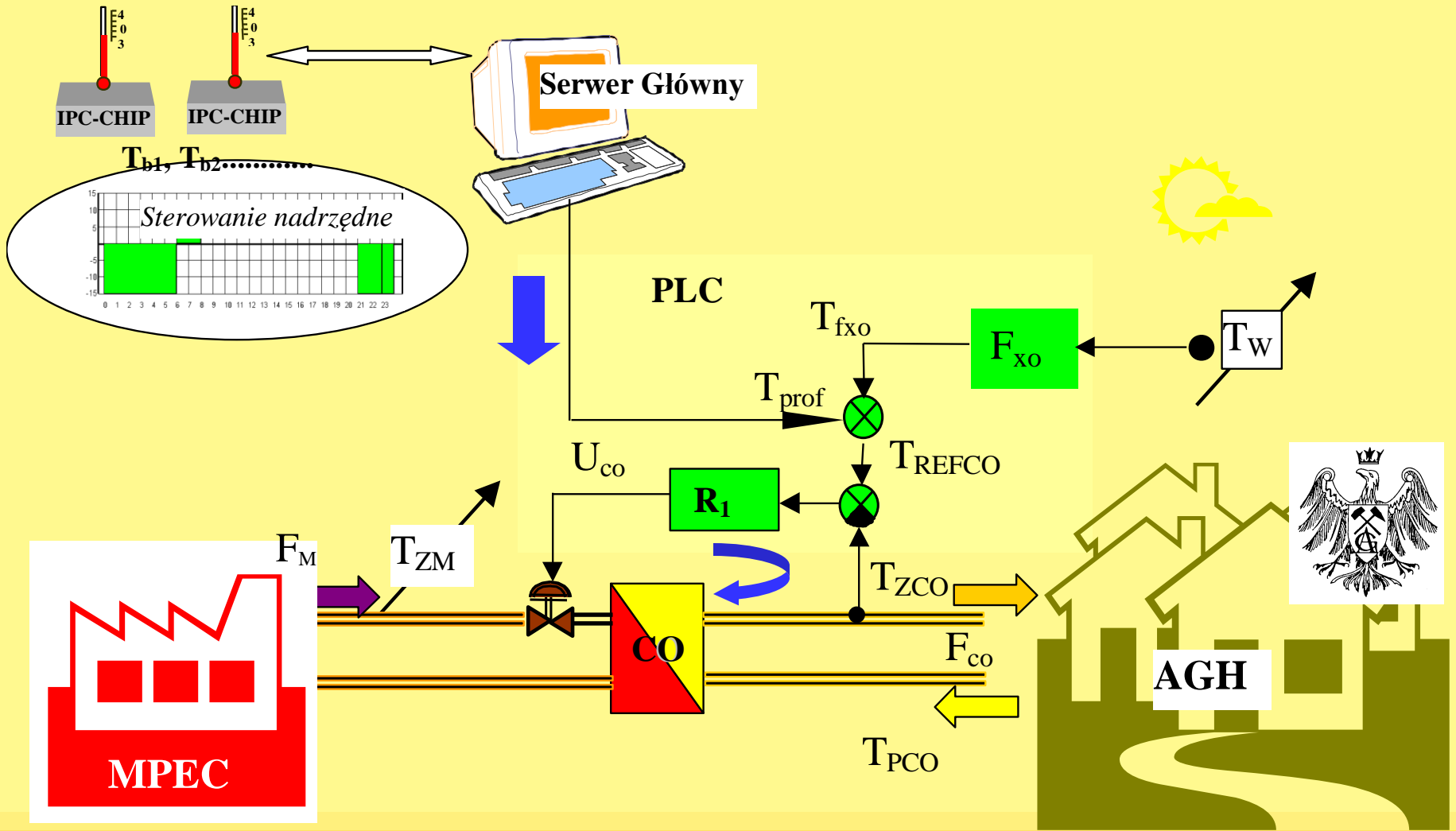
Rezerwy proste:

- regulacja nadążna za zmianami temperatury
- obniżenia nocne i sezonowe (c.o.,c.w.)

