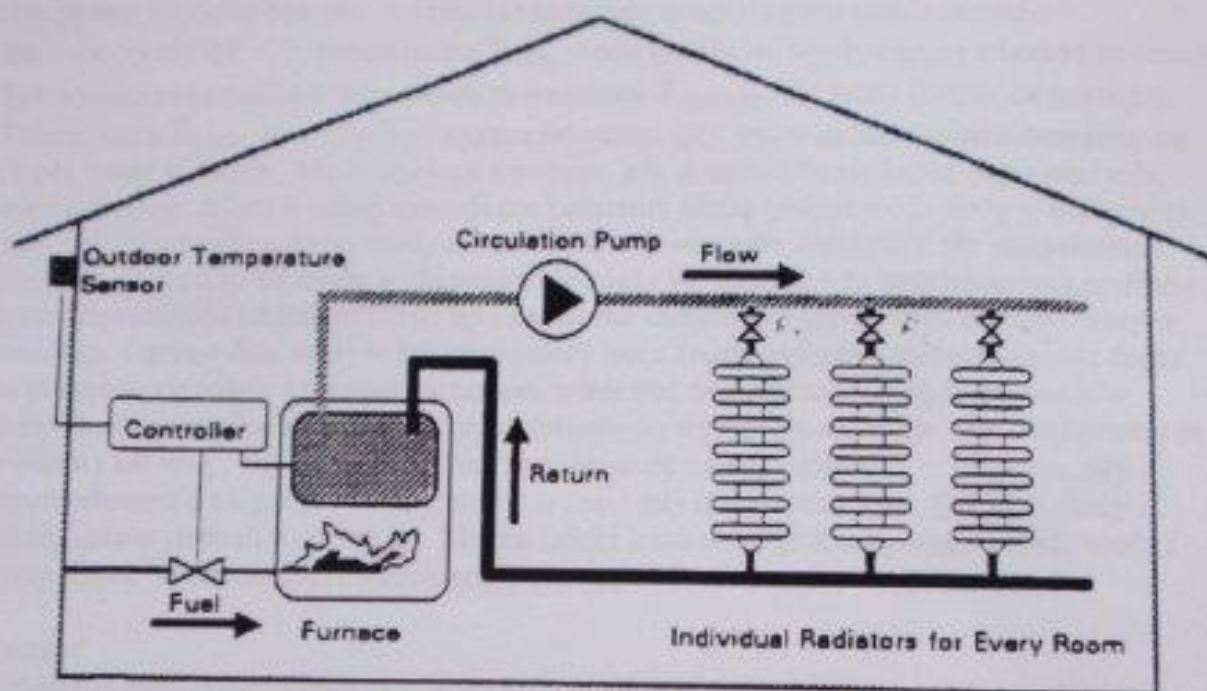


## INTELIGENTNY SYSTEM STEROWANIA OGRZEWANIEM DOMU BEZ MIERNIKA TEMPERATURY ZEWNĘTRZNEJ

W wielu domach jednorodzinnych stosowany jest system centralnego ogrzewania zasilany z boileru podgrzewanego olejem opalowym. Systemy takie produkowane są i instalowane w domach przez wiele specjalistycznych firm na całym świecie. Są one bardzo popularne ze względu na łatwość transportu oleju w porównaniu z transportem węgla. Ze względu na powszechność ich stosowania można je nazwać systemami konwencjonalnymi. Schemat takiego systemu pokazany jest na [Rys. 1].



Rys.1. Schemat konwencjonalnego systemu ogrzewania domu.

Oznaczenia: *Outdoor Temperature Sensor* - miernik temperatury zewnętrznej domu  $T_{\text{outdoor}}$ , *Controller* - sterownik, *Fuel* - dopływ paliwa, *Furnace* - piec wraz ze zbiornikiem ogrzewanej wody, *Circulation pump* - pompa wywołująca obieg wody w systemie grzewczym, *Flow* - przepływ gorącej wody ze zbiornika do grzejników, kranów, etc, *Return* - strumień wody powracającej z grzejników do zbiornika, *Individual Radiators for Every Room* - indywidualne grzejniki w poszczególnych pokojach domu.

Cały system ogrzewania domu składa się z 2 systemów składowych: z nadrzędnego systemu sterowania temperaturą wody w boilerze ( w zbiorniku boileru) oraz z systemu regulacji temperatury w poszczególnych pomieszczeniach domu. Te dwa systemy składowe należy odróżnić. Regulacja temperatury w poszczególnych pomieszczeniach domu realizowana jest przez regulatory temperatury umieszczone przy każdym grzejniku pokojowym. Mieszkaniec danego pokoju nastawia na swoim regulatorze pokojowym taką temperaturę jaka mu odpowiada a regulator zapewnia tą temperaturę zmniejszając bądź zwiększając dopływ gorącej wody do grzejnika jeśli temperatura w pokoju jest za niska lub też odcinając dopływ gorącej wody, gdy temperatura w pokoju jest za wysoka.

*Uwaga:* aby zapewnić w pokoju temperaturę np. 20° C temperatura wody dopływającej do grzejnika pokojowego musi być wyższa niż 20° C. Może wynosić np.: 40° C lub 90° C. Jeżeli temperatura ta będzie wynosić 90° C to grzejnik będzie w stanie zapewnić w pokoju temperaturę 20° C nawet wówczas, gdy temperatura zewnętrzna domu będzie bardzo niska (silny mróz) lub okno w pokoju będzie uchylone. Jednak przy tak wysokiej temperaturze wody grzewczej występują duże straty ciepła na rurach doprowadzających tą wodę do pomieszczeń domu. Zwiększa to znacznie koszty ogrzewania. Aby koszty te obniżyć, temperaturę wody grzewczej wytworzoną w centralnym boilerze należy obniżyć do niezbędnego minimum.

