



Studia Podyplomowe

EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ

w ramach projektu

**Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji
Zarządzania Energią**

**Rozwiązania techniczne urządzeń
automatyki realizujących sterowanie
i monitorowanie systemów
energetycznych AGH**

mgr inż. Wojciech Kreft

Rozwiązania techniczne urządzeń automatyki realizujących sterowanie i monitorowanie systemów energetycznych AGH



WOJCIECH KREFT – AGH Akademia Górniczo – Hutnicza w Krakowie, Katedra Automatyki
email: wkreft@agh.edu.pl

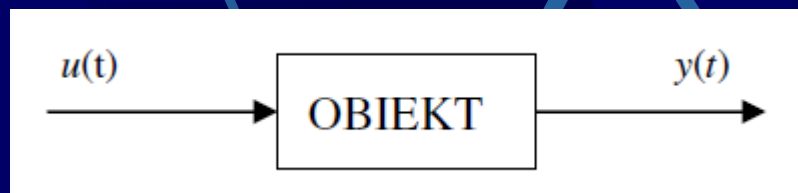
Rozwiązania techniczne urządzeń automatyki realizujących sterowanie i monitorowanie systemów energetycznych AGH

SZKIC WYKŁADU:

- Pojęcie sterowania, zadań sterowania, wskaźniki jakości
- Pomiar w węzłach ciepłowniczych (przykład Miasteczka Studenckiego AGH)
- Algorytmy sterowania dystrybucją energii cieplnej (przykład kompleksu pawilonów AGH)
- Model zużycia energii cieplnej przez budynek dla różnych strategii sterowania

POJĘCIE STEROWANIA, ZADAŃ STEROWANIA, WSKAŹNIKI JAKOŚCI

Sterowanie jest to takie oddziaływanie na obiekt, które umożliwia uzyskanie określonych, z góry zaplanowanych zachowań obiektu.



Rys.1. Obiekt sterowania SISO

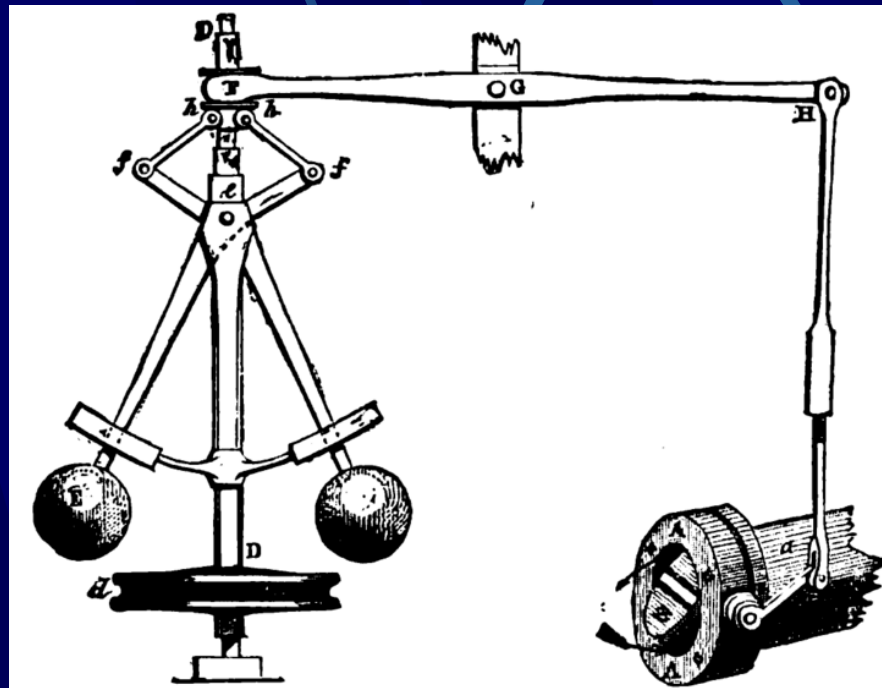
Sterowanie wywodzi się od słowa STER – część statku służąca do utrzymywania jak i zmiany kursu. Zagadnienie sterowania funkcjonowało już w starożytności.

Oto nawet okrętom, choć tak są potężne i tak silnymi wichrami miotane, niepozorny ster nadaje taki kierunek, jaki odpowiada woli sternika.

(Biblia, Jk 3,4)

POJĘCIE STEROWANIA, ZADAŃ STEROWANIA, WSKAŹNIKI JAKOŚCI

Przykładem zadania sterowania jest stabilizacja prędkości obrotowej. W 1788 roku po raz pierwszy wykorzystano regulator Watta w maszynie parowej do stabilizacji prędkości obrotowej.



Rys.2. Regulator Watta (źródło Wikipedia)

POJĘCIE STEROWANIA, ZADAŃ STEROWANIA, WSKAŹNIKI JAKOŚCI

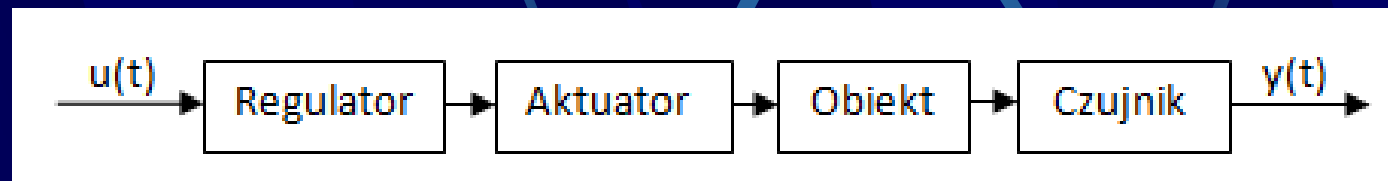
Regulator Watta jest tzw. regulatorem bezpośredniego działania, czyli takim regulatorem, który nie potrzebuje dodatkowego zasilania z zewnątrz. W ciepłownictwie również wykorzystuje się regulatory bezpośredniego działania, są nimi np. regulatory termostacyjne w grzejnikach.



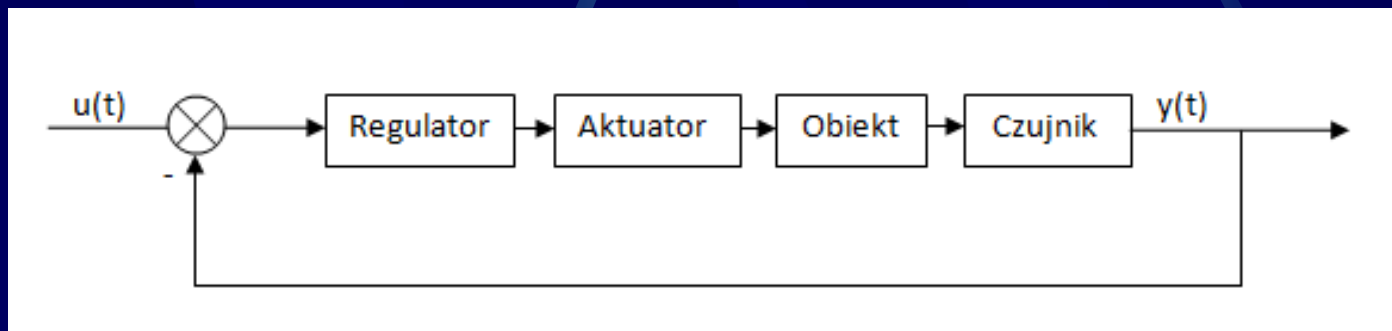
Rys.3. Regulator termostacyjny

POJĘCIE STEROWANIA, ZADAŃ STEROWANIA, WSKAŹNIKI JAKOŚCI

Układ sterowania jest to powiązanie ze sobą obiektu sterowania wraz z regulatorem. Układ sterowania może być otwarty lub zamknięty.