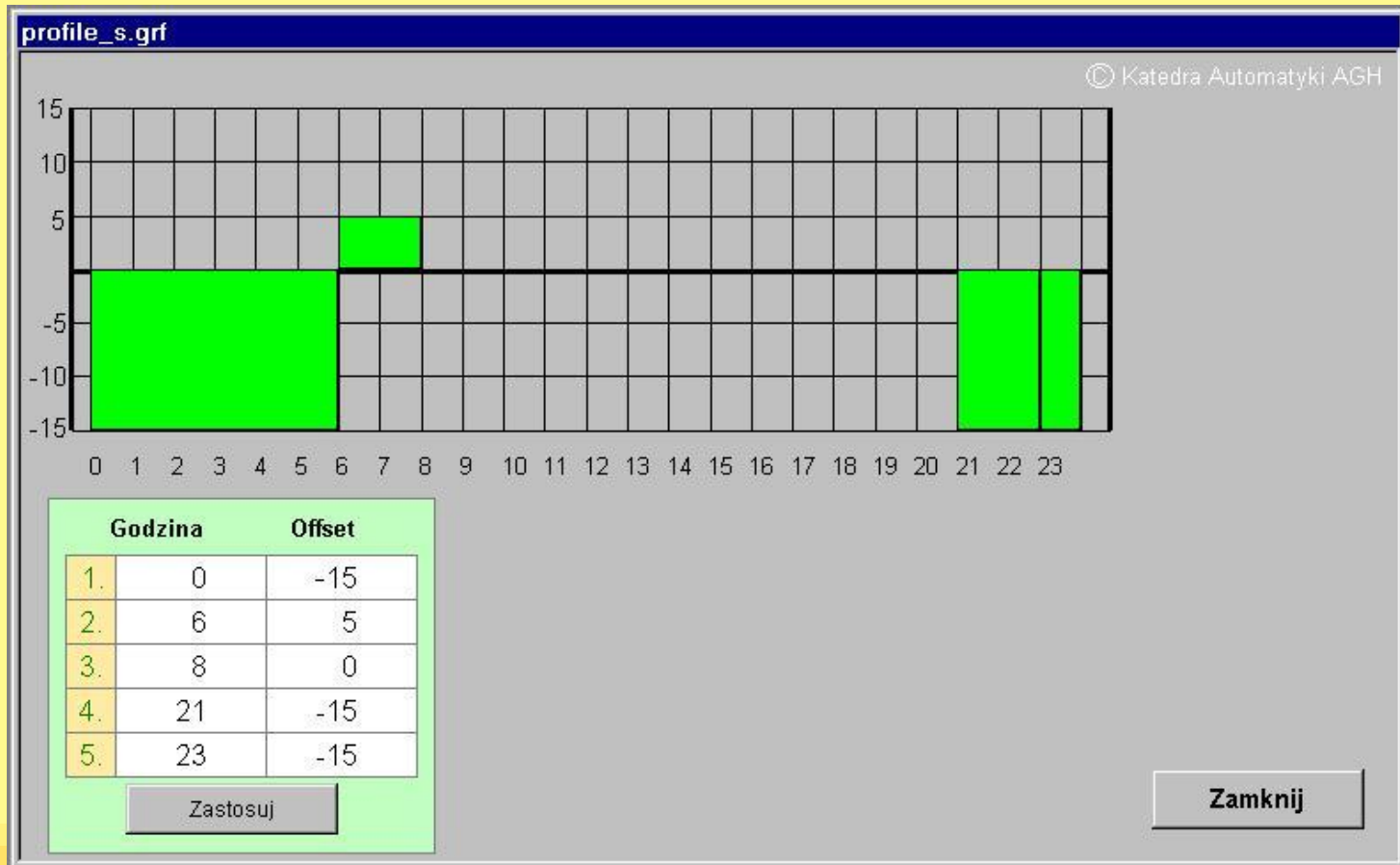
Rezerwy złożone:

- określenie optymalnego wykresu regulacyjnego dla kompleksu ogrzewanych budynków (uwzględnienie indywidualnych cech obiektu, wpływu warunków atmosferycznych),
- predykcja zapotrzebowania na energię (określenie optymalnych obniżeń i podwyższeń z uwzględnieniem warunków atmosferycznych i temperatury wody grzewczej)

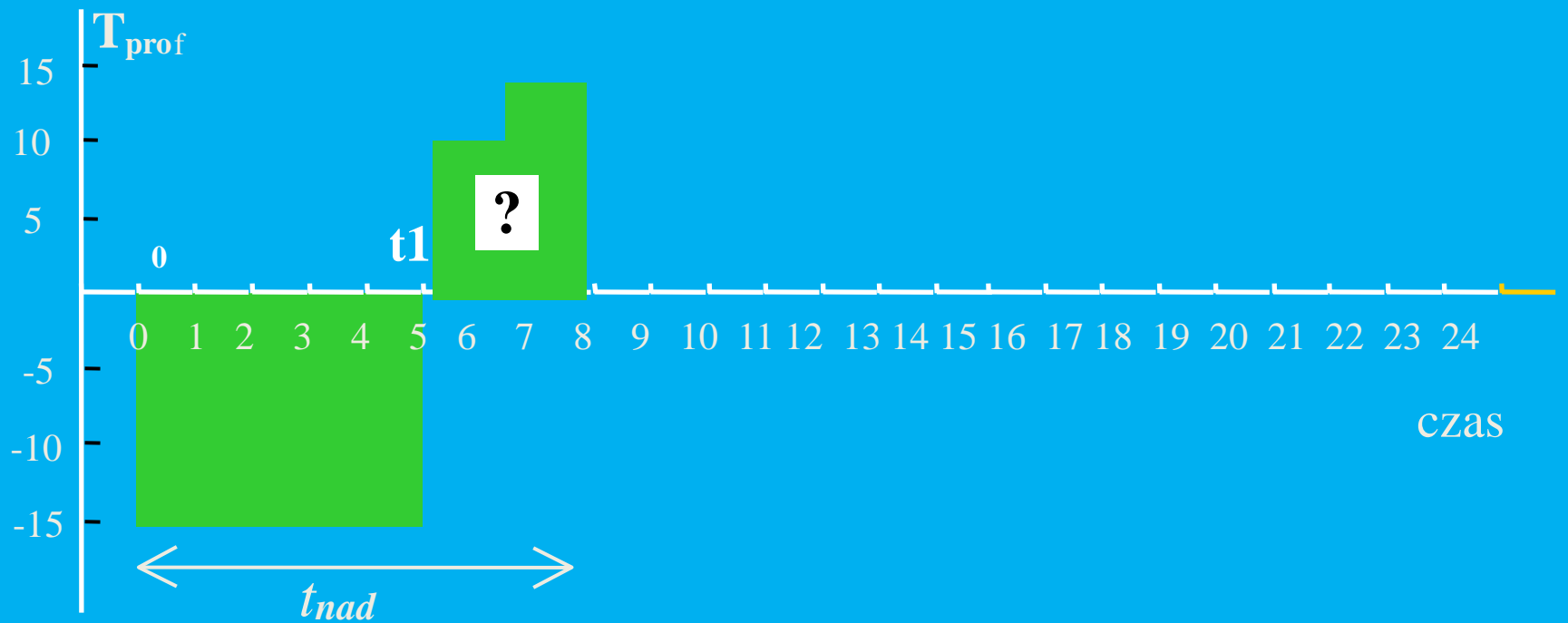
Algorytmy: sterowanie lokalne i nadrzędne