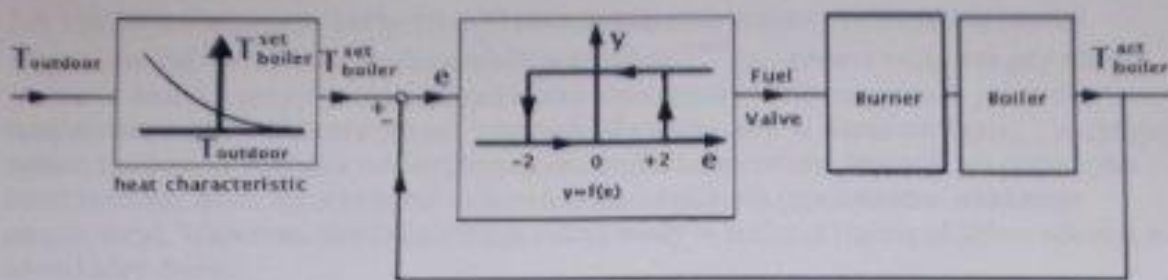
### **Ile minimum to powinno wynosić?**

Na pewno powinno być ono wyższe niż pożądana temperatura w pomieszczeniach (np.: więcej niż 20° C). Temperatura  $T_{\text{boiler}}$  wody grzewczej wypływającej z boileru powinna być wyższa zimą (niska temperatura zewnętrzna  $T_{\text{outdoor}}$ ) niż latem (ciepło na zewnątrz). Temperatura  $T_{\text{boiler}}$  powinna być wyższa wówczas, gdy jest większe **zapotrzebowanie na ciepłą wodę w domu**. Ma to miejsce wówczas, gdy domownicy się kąpią, myją naczynia, wietrzą pokoje. Jeżeli w takiej sytuacji nie będziemy silniej podgrzewali wody w boilerze to przy dużym poborze gorącej wody zimna woda wlewana do zbiornika dla uzupełnienia poziomu spowoduje że woda w zbiorniku nie zdąży się nagrzać i do pomieszczenia popłynie woda zbyt chłodna co uniemożliwi np.: kąpiel lub utrzymanie odpowiedniej temperatury w pokojach. Ogrzewanie wody w boilerze należy więc zwiększyć gdy zapotrzebowanie domu na gorącą wodę rośnie (a nawet wcześniej, ponieważ nagrzewanie dużej ilości wody w zbiorniku trwa pewien czas). Duże zapotrzebowanie występuje wówczas, gdy domownicy są w domu i nie śpią. Ogrzewanie boileru i temperaturę należy natomiast zmniejszać, gdy zapotrzebowanie na gorącą wodę jest niskie, np.: gdy domownicy śpią, gdy są w pracy i szkole, gdy wyjechali na urlop itd. Można dzięki temu obniżyć koszty nagrzewania wody i straty ciepła w rurach doprowadzających gorącą wodę do pomieszczeń.

#### *Uwaga!*

Omawiany tutaj optymalizujący system sterowania nie dotyczy sterowania temperatury w poszczególnych pomieszczeniach domu. Dotyczy on sterowania temperaturą wody w boilerze  $T_{\text{boiler}}$  w celu dostosowania jej do zmiennego zapotrzebowania i do zmniejszenia strat ciepła z rur doprowadzających, a przez to, do obniżenia kosztów ogrzewania domu. Omawiany system sterowania o nazwie **DUOMATIC - FL** został opracowany przez niemiecką firmę *Viessmann Werke GmbH & Co* i przedstawiony na targach *ISH* w 1993r. Od tego czasu jest udoskonalany. System ten jest specjalnym dodatkowym systemem optymalizującym (nakładką) do tradycyjnego, zainstalowanego w wielu domach systemu grzewczego, który steruje temperaturą wody w boilerze centralnym tylko w oparciu o zewnętrzną temperaturę domu  $T_{\text{outdoor}}$  [Rys.1] bez uwzględnienia zmiennego poboru gorącej wody z boileru, zależnego od czynności wykonywanych przez mieszkańców (kąpiel, mycie naczyń, wietrzenie pomieszczeń, sen, nieobecność w domu).

Ponieważ omawiany optymalizujący system sterowania jest nakładką optymalizującą działanie tradycyjnego systemu ogrzewania, system ten (tradycyjny) zostanie w dalszym ciągu omówiony.



Rys.2 Schemat tradycyjnego systemu sterowania temperaturą  $T_{boiler}^{set}$  wody w centralnym boilerze w oparciu o (tylko) temperaturę zewnętrzną  $T_{outdoor}$  domu.

$T_{boiler}^{act}$  – aktualna temperatura wody w boilerze

$T_{boiler}^{set}$  – zadana (pożądana) temperatura wody boilerza

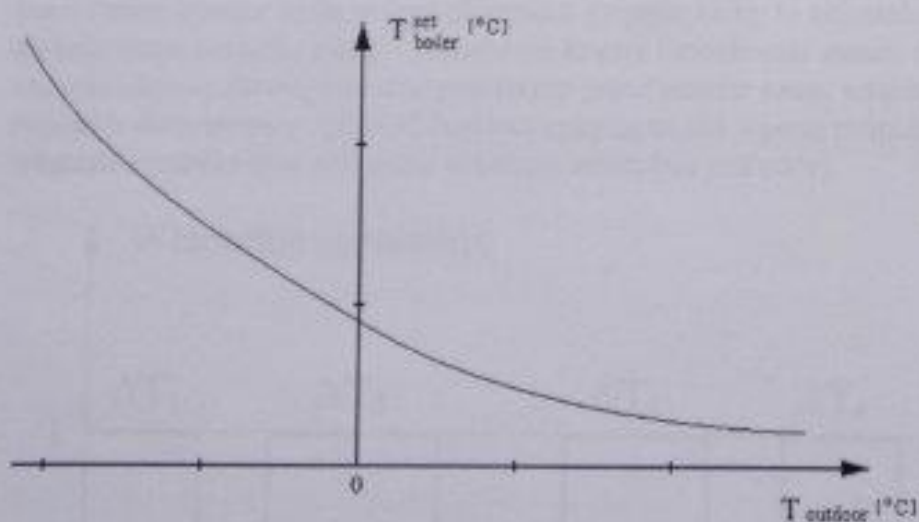
– błąd temperatury wody w boilerze

Fuel Valve – zawór sterujący dopływem oleju opałowego do palnika (burner).

Tradycyjny system sterowania piecem (furnace) nastawia temperaturę  $T_{boiler}^{set}$  zadaną wody w boilerze zależnie od zewnętrznej temperatury  $T_{outdoor}$  domu.

$$T_{boiler}^{set} = f(T_{outdoor})$$

Powyzsza zależność przedstawiona jest na [Rys.3]



Rys.3 Charakterystyka zadanej temperatury wody w boilerze  $T_{boiler}^{set}$  w zależności od zewnętrznej temperatury domu  $T_{outdoor}$  [ °C ]

Jak wynika z charakterystyki na [Rys.3] przy niskiej temperaturze zewnętrznej (mroz) nastawiana jest wysoka temperatura wody w boilerze  $T_{boiler}^{set}$  (nawet wówczas gdy nikogo nie ma w domu) a przy wysokiej temperaturze zewnętrznej (lato) nastawiana jest niska temperatura wody w boilerze (nawet wówczas gdy wiele osób w domu się kąpie). Tradycyjny system sterowania korzysta z zewnętrznego miernika temperatury. Miernik ten podwyższa koszt systemu, może się też zepsuć całkowicie lub częściowo (nieokładne wskazania temperatury). Wówczas, sterowanie temperaturą wody w boilerze będzie błędne – odczują to mieszkańcy domu.

### Jak działa dwustanowy regulator palnika boileru?

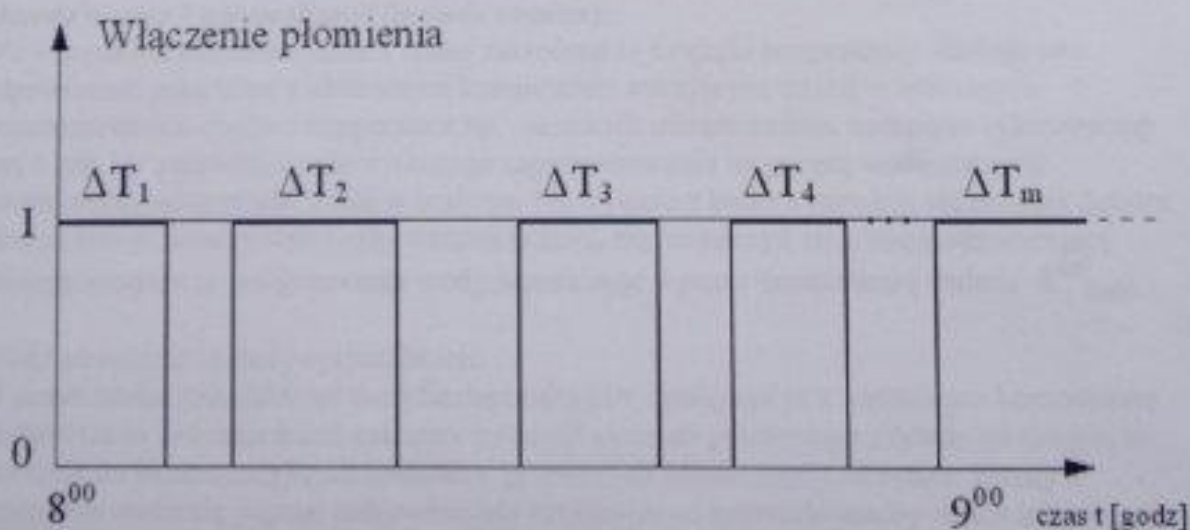
Regulator otrzymuje informację o wartości błędu □ temperatury  $T_{boiler}^{act}$  wody w boilerze