Rys.4. Otwarty układ sterowania



Rys.5. Zamknięty układ sterowania

POJĘCIE STEROWANIA, ZADAŃ STEROWANIA, WSKAŹNIKI JAKOŚCI

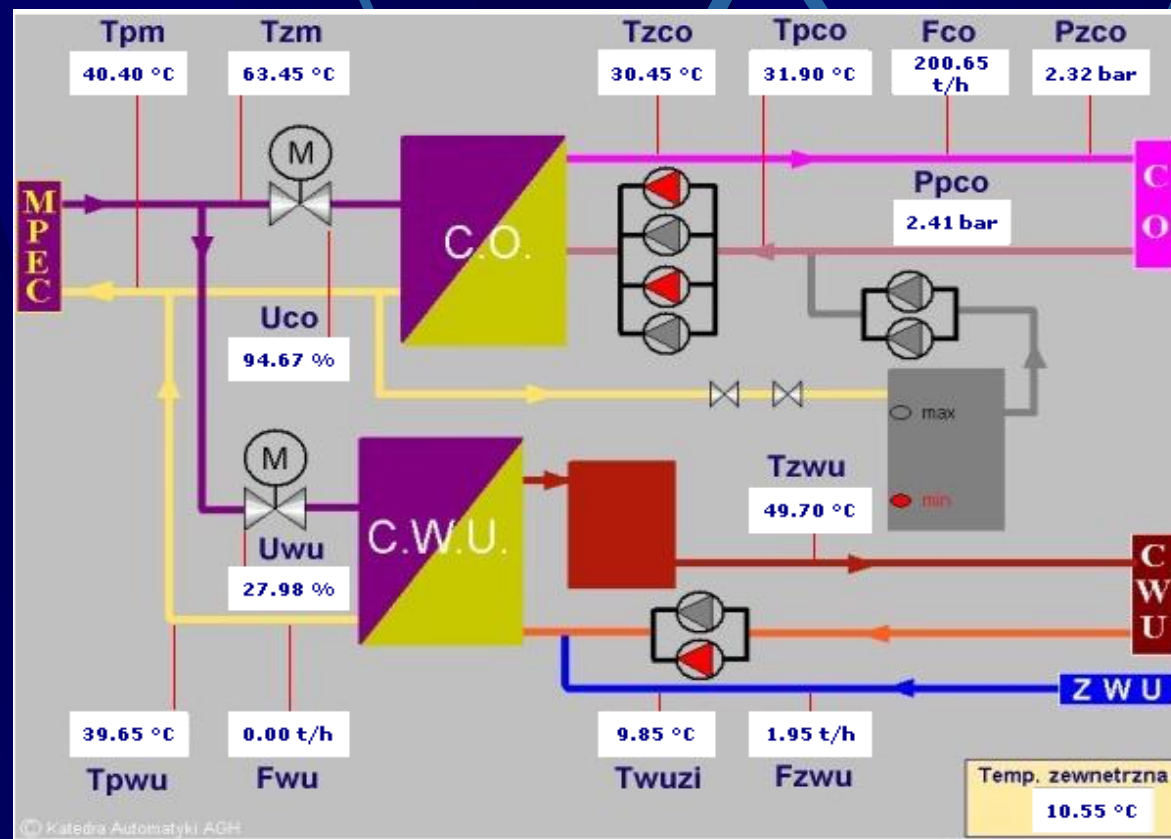
Podstawowym celem sterowania jest uzyskanie pożądanego przebiegu wyjścia obiektu. Najczęściej oznacza to stabilizację wartości wyjścia na określonym poziomie, choć czasami zdarza się utrzymywanie wyjścia wg wartości zmiennej w czasie funkcji (sterowanie nadażne). W ciepłownictwie najczęściej mamy do czynienia ze stabilizacją temperatury, np. utrzymywanie w pomieszczeniach temperatury 20°C . Oprócz zapewnienia podstawowego celu, pojawiają się również kryteria jakości działania układu sterowania, zwane wskaźnikami jakości.

Można wyróżnić następujące wskaźniki jakości:

- 1) czas odpowiedzi
- 2) czas regulacji
- 3) przeregulowanie
- 4) całkowite wskaźniki jakości (najczęściej całka z kwadratu uchybu)

POMIARY W WĘZŁACH CIEPŁOWNICZYCH (PRZYKŁAD MIASTECZKA STUDENCKIEGO AGH)

Węzeł ciepłowniczy jest to zestaw instalacji i urządzeń służących do zapewnienia właściwych dostaw ciepła do budynku. Standardem jest, że struktura ta składa się z dwóch niejako odrębnych układów: centralnego ogrzewania (CO) i ciepłej wody użytkowej (CWU).



Rys.6. Ekran synoptyczny głównego wymiennika ciepła kompleksu budynków AGH (z archiwum Katedry Automatyki AGH)

POMIARY W WĘZŁACH CIEPŁOWNICZYCH (PRZYKŁAD MIASTECZKA STUDENCKIEGO AGH)

W latach 2005-2006 wykonano w ramach Grantu Uczelnianego Zamawianego GUZ 21.10.210.91 inwentaryzację sprzętu automatyki w węzłach ciepłowniczych Miasteczka oraz pomiary wielkości fizycznych poszczególnych węzłów (temperatury, przepływy, moce). W każdym z badanych węzłów ciepłowniczych umieszczono przepływomierz ultradźwiękowy oraz czujniki termoparowe.

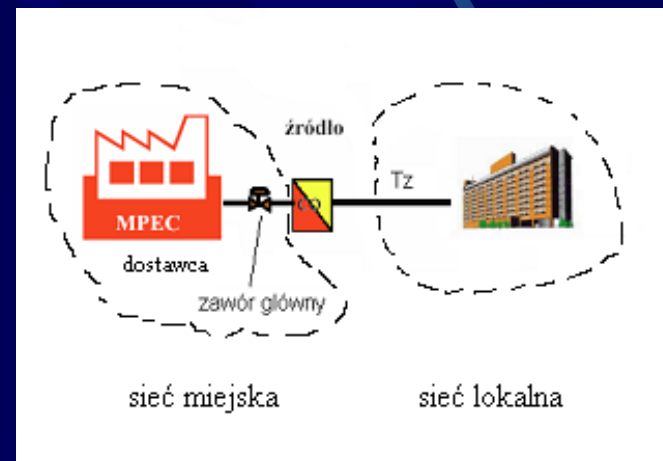
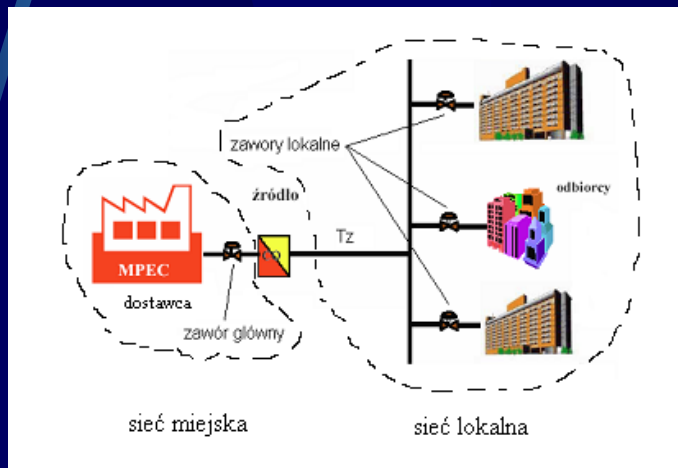


Rys.7. Wymienniki C.O. i C.W.U. wraz ze zbiornikiem ciepłej wody w węźle ciepłowniczym jednego z akademików Miasteczka Studenckiego AGH

POMIARY W WĘZŁACH CIEPŁOWNICZYCH (PRZYKŁAD MIASTECZKA STUDENCKIEGO AGH)