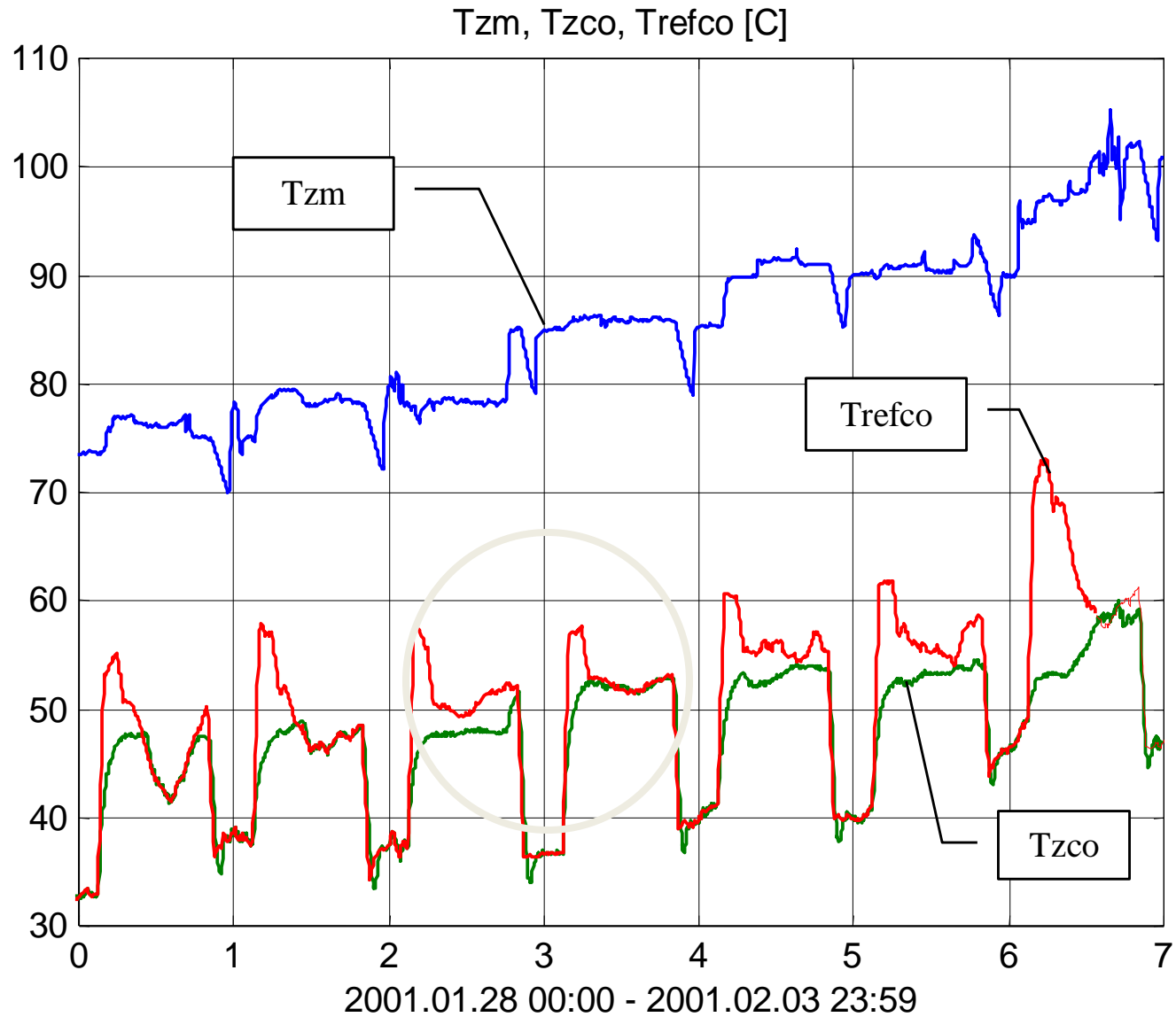
Sterowanie nadrzędne: profile temperatury (obniżenia nocne i sezonowe), z predykcją zapotrzebowania