$$e = T_{boiler}^{set} - T_{boiler}^{act}$$

Jeżeli aktualna temperatura wody  $T_{boiler}^{act}$  jest znacznie niższa od temperatury zadanej, regulator włącza płomień palnika i podgrzewa wodę tak długo, aż jej temperatura przewyższy temperaturę zadaną  $T_{boiler}^{set}$  o więcej niż  $2^{\circ}C$ . Wówczas regulator wyłącza płomień i woda się schładza. Jeżeli jej temperatura obniży się o więcej niż  $2^{\circ}C$  względem temperatury  $T_{boiler}^{set}$  regulator włącza płomień palnika i woda podgrzewa się. Widoczna na [Rys.2] histereza regulatora ( $\pm 2^{\circ}C$ ) została wprowadzona po to, aby zapobiec zbyt częstemu włączaniu się i wyłączeniu płomienia np.: już wtedy gdy błąd temperatury byłby równy  $0.001^{\circ}C$ . Dzięki dopuszczeniu tolerancji [ $+2^{\circ}C / -2^{\circ}C$ ] przełączanie palnika zachodzi rzadziej.

### Jak obliczyć optymalną wielkość zużycia oleju opałowego?

Aby obliczyć tę wielkość (potrzebną do optymalizacji – zmniejszenia zużycia oleju) nie jest koniecznym pomiar oleju w jego zbiorniku (wymagałoby to zainstalowania specjalnego dodatkowego czujnika oleju - dodatkowe koszty i możliwość awarii czujnika). Bieżące zużycie oleju opałowego można pomierzyć przez pomiar czasu włączania płomienia przez regulator dwustanowy [Rys.4] bowiem zużycie to jest wprost proporcjonalne do czasu włączania palnika (zużycie oleju w każdej sekundzie jest stałe).



Rys.4 Przykładowy diagram czasowy włączania się i wyłączenia palnika boileru.

## Aktualne zużycie energii (paliwa) przez boiler

$$AZEn = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta T_i [\text{sek}]}{3600[\text{sek}]} \cdot 100\%$$

$AZEn = 0\%$  - oznacza, że płomień był przez cały czas wyłączony (zerowe zużycie energii - paliwa)

$AZEn = 100\%$  - oznacza, że płomień był przez cały czas włączony (maksymalne zużycie energii - paliwa)

### Jakimi metodami można optymalizować działanie systemu ogrzewania domu?

Globalnym celem optymalizacji jest:

- (1) Zmniejszenie ilości zużytego paliwa przy jednoczesnym zapewnieniu takiej ilości gorącej wody, która jest w danej chwili potrzebna w domu dla właściwej realizacji potrzeb domowników (2)

Cel globalny obejmuje więc dwa cele składowe.

Nie może dojść do takiej sytuacji, że przy dużym zapotrzebowaniu na gorącą wodę (np.: zimą, gdy kilka osób bierze kąpiel jednocześnie) dostarczana będzie chłodna woda bowiem boiler nie zdąży jej nagrzać.

### Możliwe są dwie metody optymalizacji:

#### *Metoda numer 1 optymalizacji (metoda idealna):*

We wszystkich pomieszczeniach domu zakładane są czujniki temperatury. Zostają one odpowiednio połączone z centralnym komputerem sterującym. Jeżeli w niektórych pomieszczeniach spadnie temperatura np.: na skutek otwarcia okna, komputer informowany jest o tym i w przewidywaniu większego zapotrzebowania na gorącą wodę zaczyna intensywniej podgrzewać wodę w boilerze. Na wylocie z boileru instaluje się miernik poboru gorącej wody. Jeżeli pobór wody wzrasta (kąpiel, mycie naczyń etc), komputer sterujący inicjuje intensywne podgrzewanie wody nastawiając wyższą temperaturę zadaną  $T_{\text{boiler}}^{\text{set}}$

Wady powyższej metody optymalizacji:

W domu trzeba zainstalować dużą liczbę czujników i połączyć je z centralnym komputerem. Podwyższa to znacznie koszt zakupu i instalacji systemu grzewczego czyniąc go droгим w stosunku do konkurencyjnych systemów grzewczych oferowanych na rynku. Każdy z czujników może się popsuć całkowicie lub częściowo co spowodowałoby chaos informacyjny i niemożność sterowania lub złe sterowanie systemu przez komputer centralny. Komputer ten

aby optymalnie sterować podgrzewaniem wody w boilerze musi być wyposażony w skomplikowany model matematyczny całego domu, i boileru po to aby na jego podstawie sterować podgrzewaniem wody. Identyfikacja takiego modelu dla każdego domu byłaby czasochłonna (zdejmowanie charakterystyk grzewczych) i kosztowna. Dodatkowo podwyższałoby to koszt systemu grzewczego. W jaki więc inny sposób można optymalizować działanie systemu grzewczego? Możliwość taką daje metoda numer 2.

#### **Metoda numer 2 optymalizacji (metoda praktyczna):**

Metoda ta, zastosowana jest w omawianym systemie sterowania **DUOMATIC – FL**. Polega ona na inteligentnym, heurystycznym rozwiązaniu problemu. Rozwiązanie to ma charakter wręcz niewiarygodny, bowiem nie wymaga ona zakupu i instalacji **żadnych czujników!** Ani czujników temperatury do poszczególnych pomieszczeń domu, ani czujników temperatury zewnętrznej, ani czujnika poboru gorącej wody z boileru! Jak w tych warunkach, przy takim braku informacji można w ogóle sterować systemem grzewczym? Jest to możliwe dzięki użyciu wiedzy eksperckiej nabytej w długoletnim sterowaniu systemami grzewczymi oraz dzięki możliwości wprowadzenia tej wiedzy w formie zrozumiałej (logika rozmyta) dla komputera sterującego. W dalszym ciągu opisana zostanie koncepcja rozmytego sterownika systemu **DUOMATIC-FL** optymalizującego działanie tradycyjnego systemu przedstawionego na [Rys.1] i [Rys.2]