SYSTEM CIEPŁOWNICZY

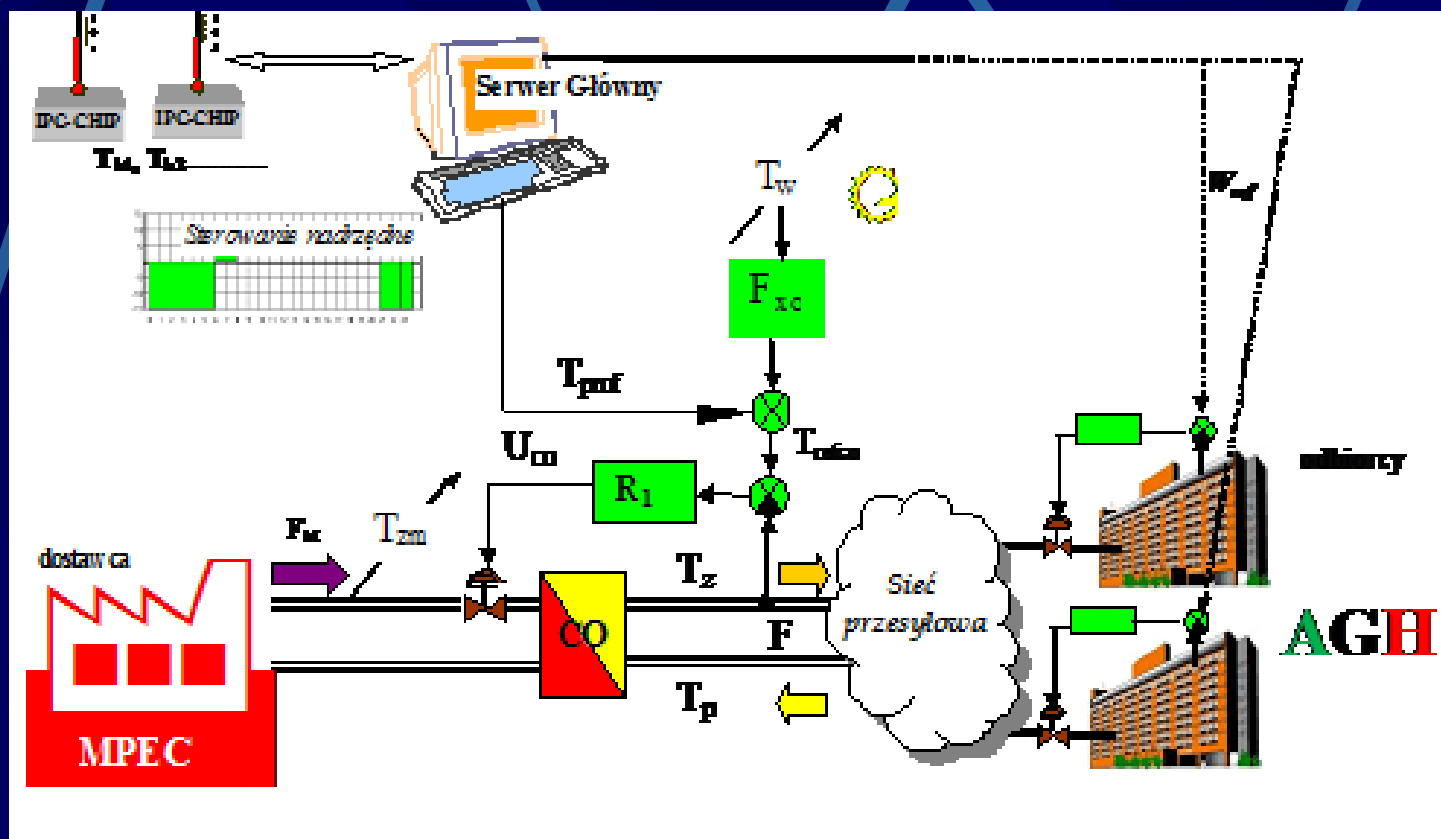
Celem systemu ciepłowniczego jest dostarczanie takiej ilości energii cieplnej aby warunki panujące w pomieszczeniach budynku były komfortowe. Z drugiej jednak strony zadaniem tego systemu jest minimalizacja zużycia energii cieplnej, z czym się oczywiście wiąże oszczędności. System ciepłowniczny na ogół oprócz wymiennika ciepła CO składa się również z wymiennika ciepła CWU, którego zadaniem jest przekazywanie ciepła z miejskiej sieci MPEC do lokalnej sieci budynku, która służy do zaspokajania potrzeb użytkowników w ciepłą wodę użytkową.



Rys.8. Schemat dostarczania energii cieplnej do budynków kompleksu uczelnianego AGH oraz Miasteczka Studenckiego AGH

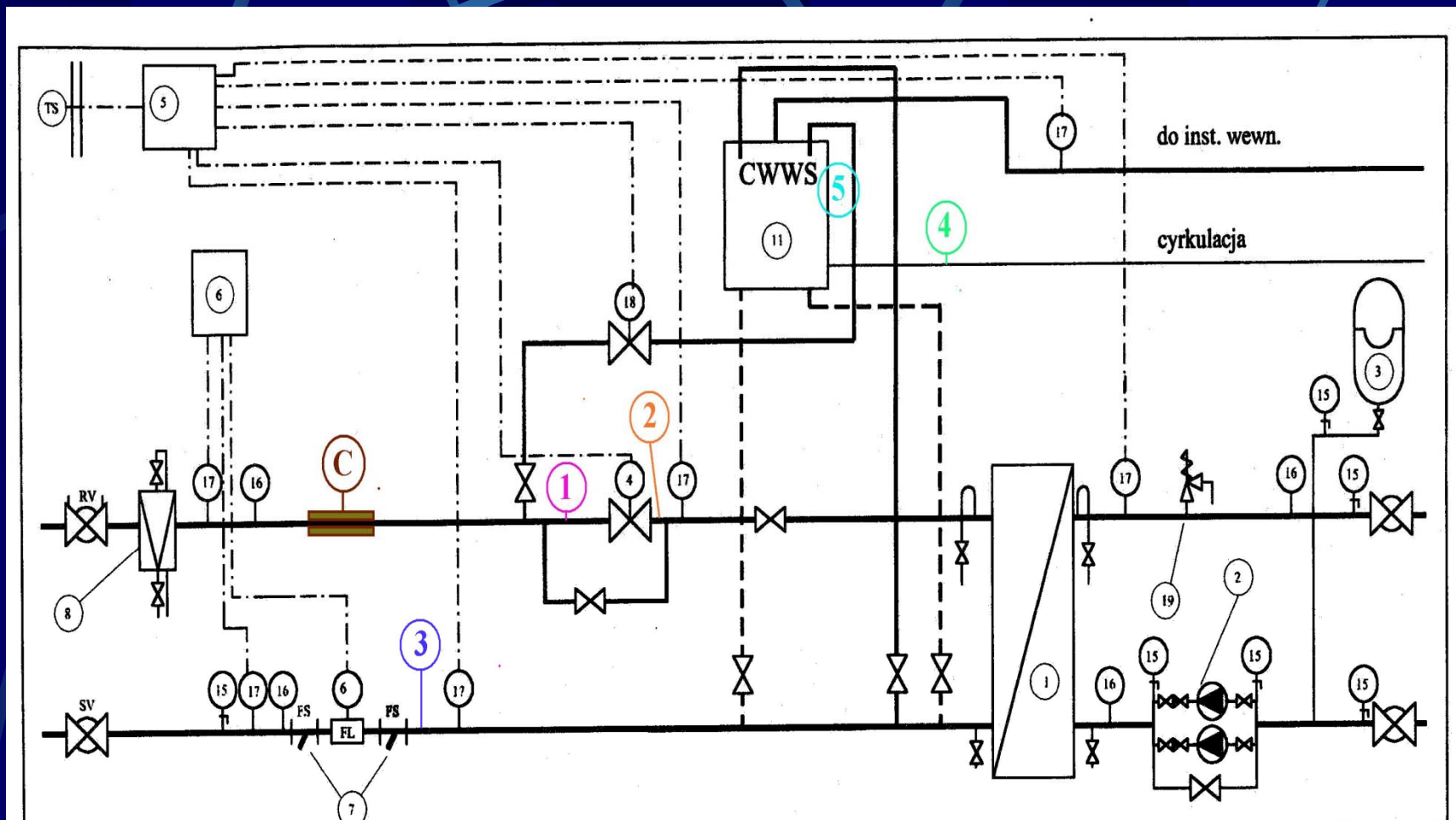
POMIARY W WĘZŁACH CIEPŁOWNICZYCH (PRZYKŁAD MIASTECZKA STUDENCKIEGO AGH)

Sterowanie nadrzędne



Rys.9. Schemat układu regulacji T_z

POMIARY W WĘZŁACH CIĘPŁOWNICZYCH (PRZYKŁAD MIASTECZKA STUDENCKIEGO AGH)