Przykładowa sekwencja sterowania nadrzędnego

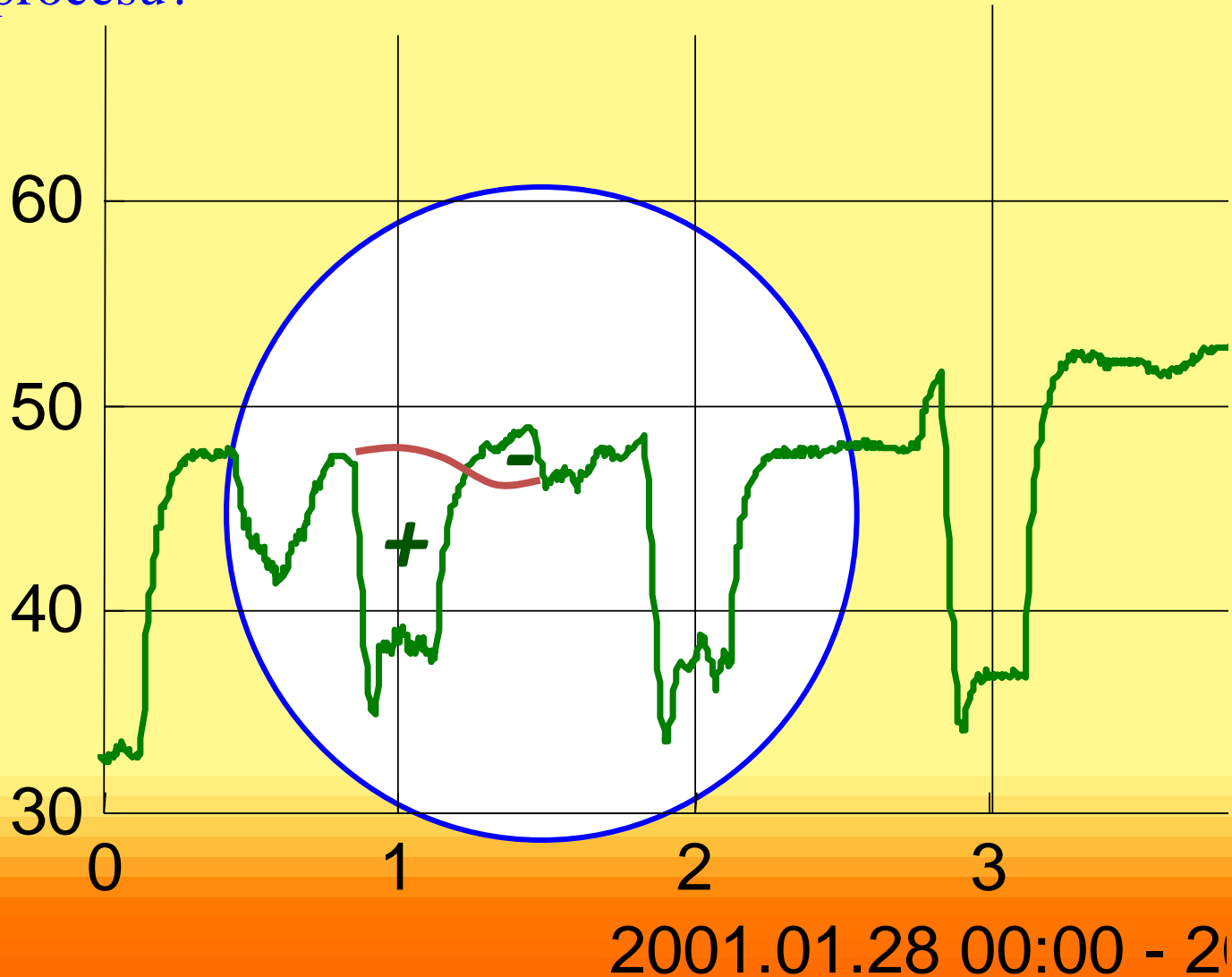


Optimalizacja zużycia energii: obniżenia nocne:



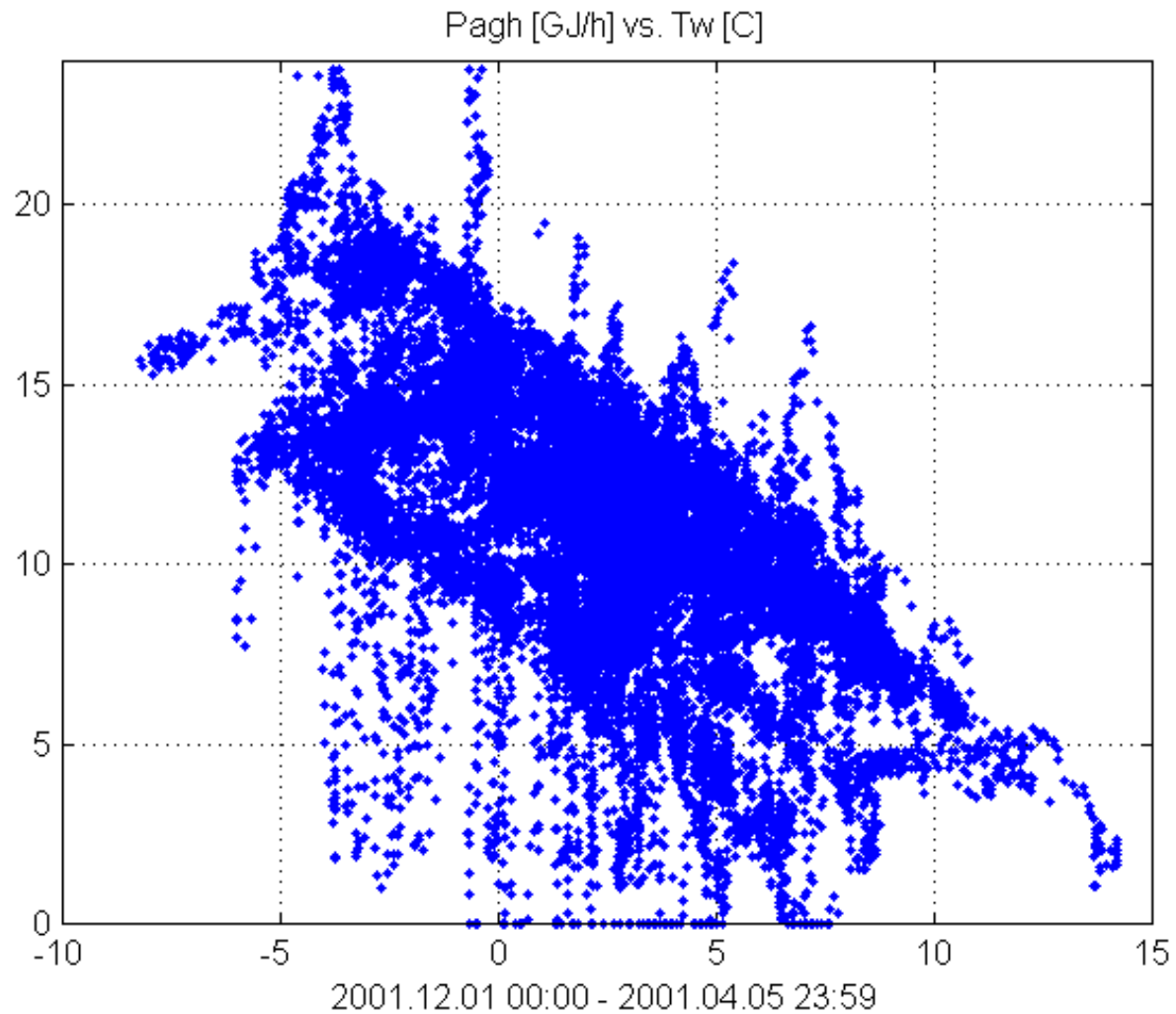
Optymalizacja zużycia energii:

Czy i jakie oszczędności przynosi takie prowadzenie procesu?



Optymalizacja zużycia energii:

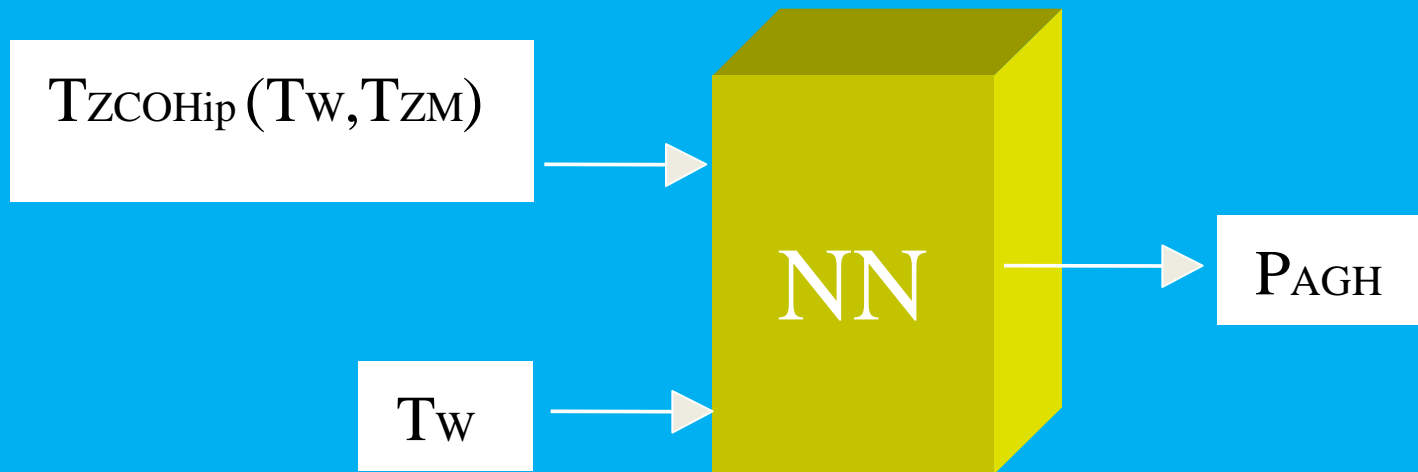
Pobór mocy



Optymalizacja zużycia energii:

Czy i jakie oszczędności przynosi takie prowadzenie procesu?