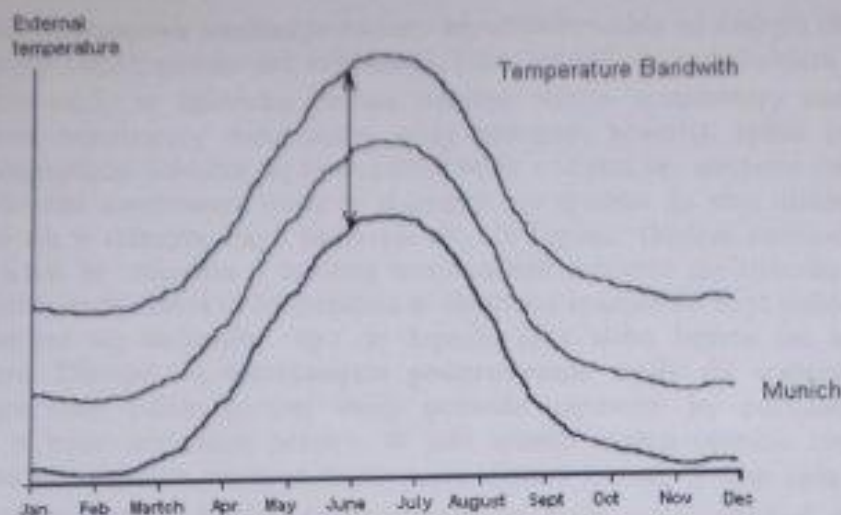
### **Koncepcja działania optymalizującego sterownika rozmytego systemu DUOMATIC – FL**

Sterownik rozmyty oblicza zadaną temperaturę wody w boilerze  $T_{boiler}^{set}$  (wielkość wyjściowa). Jeżeli temperatura ta ma wysoką wartość dwustanowy regulator boileru bardziej intensywnie nagrzewa wodę przez częstsze włączanie płomienia. Jeżeli zadana temperatura  $T_{boiler}^{set}$  jest niska, włączanie płomienia jest rzadkie i intensywność grzania niska. Do obliczenia optymalnej wartości zadanej temperatury wody w boilerze sterownik rozmyty wykorzystuje następujące informacje (zmiennne wejściowe):

1. Średnią dzienną temperaturę na zewnątrz domu  $T_{outdoor}^{aver}$  [ $^{\circ}$  C]
2. Aktualne, bieżące zużycie energii cieplnej (paliwa), w domu [%maksymalnego zużycia]
3. Średnio-terminową tendencję przewidywanej zmiany zapotrzebowania na energię cieplną w domu w okresie najbliższych godzin
4. Krótco-terminową tendencję przewidywanej zmiany zapotrzebowania na energię cieplną w domu w okresie najbliższych minut (kwadransów)
5. Średnie zużycie energii w domu w dniu wczorajszym [% maksymalnego zużycia]

Wyjaśnienia dotyczące poszczególnych zmiennych wejściowych sterownika

Ad.1. Średnia dzienna temperatura  $T_{outdoor}^{aver}$  na zewnątrz domu nie jest uzyskiwana z miernika temperatury lecz z danych statystycznych miejscowości, w której stoi dom. Przykład takiej informacji podany jest na [Rys.5].



Rys.5. Przykładowy wykres rocznej średniej dziennej temperatury powietrza w Monachium.

Dlaczego przy sterowaniu systemem grzewczym domu **nie musimy korzystać z pomiaru temperatury zewnętrznej** przy pomocy czujnika a wystarczy użycie średniej dziennej statystycznej temperatury wieloletniej? W poszczególnych miesiącach i dniach roku temperatury powtarzają się, są podobne. Różnice występujące w poszczególnych latach nie są duże. Dodatkowo (ważne!) **współczesne domy są ocieplane** co powoduje zmniejszenie wpływu temperatury zewnętrznej i zmian tej temperatury na temperaturę wewnętrzną domu (obecne domy są bardzo dobrze izolowane cieplnie od otoczenia). Dzięki temu, nieduży błąd oceny zewnętrznej temperatury domu pobranej z danych statystycznych względem rzeczywistej zewnętrznej temperatury domu nieznacznie tylko zmniejszy jakość optymalizacji systemu grzewczego. Dzięki temu, że nie instalujemy czujnika temperatury zewnętrznej obniżamy koszt systemu grzewczego i zwiększamy jego niezawodność.

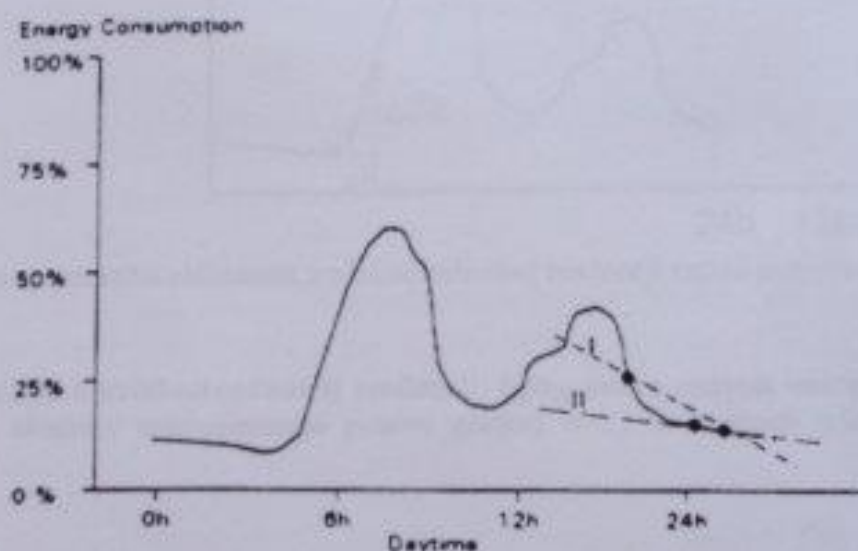
Ad.2. Informacja o **bieżącym zużyciu energii (paliwa) cieplnej** jest bardzo ważna, ponieważ przy dużym bieżącym zużyciu gorącej wody przez mieszkańców domu i grzejniki pokojowe należy zwiększyć intensywność podgrzewania wody i jej temperaturę. Aktualne zużycie energii AZEn obliczane jest na podstawie numerycznej informacji pochodzącej z 2-stanowego regulatora palnika boileru. Uzyskanie tej informacji **nie wymaga żadnych czujników**.

$$AZEn = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta T_i [\text{sek}]}{3600[\text{sek}]} \cdot 100\%$$

gdzie:

$\Delta T_i$  – okresy włączania palnika

Ad.3. Średnio-terminowa tendencja zmiany zapotrzebowania na energię ciepłą w domu w okresie najbliższych godzin jest informacją, która umożliwi wcześniejszą intensyfikację podgrzewania wody w zbiorniku boileru poprzez wzrost temperatury zadanej  $T_{\text{boiler}}^{\text{set}}$  (podwyższanie temperatury dużej masy wody następuje powoli). Jeżeli ze zbiornika o wysokiej temperaturze pobierze się pewną ilość wody a ubytek ten uzupełni dolaniem zimnej wody to całkowita temperatura wody w zbiorniku nie spadnie do zbyt niskiego poziomu i woda będzie się w dalszym ciągu nadawała np.: do kąpieli (będzie zadowalająco ciepła). Natomiast, jeżeli ze zbiornika o średniej temperaturze pobierze się znaczną ilość wody a ubytek uzupełni wodą zimną to temperatura w zbiorniku spadnie do zbyt niskiego poziomu i woda nie będzie się nadawała np.: do kąpieli, zbyt słabo będzie też ona ogrzewała pomieszczenia. Dlatego też **wcześniejsze podgrzewanie wody** do wyższej temperatury wyprzedzające duży pobór gorącej wody pozwala zapewnić jej pożądaną, minimalną temperaturę w razie większego poboru. W jaki sposób można określić tendencję zmian zapotrzebowania na gorącą wodę w konkretnym domu? Należy w tym celu zarejestrować aktualne zużycie energii AZEn danego domu w ciągu całej doby ( pomiar należy kilkakrotnie powtórzyć). Uzyskamy wówczas wykres podobny do tego, jak na [Rys.6].