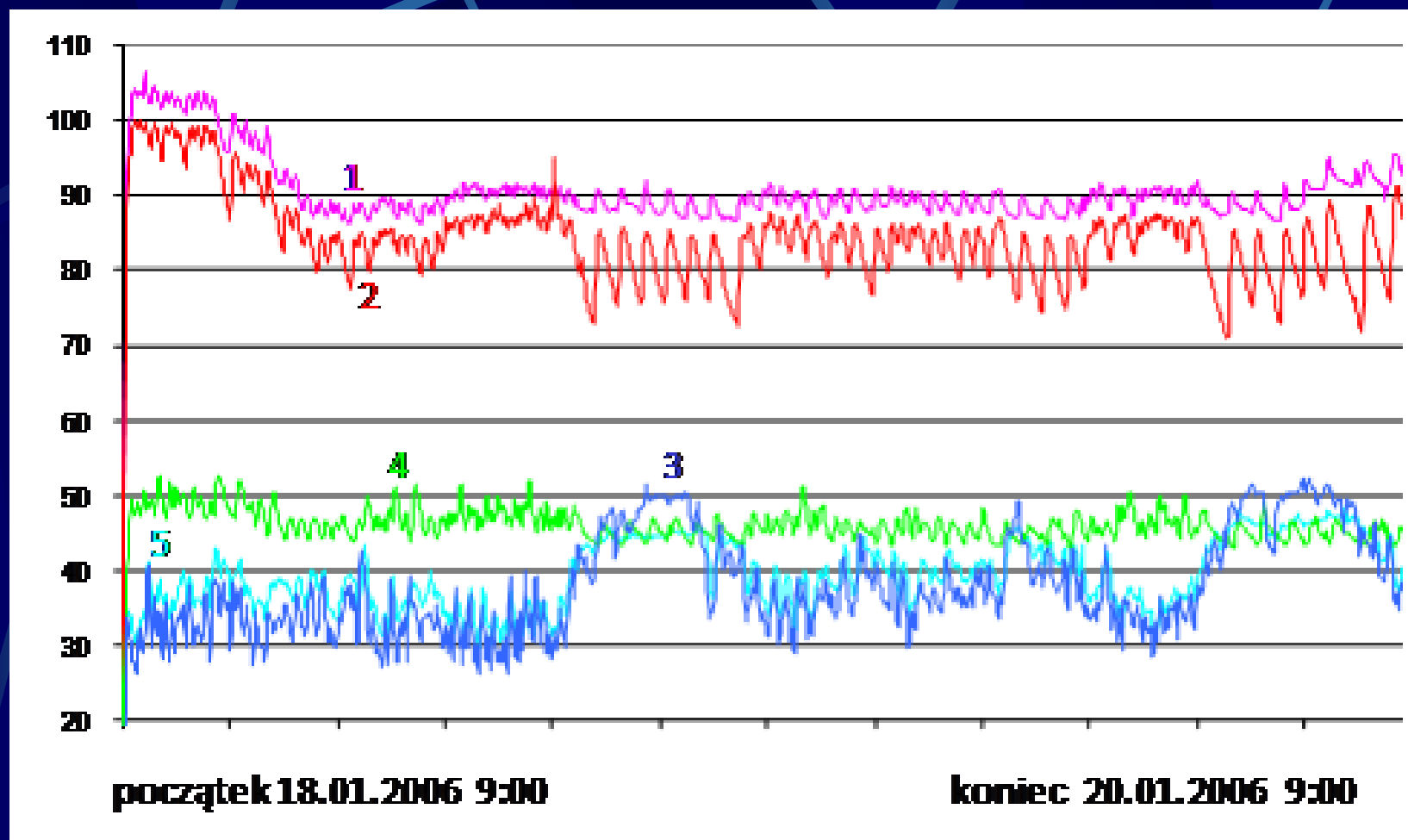


Rys. 10. Schemat węzła DS – Bonus z zaznaczeniem miejsc pomiarowych. 1 – zasilanie przed zaworem regulacyjnym,

2 – zasilanie za zaworem regulacyjnym, 3 – powrót, przed licznikiem przepływu, 4 – cyrkulacja C.W.U,

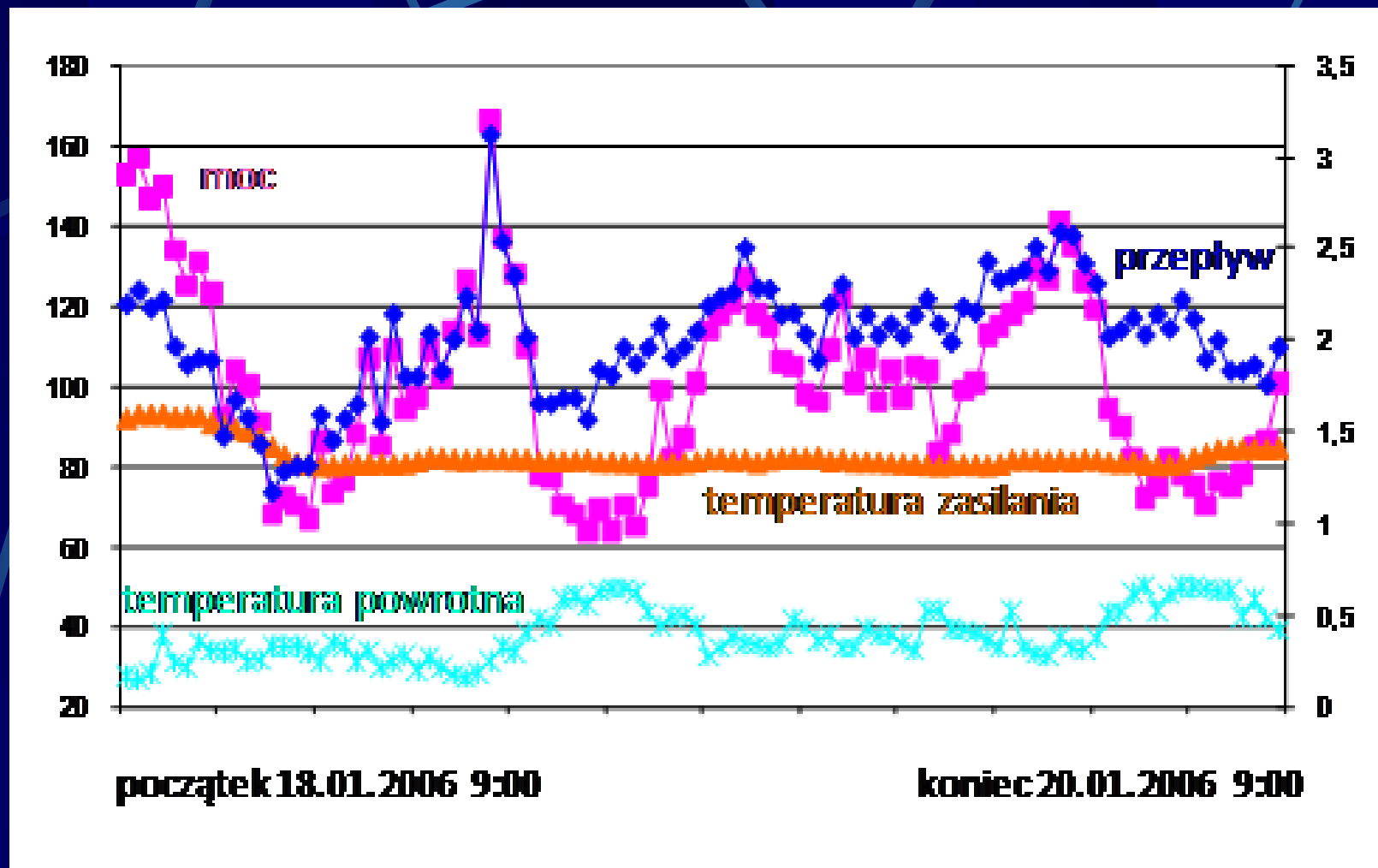
5 – połączenie wewnętrzne wymiennika. Przepływomierz ultradźwiękowy „Controlotron” zamocowany jest w miejscu oznaczonym C

POMIARY W WĘZŁACH CIEPŁOWNICZYCH (PRZYKŁAD MIASTECZKA STUDENCKIEGO AGH)



Rys. 11. Przebieg temperatur z rejestratora FDL8 z akademika DS – Bonus. Na pionowej osi z lewej strony temperatury podano w °C. Na poziomej osi podany jest czas pomiarów

POMIARY W WĘZŁACH CIEPŁOWNICZYCH (PRZYKŁAD MIASTECZKA STUDENCKIEGO AGH)



Rys. 12. Dane z wielofunkcyjnego miernika „Controlotron”. Na pionowej osi z lewej strony temperatury odczytywać należy w °C natomiast moc w kW. Przepływ należy odczytywać z prawej strony w m³/h. Na poziomej osi podany jest czas pomiarów

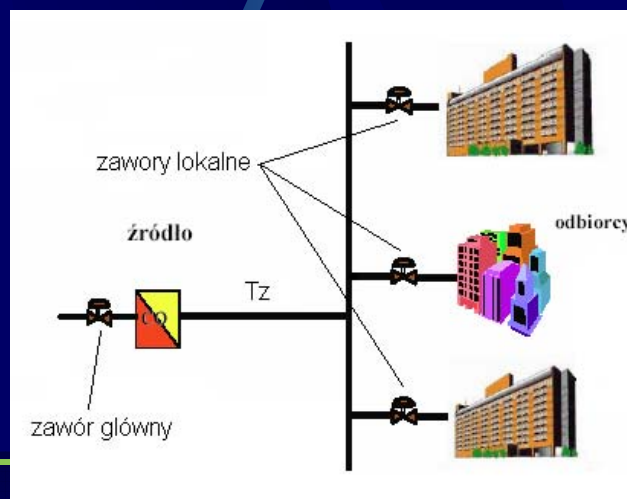
ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Przedmiotem badań jest system dystrybucji energii cieplnej. Jego cele to:

- dostarczenie takiej ilości mocy grzewczej, aby warunki panujące w pomieszczeniach były komfortowe
- optymalizacja zużycia energii, co prowadzi do oszczędności wydatków
- monitorowanie pracy systemu grzewczego, co prowadzi do wczesnego wykrywania pewnych nieprawidłowości

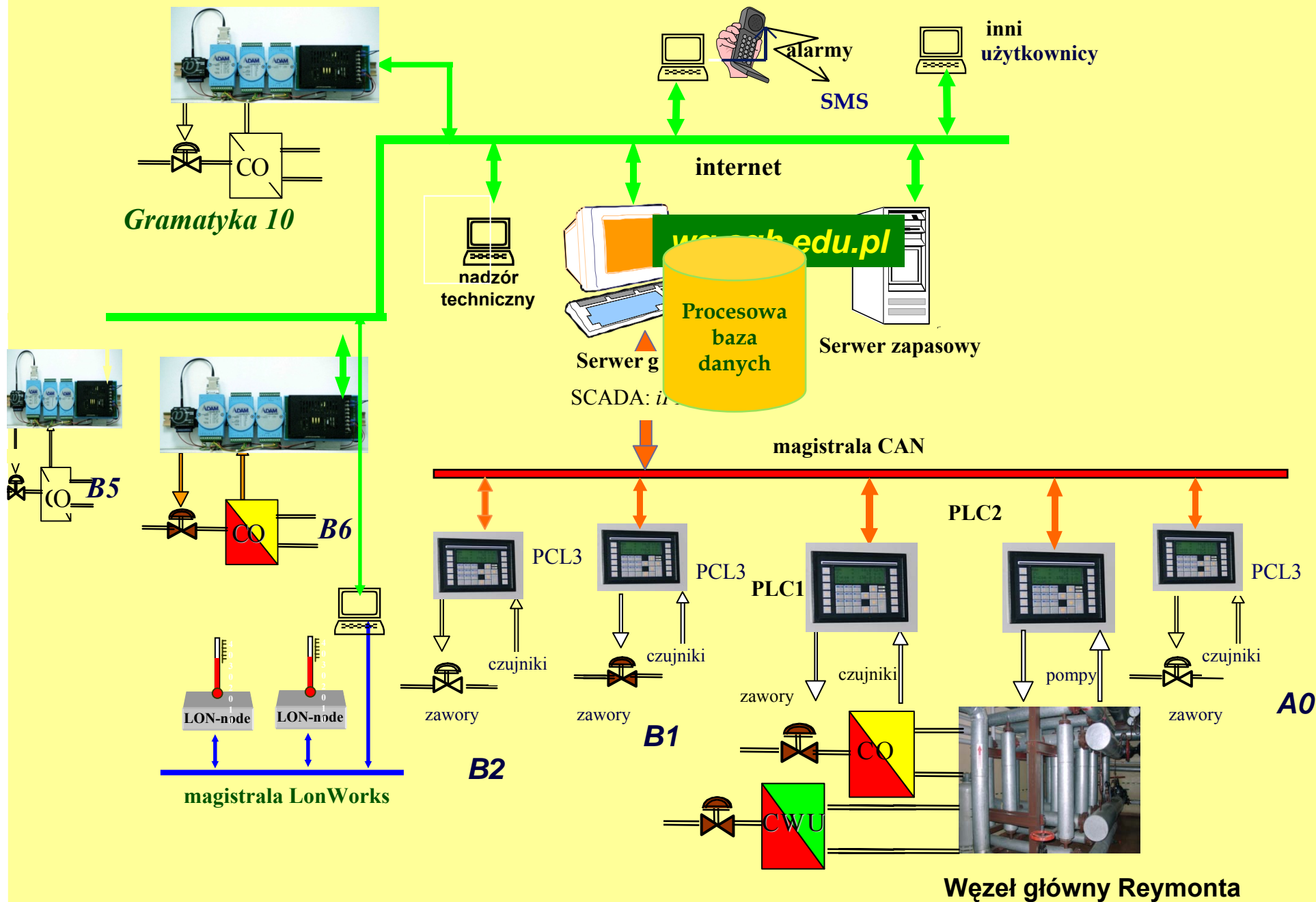
System ten składa się z trzech elementów:

- źródła – wymiennika ciepła między siecią miejską (MPEC) i siecią AGH
- odbiorców – 15 budynków AGH
- struktury teleinformatycznej umożliwiającej sterowanie i monitorowanie



Rys.13. Źródło i odbiorcy

Struktura systemu



ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD
KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Zestawy wymienników ciepła c.o.



ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD
KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Lokalne węzły ciepłne rozmieszczone na powierzchni ok. 4km²



ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Wady i zalety systemu grzewczego opartego na jednym głównym wymienniku ciepła:

Wady:

- Problemy w niezależnym sterowaniu dostarczaniem mocy grzewczej do poszczególnych budynków, co ma znaczenie w stanach przejściowych
- Konieczność budowy długich rurociągów dostarczających moc grzewczą od wymiennika do poszczególnych budynków, a wiąże się to z pewnymi stratami temperatury zasilającej. Jednak przy dobrej izolacji spadki te są niewielkie (rzędu 1 – 2 °C)

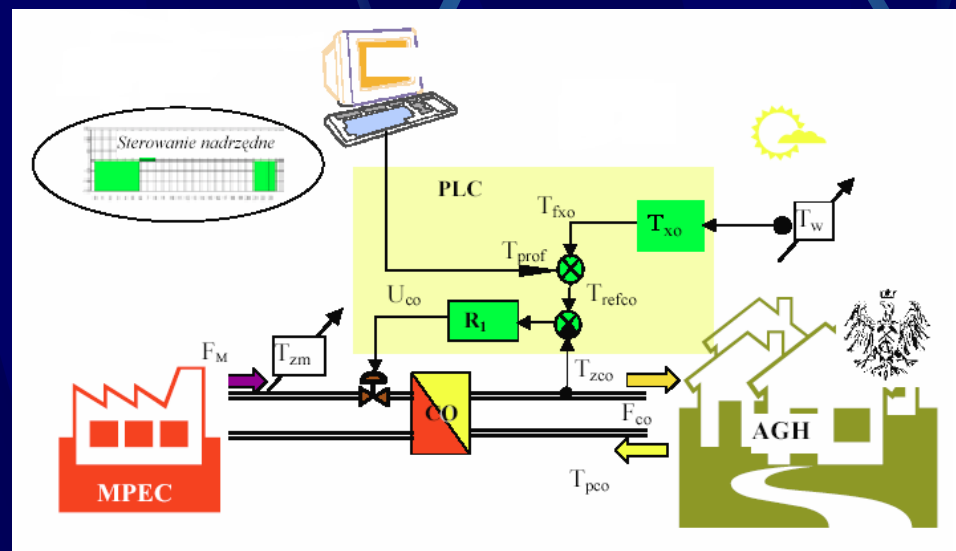
Zalety:

- Znacznie mniejszy koszt budowy jednego głównego wymiennika ciepła, niż kilku mniejszych
- Prostszy system sterowania nadrzędnego, wymagający jedynie jednej pętli sprzężenia zwrotnego, realizującego stabilizację temperatury zasilającej

ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Sterowanie nadrzędne

Celem sterowania nadrzędnego jest zapewnienie określonej temperatury T_z na wtórnej stronie wymiennika. Temperatura ta powinna być uzależniona z jednej strony od temperatury zewnętrznej T_w , a z drugiej strony od zadanej temperatury pomieszczeń T_{pom} w stanie ustalonym we wszystkich budynkach. Z kolei temperatura T_{pom} powinna być utrzymywana na poziomie komfortowym, czyli $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale w okresach świątecznych i w nocy stosuje się określone obniżki tej temperatury o kilka stopni w celach oszczędności.