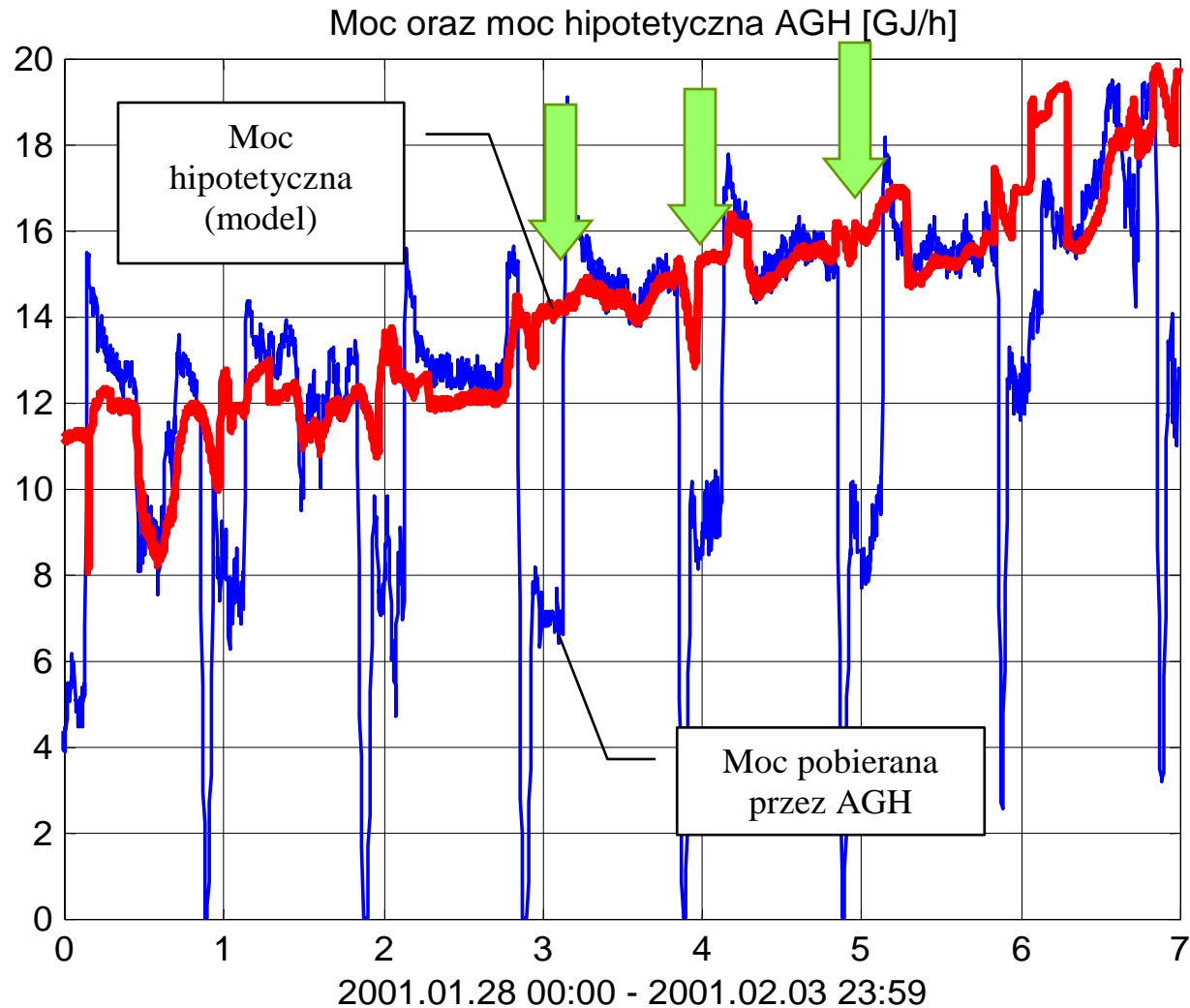
Odpowiedź: model poboru mocy



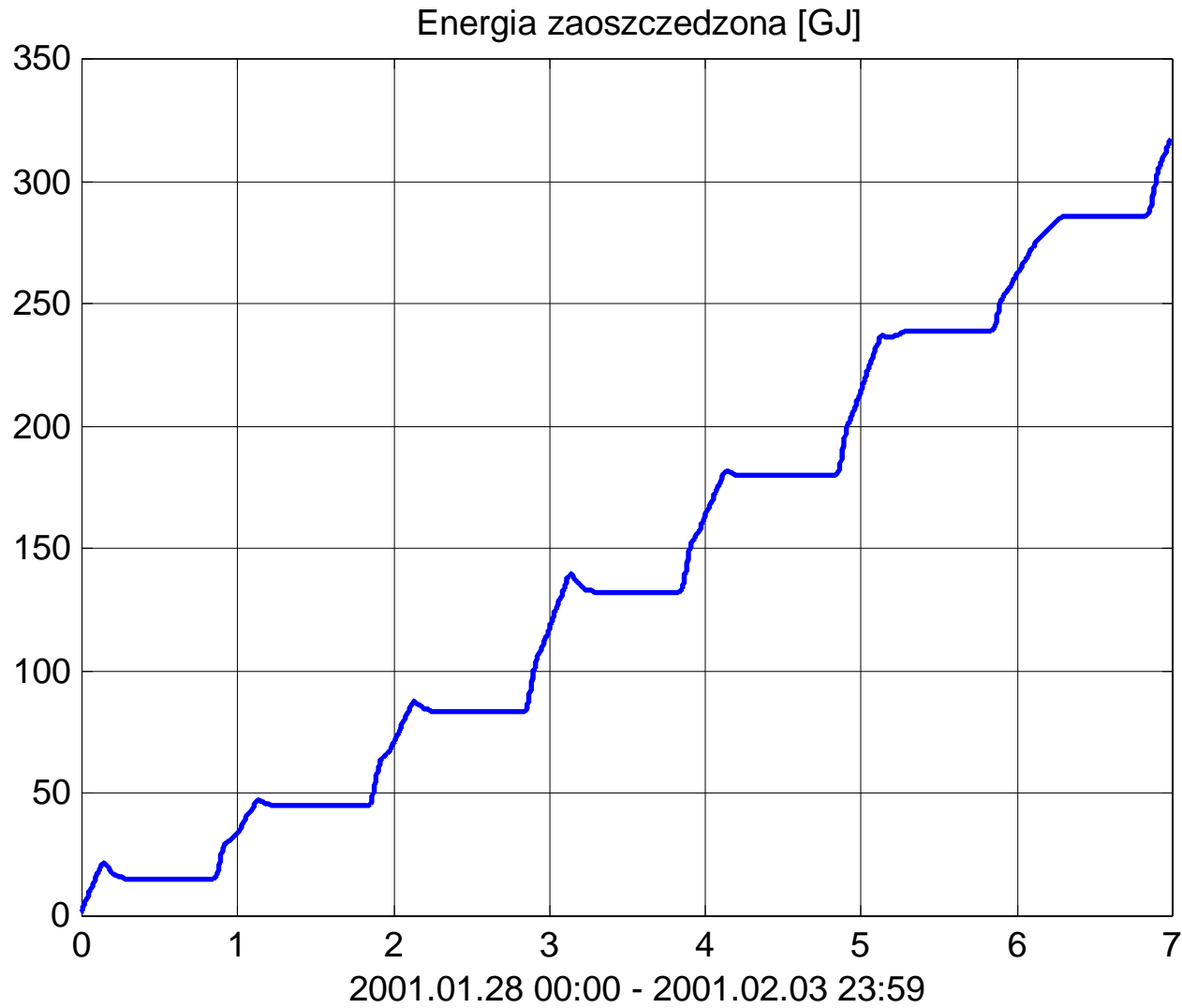
NN - neural network, T_w -temeperatura zewnętrzna, T_{zc} - temperatura zasilania

Optimalizacja zużycia energii:

Model poboru mocy



Optymalizacja zużycia energii:



Co z tego wynika dla użytkownika systemu grzewczego?

Tabela: Wyniki prób zastosowania suboptymalnego algorytmu sterowania nadrzędnego

	Avg Tw [C]	Min Tw [C]	Max Tw [C]	Avg Tzco [C]	Energia Odczyt [GJ]	Liczba dni logowania danych	Liczba dni sterowania	Szacowana oszczędność [GJ]
Październik	8,67	-0,90	18,30	35,28	5938	30,3	23	819
Listopad	7,60	-2,25	19,85	37,39	5028	27,8	29	1283
Grudzień	-3,46	-15,05	8,10	51,44	11916	29,6	21	908
Styczeń	-0,46	-13,40	9,55	49,35	11806	28,9	10	620
Luty	-2,36	-14,50	15,65	55,17	10975	25,2	0	0
Marzec	4,42	-5,00	18,20	42,62	7092	29,6	27	926
Kwiecień	8,97	-2,40	27,80	32,64	3759	26,0	3	62
SUMA:					56515			4618