- I – tendencja średnioterminowa  $tg\alpha_I$
- II – tendencja krótkoterminowa  $tg\alpha_{II}$

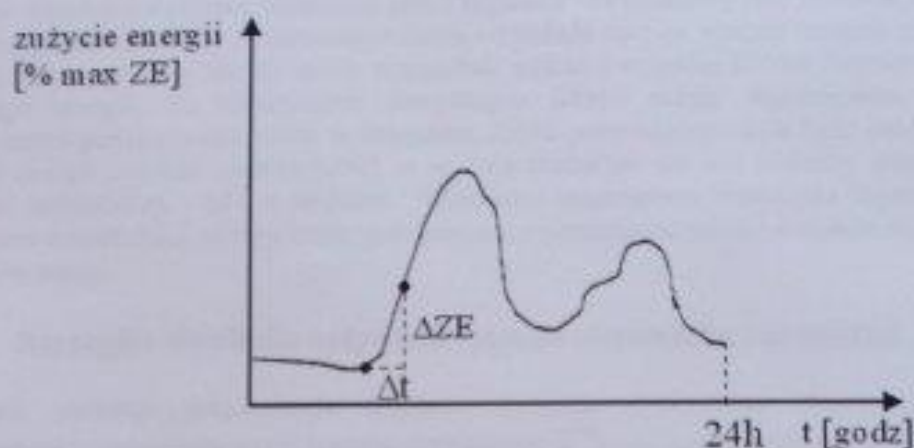
Rys.6. Przykładowy wykres zużycia energii ciepłej w domu w poszczególnych godzinach doby.

**Rozkład zużycia energii obrazują zwyczaje mieszkańców domu.** Wykres na [Rys.6] pokazuje, że największe zużycie energii jest w godzinach 6-9, kiedy mieszkańcy wstają, kąpią się, przygotowują śniadanie itd., oraz w godzinach 15-18 gdy powracają z pracy lub szkoły i przebywają w domu. Zużycie energii obniża się natomiast w nocy i podczas nieobecności mieszkańców w domu. Nie jest wówczas konieczne utrzymywanie zbyt wysokiej temperatury wody w zbiorniku boileru. Umożliwia to oszczędzanie paliwa. Znajomość średnio-terminowej tendencji zmian zużycia energii umożliwia wcześniejszą intensyfikację podgrzewania wody. Intensyfikacja ta nie musi być jednak drastyczna jeżeli wiemy, że na podgrzanie mamy kilka godzin czasu. Inaczej jest jednak, gdy przewidujemy dużą zmianę zapotrzebowania na gorącą wodę w krótkim okresie czasu, np.: jednego lub dwóch kwadransów. Wtedy intensyfikacja



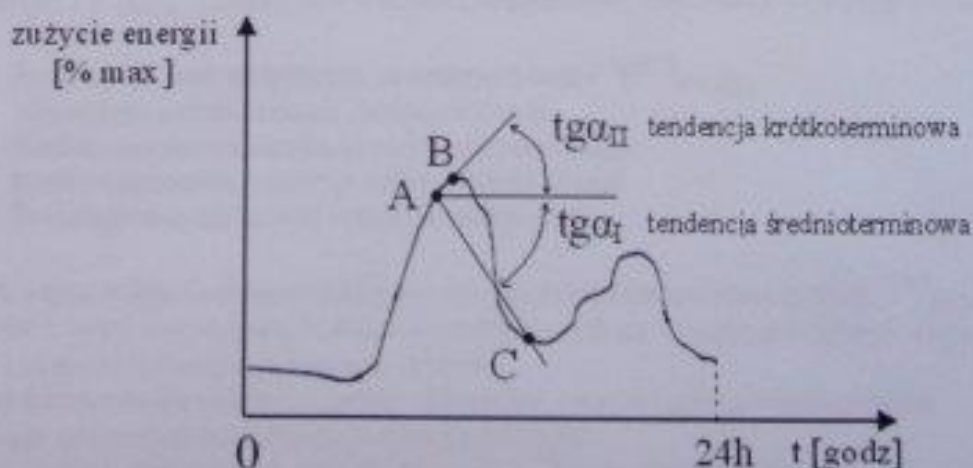
grzania musi być gwałtowna. Tendencje przewidywanej zmiany zapotrzebowania na energię można obliczyć z następującego wzoru [Rys.7]

$$\operatorname{tg}\alpha_I = \frac{\Delta \text{ zużycia energii}}{\Delta t \text{ [godz]}}$$



Rys.7. Ilustracja sposobu obliczania średnioterminowej tendencji zmian zużycia energii w domu.

Ad.4. Informacja o krótkoterminowej tendencji  $\operatorname{tg}\alpha_{II}$  zmian zużycia energii pozwala na uprzedzenie skutków znaczącego poboru gorącej wody w krótkich odstępach czasu. [Rys.8]



Rys.8. Ilustracja różnicy między sensem tendencji krótko- i średnio – terminowej

O ile po 3-4 godzinach może nastąpić spadek zużycia gorącej wody (punkty A i C) to w ciągu najbliższych 20-30 minut zapotrzebowanie na gorącą wodę może rosnać ( punkty A i B) co oznacza, że w krótkim terminie czasu ogrzewanie wody należy intensyfikować (w dłuższym zmniejszać). Na wykresach dziennego zapotrzebowania na gorącą wodę mogą występować krótkotrwałe wahania wynikające np.: ze zwyczaju wietrzenia jakiegoś pokoju o ściśle określonej porze lub z faktu, że pojedynczy mieszkaniec bierze kąpiel zawsze o tej samej godzinie. Wykorzystanie tendencji krótkoterminowej pozwala na przewidywanie krótkotrwałych zmian poboru gorącej wody i zapobieganie niekorzystnym, krótkotrwałym spadkom temperatury wody w zbiorniku boileru.

Ad.5. Wiedza o **średnim zużyciu energii w dniu wczorajszym**, wynikająca z zapisu okresów włączeń i wyłączeń płomienia przez regulator dwustanowy jest informacją o tym, czy mieszkańcy lub część mieszkańców domu wyjechała np.: na wczasy (spadek średniego zużycia dziennego) czy też do domu przyjechali goście i w jakiej liczbie (wzrost zużycia dziennego energii). Po stwierdzeniu powyższych faktów należy odpowiednio zmienić intensywność podgrzewania wody w zbiorniku. Jeżeli poprzedniego dnia było bardzo małe zużycie energii (wyjazd mieszkańców) to w dniu bieżącym nie ma potrzeby utrzymywać wysokiej temperatury wody w boilerze. Wystarczy temperatura minimalna zapobiegająca zbyt niemu schłodzeniu, zawilgoceniu pomieszczeń i utrzymania roślin i kwiatów domowych w dobrym stanie.