Rys.17. Schemat układu regulacji T_z

ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Określenie temperatury T_z na podstawie bilansu ciepła w stanie ustalonym

Każdy budynek można modelować w przybliżeniu jako jedno duże pomieszczenie z jednym grzejnikiem. Tak więc bilans cieplny składa się jedynie z mocy doprowadzającej z grzejnika oraz mocy traconej na zewnątrz przez ściany i okna [7]. Bilans taki dla stanu ustalonego jest następujący:

$$P = Fc_w (T_z - T_p) = (T_{pom} - T_w)K \quad (1)$$

gdzie,

P – moc dostarczona

F – przepływ masowy wody grzewczej

T_z – temperatura wody zasilającej

T_p – temperatura wody powrotnej

C_w – ciepło właściwe wody

T_{pom} – średnia temperatura pomieszczeń w budynku

T_w – temperatura zewnętrzna

K – średni współczynnik wymiany ciepła przez ścianę i okna przemnożony przez powierzchnię wymiany (można go wyznaczyć ze wzoru (1) mierząc takie wartości jak: T_z , T_p , F , T_{pom} oraz T_w)

ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Temperatura powrotna T_p dla stanu ustalonego nie jest wielkością przychodzącą z zewnątrz do układu. Zależy ona bowiem od wielkości takich jak: T_z , T_{pom} , F oraz od parametru lk ,

$$T_p = (T_z - T_{pom})e^{-\frac{lk}{Fc_w}} + T_{pom} \quad (2)$$

gdzie:

l – długość grzejnika,

k – współczynnik intensywności wymiany ciepła dla grzejnika razy obwód wymiany.

Iloczyn lk można wyznaczyć ze wzoru (2) znając pozostałe wielkości. Oznaczmy pomocniczo iloczyn lk jako L .

Ostatecznie z równań (1) i (2) uzyskuje się wzór na temperaturę T_z wyrażoną między innymi poprzez parametry budynku takie jak K oraz L :

$$T_z = T_{pom} + \frac{(T_{pom} - T_w)K}{Fc_w \left[1 - e^{-\frac{L}{Fc_w}} \right]} \quad (3)$$

Ostatnia zależność jest spełniona dla każdego budynku podłączonego do systemu ciepłowniczego, co wiąże się z indywidualnymi parametrami K i L oraz wielkością przepływu F . Zależność powyższą można więc zapisać osobno dla każdego budynku, uwzględniając również fakt, że suma przepływów na poszczególnych budynkach jest wielkością stałą, gdyż jest to stały przepływ wymuszany przez pompę cyrkulacyjną znajdującą się po wtórnej stronie wymiennika ciepła.

ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Kryzowanie instalacji

Uwzględniając parametry K i L dla wszystkich budynków oraz wartość stałego przepływu na pompie cyrkulacyjnej, dochodzimy do wniosku, że istnieje pewne określone ustawienie lokalnych zaworów budynku, zwane kryzowaniem instalacji. Tak więc w stanie ustalonym zawory lokalne powinny być we właściwy sposób ustawione, tak aby było możliwe uzyskanie takiej samej temperatury pokojowej każdego budynku.

Obecnie we wszystkich pomieszczeniach budynku B1 są na bieżąco rejestrowane temperatury, a jeśli będą również rejestrowane temperatury w korytarzach to wówczas można by na podstawie średniej temperatury zidentyfikować parametry budynku K i L.

Czujniki temperatury mierzące temperatury poszczególnych pomieszczeń bazują na sieci LONWorks i można je rejestrować na serwerze sieciowym. Z kolei wszystkie inne wielkości są rejestrowane na serwerze głównym na którym znajduje się baza danych na bieżąco aktualizowana (co 5 minut), oraz oprogramowanie wizualizacyjne iFIX typu SCADA. Z pozycji tego serwera można również sterować zaworami.

ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Przykład identyfikacji parametrów budynków

Założmy w uproszczeniu, że w systemie są trzy budynki kompleksu AGH: A4, B2 i A0. Można wówczas na podstawie danych zarejestrowanych w bazie danych zidentyfikować dla tych budynków parametry K i L. Identyfikacja taka dała następujące wyniki:

Dla budynku A4:

16.03.2005 godz. 12:00 $T_z = 36,979 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_p = 33,46 \text{ }^\circ\text{C}$ $F = 7,6 \text{ t/h}$ $T_w = 10,35 \text{ }^\circ\text{C}$
 $K_1 = 3233,3 \text{ W/}^\circ\text{C}$ $L_1 = 2059,3 \text{ W/}^\circ\text{C}$

Dla budynku B2:

16.03.2005 godz. 12:00 $T_z = 36,586 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_p = 34,5 \text{ }^\circ\text{C}$ $F = 16,21 \text{ t/h}$ $T_w = 10,35 \text{ }^\circ\text{C}$
 $K_2 = 4088,1 \text{ W/}^\circ\text{C}$ $L_2 = 2541,9 \text{ W/}^\circ\text{C}$

Dla budynku A0:

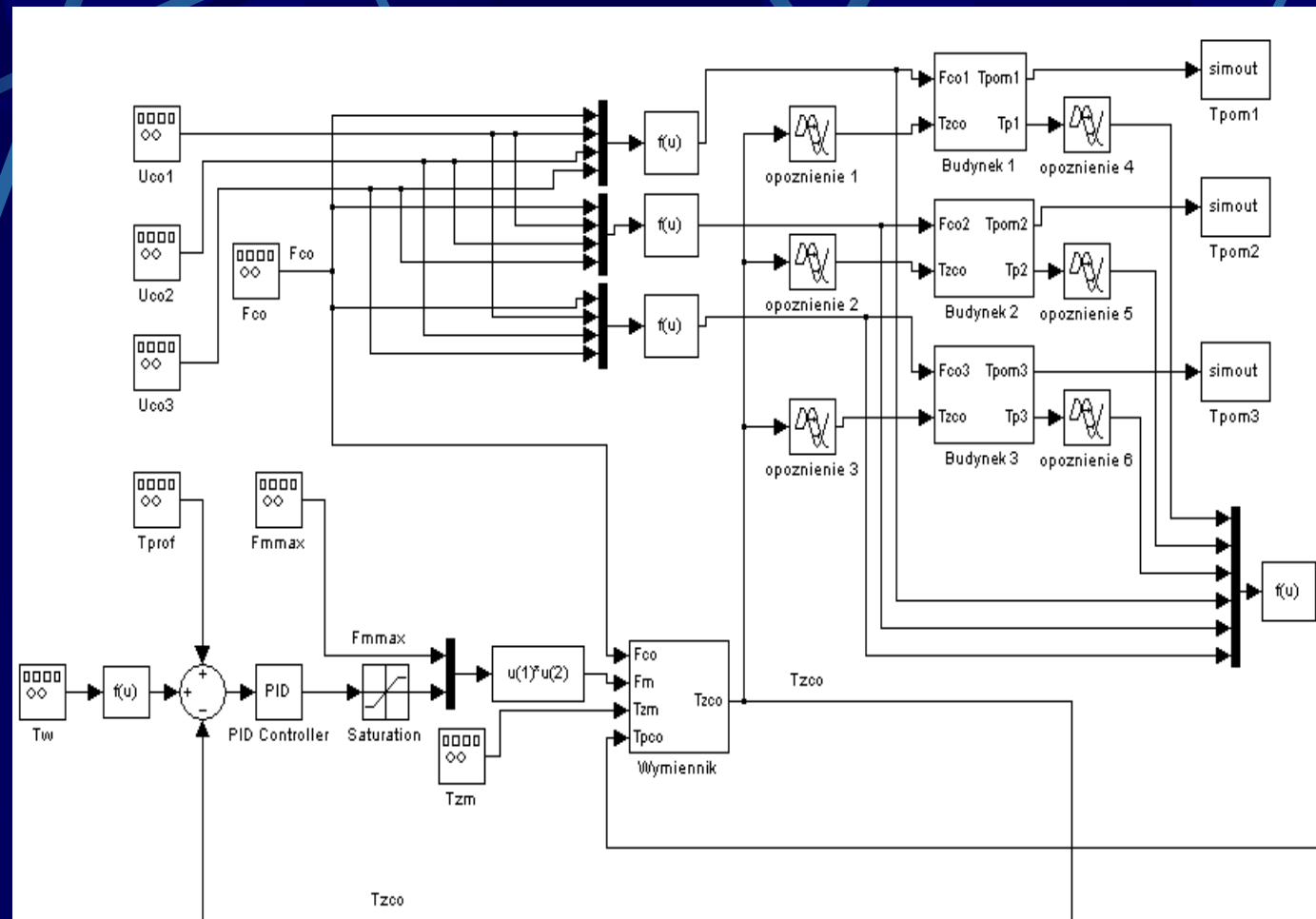
8.12.2004 godz. 15:20 $T_z = 45,2 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_p = 41,5 \text{ }^\circ\text{C}$ $F = 16 \text{ t/h}$ $T_w = 5 \text{ }^\circ\text{C}$
 $K_1 = 4604,4 \text{ W/}^\circ\text{C}$ $L_1 = 2964,1 \text{ W/}^\circ\text{C}$

Z kolei na podstawie tych danych można wyznaczyć kryzowanie instalacji. Otrzymuje się wtedy następujące przepływy: $F_1 = 7,44 \text{ t/h}$, $F_2 = 34,51 \text{ t/h}$, $F_3 = 8,05 \text{ t/h}$.