T_w – temperatura zewnętrzna

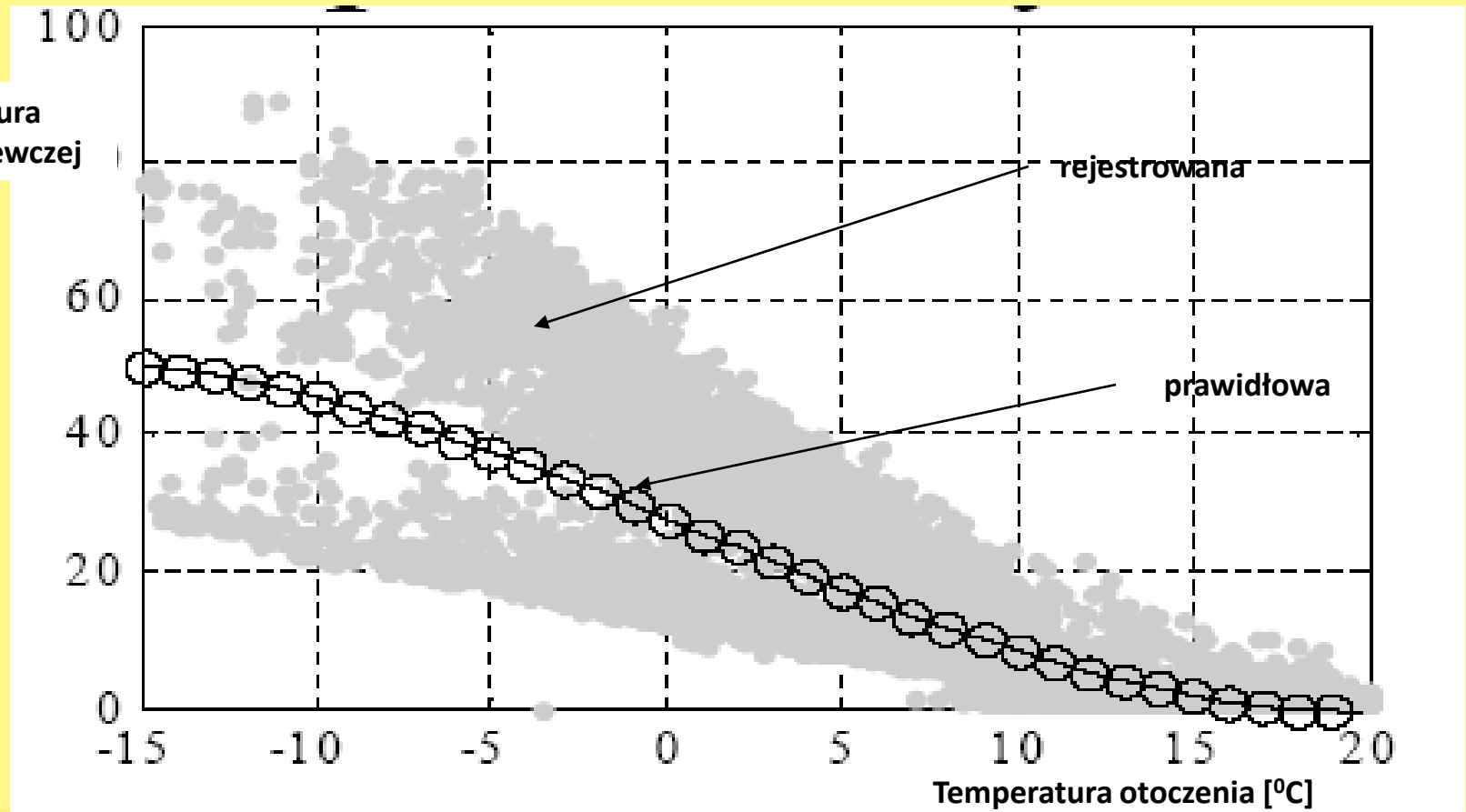
Średnioważona cena ciepła (woj. małopolskie) [zł/GJ] 27,68 zł

Średnioważona stawka opłaty za usługi przesyłowe (woj. małopolskie) [zł/GJ] 12,20 zł

Źródło: www.ure.gov.pl (Urząd Regulacji Energetyki)

Przykład 3: zadanie diagnostyki

dane zarejestrowane z 850 węzłów ciepłych



*) Rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Kiluka *p.t.*

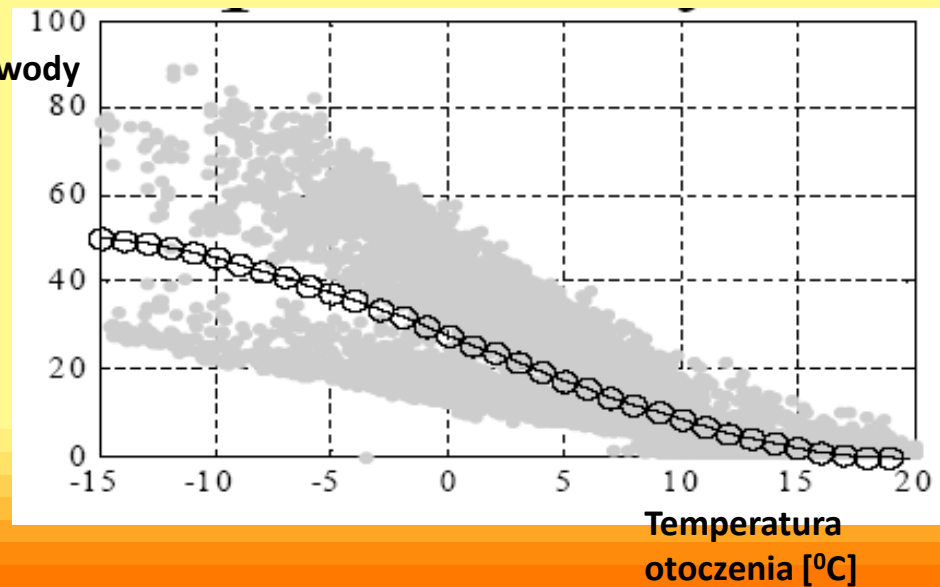
Algorytmizacja zadań diagnostyki zdarzeniowej dla potrzeb scentralizowanego nadzoru obiektów energetyki ciepłej,

AGH, Krakow, 2005

Problem diagnostyki:

Zastosowanie metod przetwarzania danych dla wykrywania, grupowania i klasyfikacji niesprawności oraz awarii urządzeń grzewczych w zdalnym nadzorze masowym.

Temperatura wody
grzewczej



Dziękuję!

wgr@agh.edu.pl