### Szczegóły działania optymalizującego sterownika rozmytego.

Sterownik rozmyty optymalizuje działanie systemu grzewczego domu, zmniejsza intensywność nagrzewania wody (zadana temperatura  $T_{boiler}^{set}$ ), gdy zapotrzebowanie domu na energię spada lub spadnie, a zwiększa tą intensywność, gdy zapotrzebowanie na energię rośnie lub będzie rosnać. Sterownik potrafi przewidywać przyszłe zapotrzebowanie na energię. Sterownik oblicza w optymalny sposób zadaną temperaturę  $T_{boiler}^{set}$  wody w boilerze. Jeżeli temperatura ta ma dużą wartość, regulator dwustanowy palnika będzie często włączał nagrzewanie wody, jeżeli małą wartość - rzadko. Optymalizujący sterownik musi „wiedzieć” jaką konkretnie wartość zadanej temperatury  $T_{boiler}^{set}$  wprowadzić do wewnętrznego konwencjonalnego układu regulacji temperatury boileru. Ogólnie wartość tej temperatury ( $T_{boiler}^{set}$ ) zależy od 5 wielkości wejściowych sterownika rozmytego, to jest:

1. Średniej dziennej temperatury zewnętrznej domu  $T_{outdoor}^{aver}$
2. Aktualnego zużycia energii cieplnej w domu
3. Średnio-terminowej tendencji zmian zużycia energii
4. Krótco-terminowej tendencji zmian zużycia energii
5. Średniego zużycia energii w dniu wczorajszym.

Wiedzy o tym, w jaki konkretnie ilościowy sposób zadana temperatura boileru  $T_{boiler}^{set}$  zależy od 5 wyżej wymienionych wielkości wejściowych sterownika, dostarczyć mogą tylko ludzie – eksperci systemów ogrzewania domów.

**Wiedza** taka uzyskana została od **grupy ekspertów** i wprowadzona do sterownika rozmytego systemu optymalizującego DUOMATIC-FL.

**Wiedza ta ma formę reguł słownych** informujących o tym, jaka ma być lingwistyczna wartość temperatury zadanej  $T_{boiler}^{set}$  w zależności od 5 wielkości wejściowych.

Baza wiedzy sterownika rozmytego składa się aż z **405 słownych reguł**, których nie ma potrzeby tutaj przytaczać. Dla tego podana zostanie tylko jedna przykładowa reguła z tej bazy.

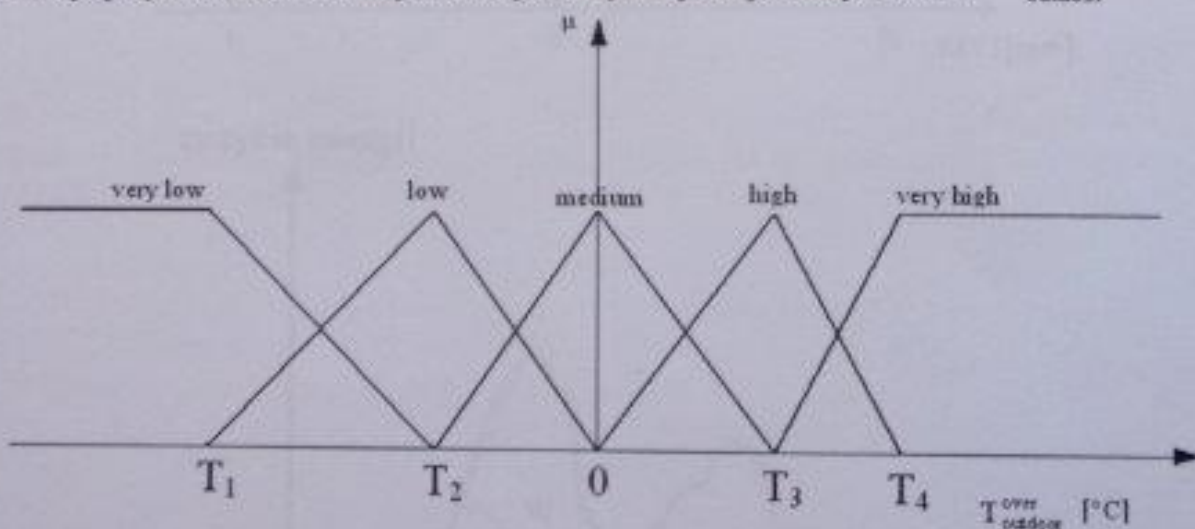
IF (bieżące zużycie energii jest niskie) AND (tendencja średnio-terminowa jest rosnąca) AND (tendencja krótko-terminowa jest malejąca) AND (przeciętne wczorajsze zużycie energii było średnie) AND (średnia temperatura zewnętrzna domu była bardzo niska) THEN (szacowane zapotrzebowanie na ciepło ( $T_{boiler}^{set}$ ) jest średnio-wysokie)

Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że zapotrzebowanie domu na ciepło jest równoważne zadanej temperaturze wody w boilerze  $T_{boiler}^{set}$ . W związku z tym wartość lingwistyczna np.: wysokie zapotrzebowanie na ciepło oznacza wysoką temperaturę  $T_{boiler}^{set}$

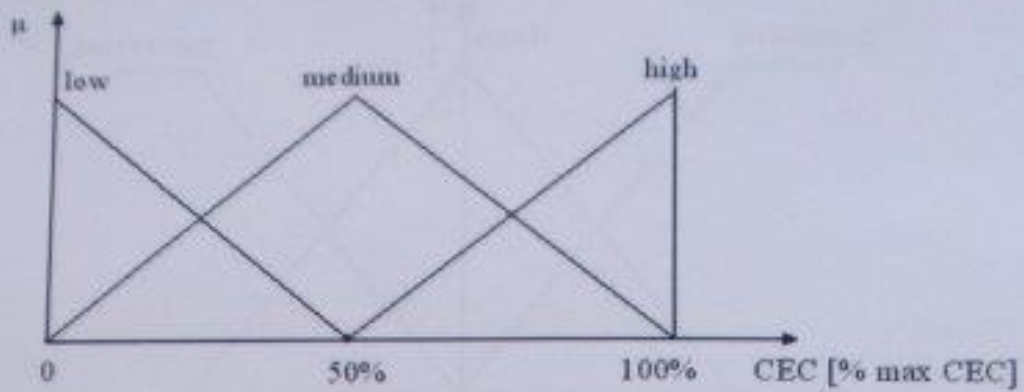
Wysokie zapotrzebowanie na ciepło → wysoka temperatura zadana  $T_{boiler}^{set}$   
 Średnie zapotrzebowanie na ciepło → średnia temperatura zadana  $T_{boiler}^{set}$   
 etc. ...

Sama baza wiedzy o prawidłowym sterowaniu boilerem w formie słownych reguł sterowania nie jest wystarczająca do uruchomienia sterownika rozmytego. Potrzebne są także definicje określeń lingwistycznych używanych do **oceny poszczególnych zmiennych w formie ich funkcji przynależności**. Funkcje te zostały zdefiniowane również na podstawie poglądów ekspertów sterowania systemami grzewczymi, którzy podali zarówno liczbę i nazwę ocen lingwistycznych każdej zmiennej jak i określili parametry (wartości modalne) każdej funkcji. Funkcje przynależności są więc także elementem wiedzy ekspertów. Funkcje przynależności ocen lingwistycznych przedstawione są poniżej.