W podobny sposób można by uzyskać kryzowanie instalacji obejmującej wszystkie budynki, jednak problem w tym, że nie wszystkie budynki podłączone do głównego wymiennika ciepła są monitorowane.

ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAVILONÓW AGH)

Model symulacyjny do sterowania dystrybucją energii cieplnej



Rys.18. Model zrealizowany w Matlabie-Simulinku systemu dystrybucji energii cieplnej w układzie 3 budynków

ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

Model dynamiczny budynku jest pewnym rozbudowaniem modelu statycznego (1) do postaci układu 2 równań:

$$\begin{cases} Fc_w(T_z - T_{pom}) \left[1 - e^{-\frac{L}{Fc_w}} \right] - (T_{pom} - T_m)2K = M_p c_p \dot{T}_{pom} \\ (T_{pom} - 2T_m + T_w)2K = M_m c_m \dot{T}_m \end{cases} \quad (4)$$

gdzie,

M_p – masa powietrza w całym budynku

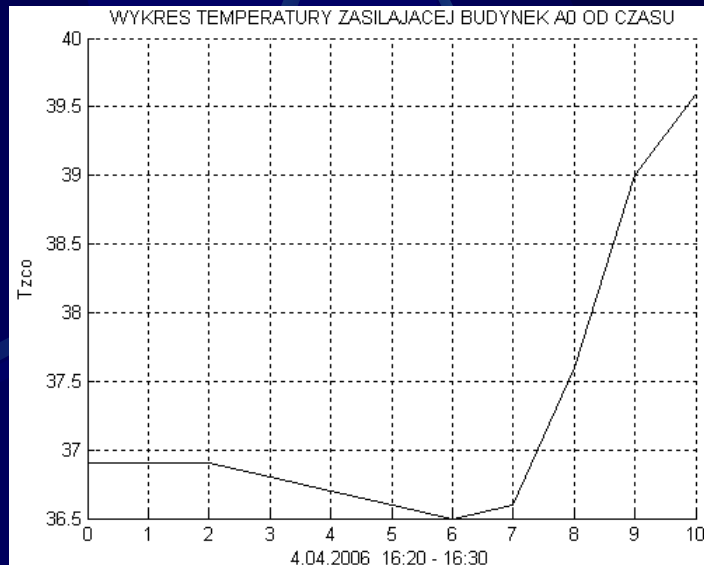
M_m – masa murów

c_p – ciepło właściwe powietrza

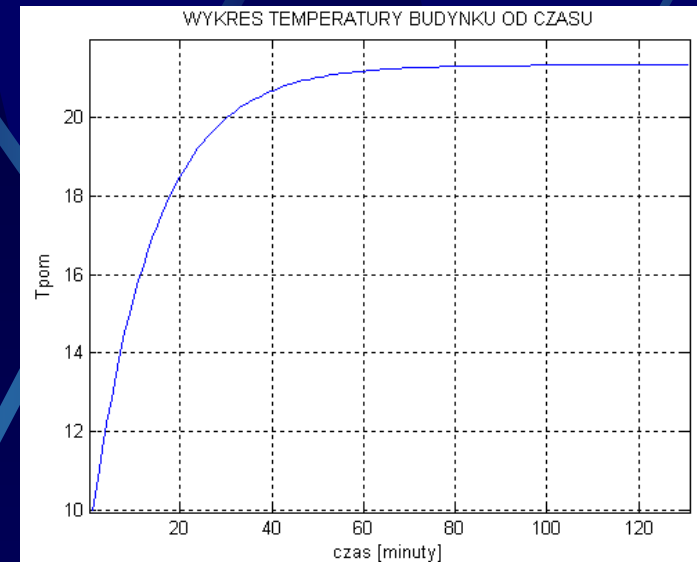
c_m – ciepło właściwe murów

T_m – temperatura murów

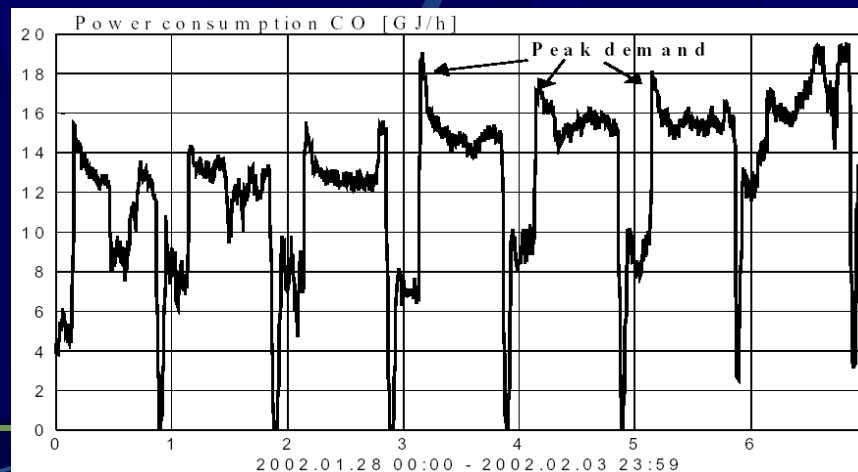
ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)



Rys.19. Wykres zmian temperatury zasilającej budynek A0. Dane były rejestrowane co minutę



Rys.20. Przykład symulacyjny zmian temperatury budynku w czasie, bazujący na modelu dynamicznym budynku



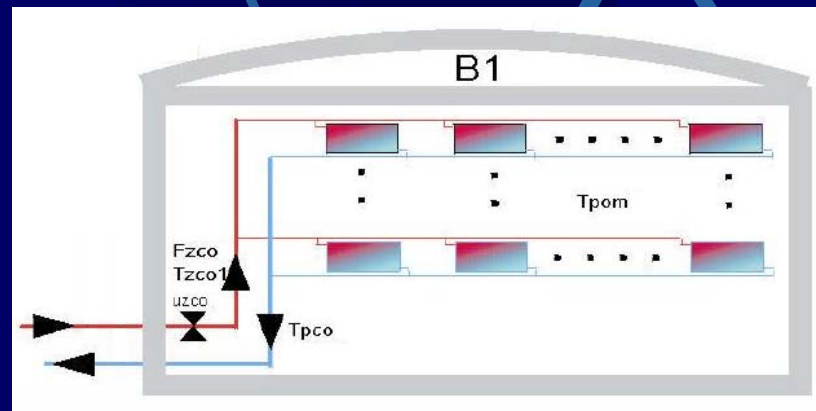
Rys.21. Pobór mocy wszystkich budynków

ALGORYTMY STEROWANIA DYSTRYBUCJĄ ENERGII CIEPLNEJ (PRZYKŁAD KOMPLEKSU PAWILONÓW AGH)

W stanie ustalonym budynki powinny mieć zawory regulacyjne ustawione tak, aby realizować kryzowanie. Problem pojawia się jednak gdy następuje zmiana wartości zadanej dla T_z , po to aby zmienić temperatury panujące w budynkach. Wówczas trzeba wziąć pod uwagę to, że jedne budynki znajdują się bliżej a inne dalej od wymiennika. Wobec tego, gdy chce się uzyskać zmianę temperatur w budynkach o określonej godzinie, trzeba zacząć dostarczać ciepłą wodę wcześniej, biorąc pod uwagę czas transportu wody rurociągami od wymiennika do danego budynku. Pojawia się również inny problem, mianowicie istnieje ograniczenie na chwilową moc wymiennika ciepła. Przy podnoszeniu temperatury budynków nad ranem, następuje przeregulowanie wartości zapotrzebowania na moc, które momentami jest większe niż maksymalna moc pracy wymiennika. Aby jednak można było zrealizować takie przeregulowania na poziomie poszczególnych budynków, należy je zacząć dogrzewać w różnych chwilach, tak aby nie przeciążać wymiennika.