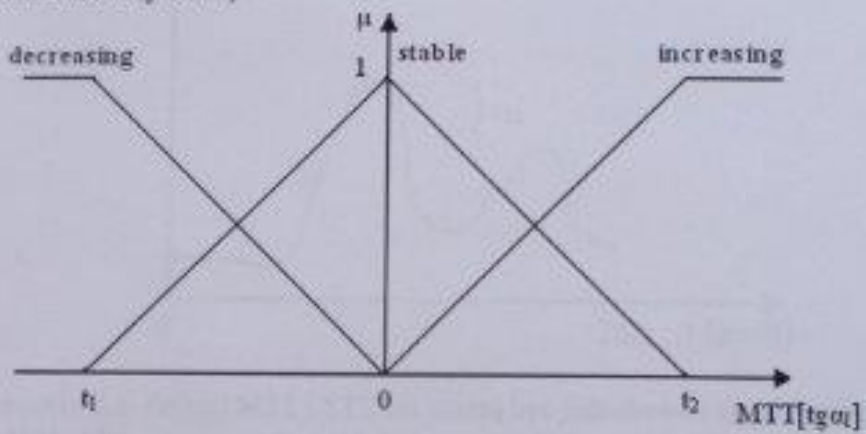
Funkcja przynależności średniej dziennej zewnętrznej temperatury domu  $T_{outdoor}^{aver}$



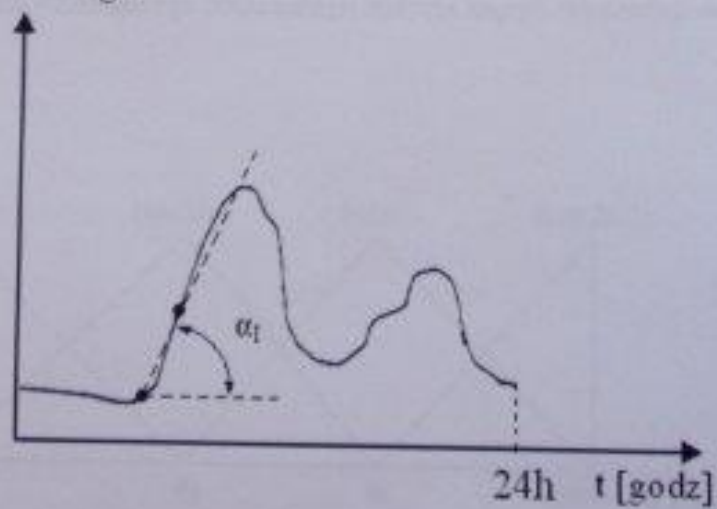
Funkcja przynależności bieżącego zużycia energii (current energy consumption CEC).



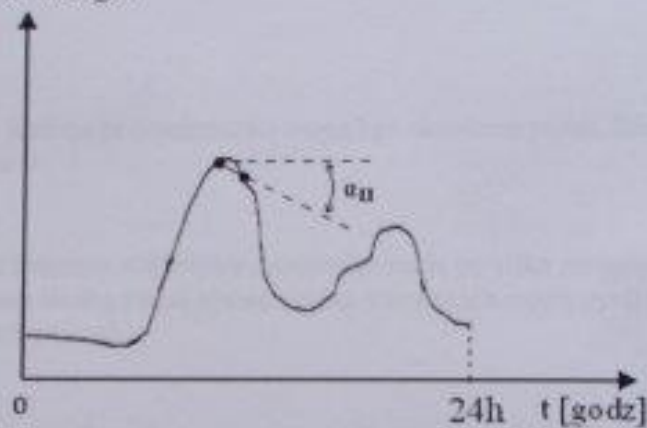
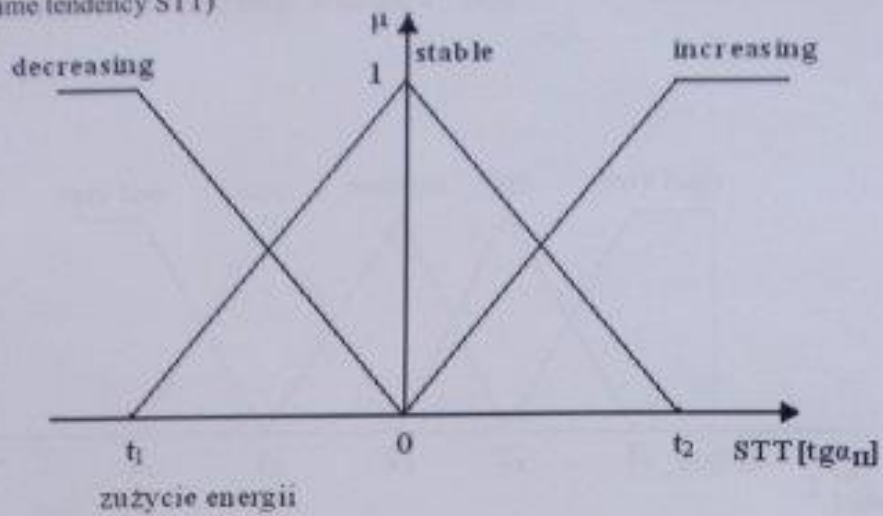
Funkcja przynależności średnioterminowej tendencji zmian zapotrzebowania na energię (medium-term tendency MTT)



zużycie energii

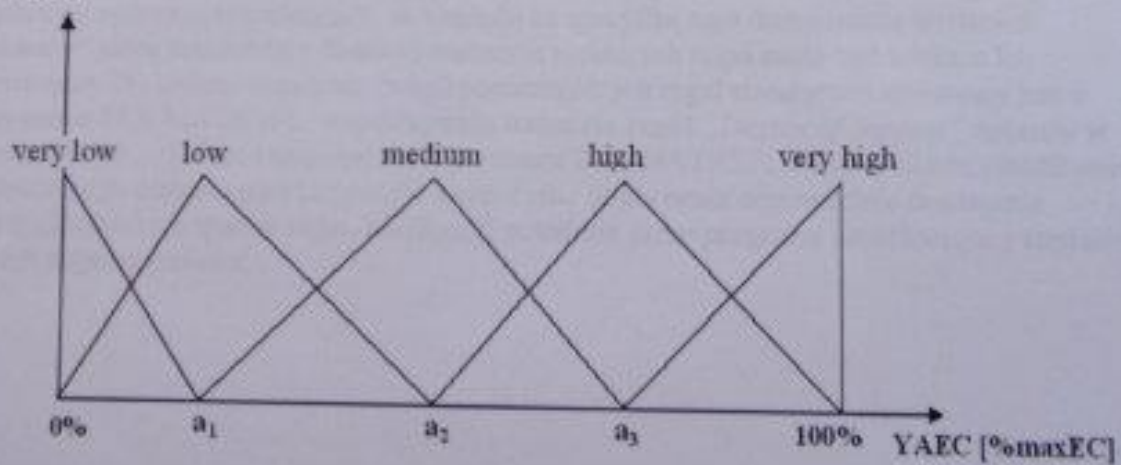


Funkcja przynależności krótkoterminowej tendencji zmian zapotrzebowania na energię (short-time tendency STT)

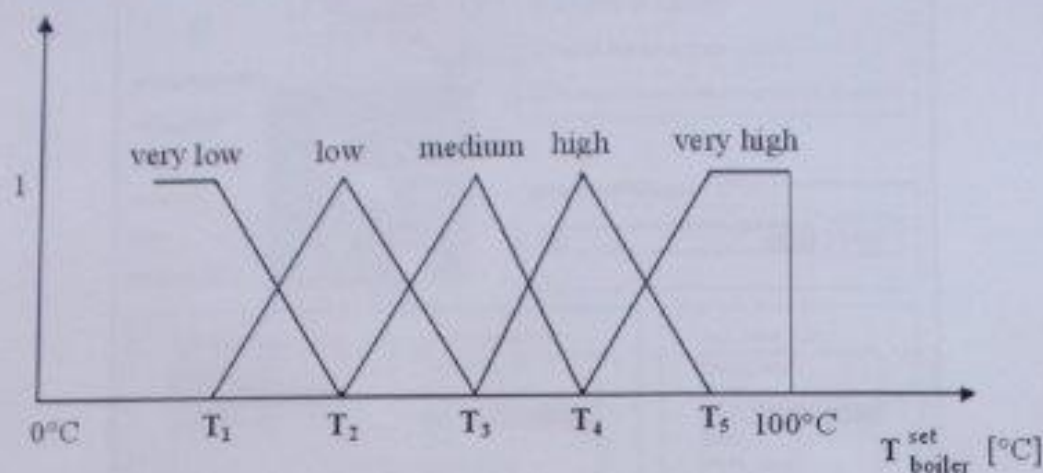


Uwaga! Parametry  $t_1, t_2$  funkcji MTT i STT nie muszą być jednakowe i symetryczne. Zależy to od opinii ekspertów.