Model zużycia energii cieplnej przez budynek dla różnych strategii sterowania

Rozważania będą koncentrować się na analizie pojedynczego budynku. Analiza ta obejmuje budynek B1, w którym znajduje się Katedra Automatyki. Przepuszcza się, że pozostałe budynki mają analogiczne właściwości.



Rys.22. Schemat układu grzewczego budynku

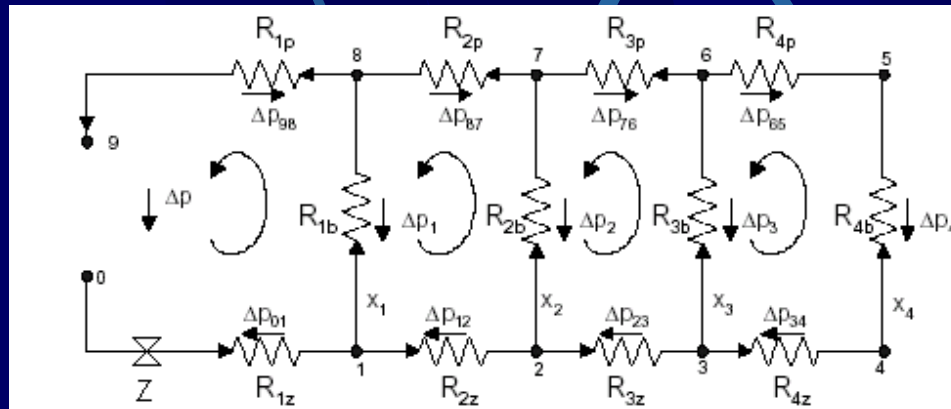
Przedmiotem dalszych badań jest analiza dwóch strategii sterowania lokalnego:

- realizacja stałego w czasie przepływu wody grzewczej (I)
- realizacja maksymalnego przepływu z okresowym otwieraniem i zamykaniem zaworu (II)

Obie strategie realizują jednakowy średni w czasie przepływ.

Model zużycia energii cieplnej przez budynek dla różnych strategii sterowania

Wadą strategii (I) jest to, że pomieszczenia grzane są nierównomiernie, z deficytem dla pomieszczeń odległych, a z nadmiarem dla pomieszczeń bliskich (rys.3). Strategia (II) realizuje grzanie bardziej równomierne. Wymaga ona jednak ciągłego otwierania i zamykania zaworu, co przyczynia się do jego przedwczesnego zużycia. Tej wady nie posiada strategia (I).



Rys.23. Schemat układu grzejników w różnych pomieszczeniach

Na drodze teoretycznej wykazano, że istotnie strategia (II) daje grzanie bardziej równomierne pomimo, że w obu strategiach realizowano jednakowy, średni w czasie przepływ. Kluczem do zrozumienia tego jest analiza następującego wzoru na moc dostarczaną z grzejnika w danym pomieszczeniu:

Model zużycia energii cieplnej przez budynek dla różnych strategii sterowania

$$P(F) = Fc_w(T_z - T_p) \quad (5)$$

gdzie,

P – moc dostarczona

F – przepływ wody grzewczej

T_z – temperatura wody zasilającej

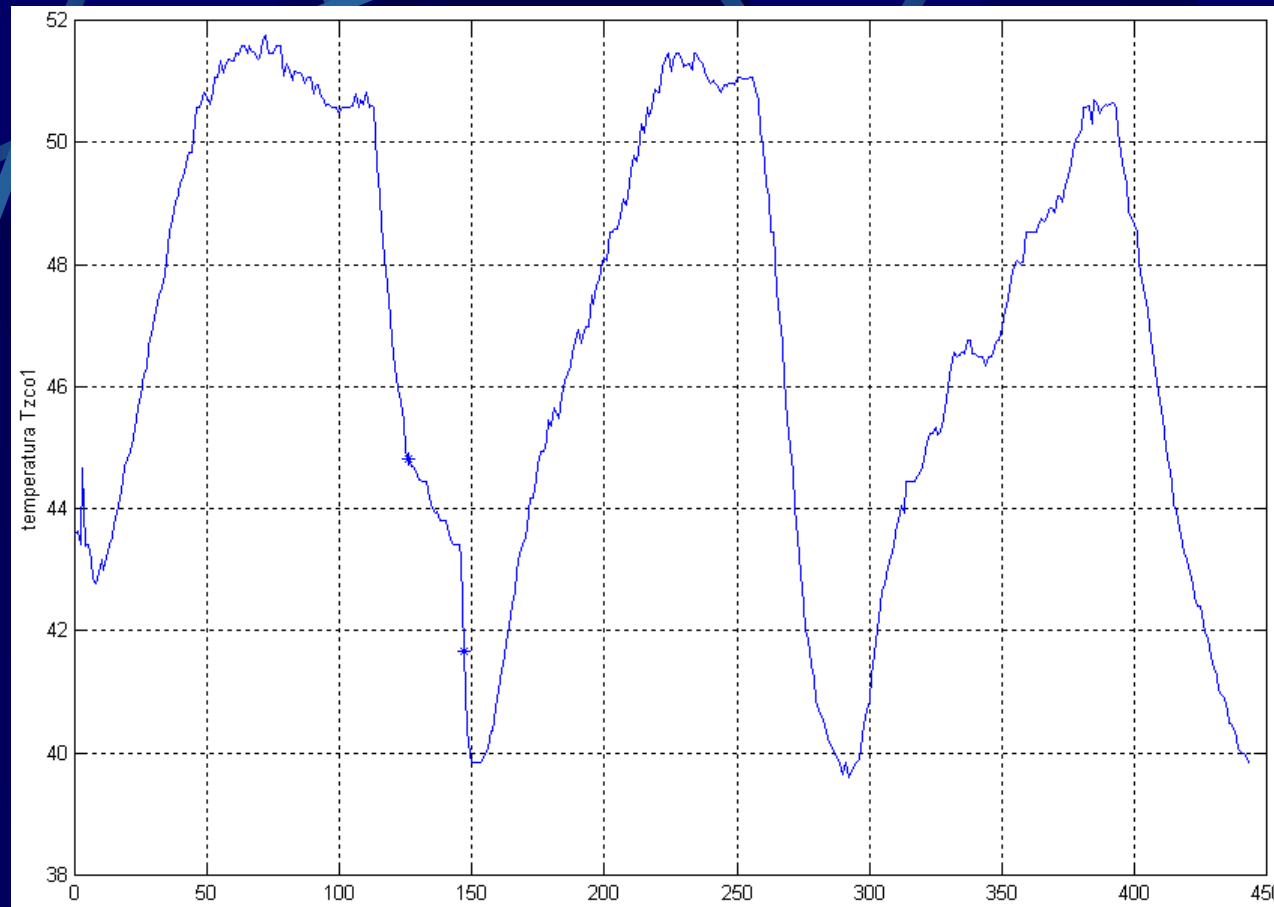
T_p – temperatura wody powrotnej

C_w – ciepło właściwe wody

Formuła (5) wydaje się na pierwszy rzut oka liniowa względem F. Tak jednak nie jest, gdyż zarówno T_z jak i T_p zależą od F. Zależności te są dość złożone i zostały wyjaśnione w pracy badawczej.

W dalszej części pracy badawczej potrzebne było wykonanie eksperymentu polegającego na całkowitym zamknięciu zaworu w budynku B1. Przebieg temperatury zasilającej budynek B1 przedstawia rysunek 24.

Model zużycia energii cieplnej przez budynek dla różnych strategii sterowania



Rys.24. Przebieg temperatury T_{zco1} począwszy od dnia 24.III.2005 14:11. Odstęp między kolejnymi próbkami wynosi 10 minut. Gwiazdkami oznaczono miejsca kiedy zawór był zamknięty

Model zużycia energii cieplnej przez budynek dla różnych strategii sterowania

Eksperymenty potwierdzają fakt, że dalsze kaloryfery są słabiej grzane. Gdy realizowana była (I) strategia sterowania, zaobserwowano również, że niektóre pomieszczenia z odległymi grzejnikami były zbyt chłodne. To stało się powodem porzucenia stosowania tejże strategii, być może był to powód niedostatecznie uzasadniony. Celem dalszych badań autora będzie dokładniejsza weryfikacja stosowania strategii (I). Przebadane zostaną możliwości jej stosowania przy innych konfiguracjach zaworów na poszczególnych grzejnikach.

STEROWANIE SIECIAMI CIEPŁOWNICZYMI

Dziękuję
za
uwagę

Wojciech Kreft