Funkcja przynależności wczorajszego przeciętnego zużycia energii (yesterday average energy YAEC)



Funkcja przynależności szacunkowego zapotrzebowania na energię ( wielkość wyjściowa) (estimated heat requirement EHR w formie  $T_{boiler}^{set}$ ).

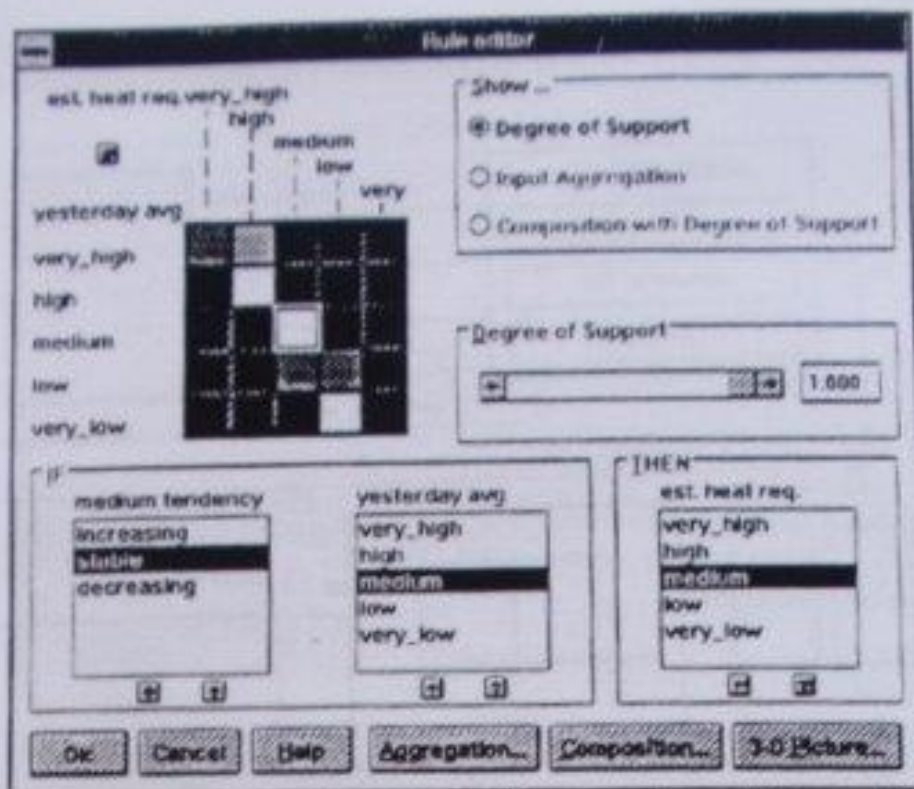


*Uwaga* – poszczególne funkcje przynależności mogą być niesymetryczne. Ich parametry zależą od opinii ekspertów.

Ponieważ poszczególne zmienne wejściowe sterownika mają po kilka zmiennych lingwistycznych to **łączna liczba reguł** równa liczbie wszystkich możliwych kombinacji wartości lingwistycznych wynosi:

$$5 \times 3 \times 3 \times 3 \times 5 = 405$$

Przy tak wielkiej liczbie reguł sterowania eksperci formujący reguły mogą niektóre z nich podać niedokładnie. Poza tym w przypadku konkretnego domu w którym instaluje się rozmyty system optymalizujący, ze względu na specyfikę tego domu (różne wielkości domów, różne architektury domów) znaczenie niektórych reguł może być większe lub mniejsze. Do zmiany znaczenia (wagi) poszczególnych reguł sterujących stosowany jest w systemie DUOMATIC-FL **współczynnik wsparcia reguł** „Degree of Support” zmienny w zakresie  $[0, 1]$ . Przed uruchomieniem systemu DUOMATIC-FL specjaliści mają możliwość dokładnego dopasowania bazy reguł do specyfiki domu przez odpowiednie dostrojenie współczynnika wsparcia reguł. Na [Rys.9] pokazano ekran programu umożliwiający strojenie tych współczynników.



Rys.9. Ekran programowy do strojenia współczynnika wsparcia reguł (Degree of Support)

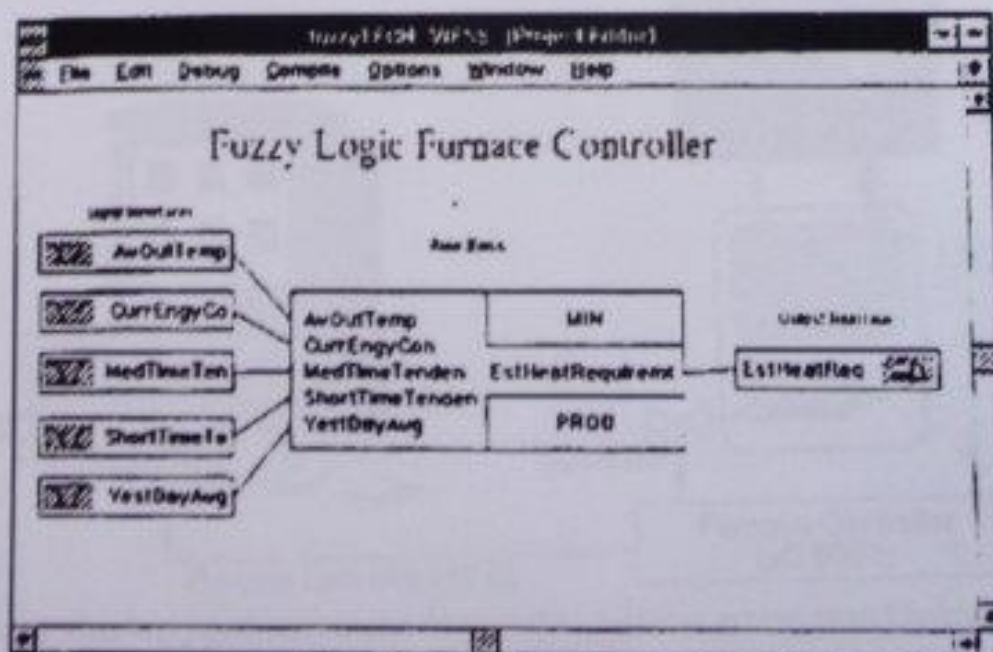
W optymalizującym sterowniku rozmytym operacje logiczne realizowane są w najprostszych metodach w celu zmniejszenia nakładu obliczeniowego.

Operacja AND - operator MIN lub PROD

Operacja OR - operator MAX

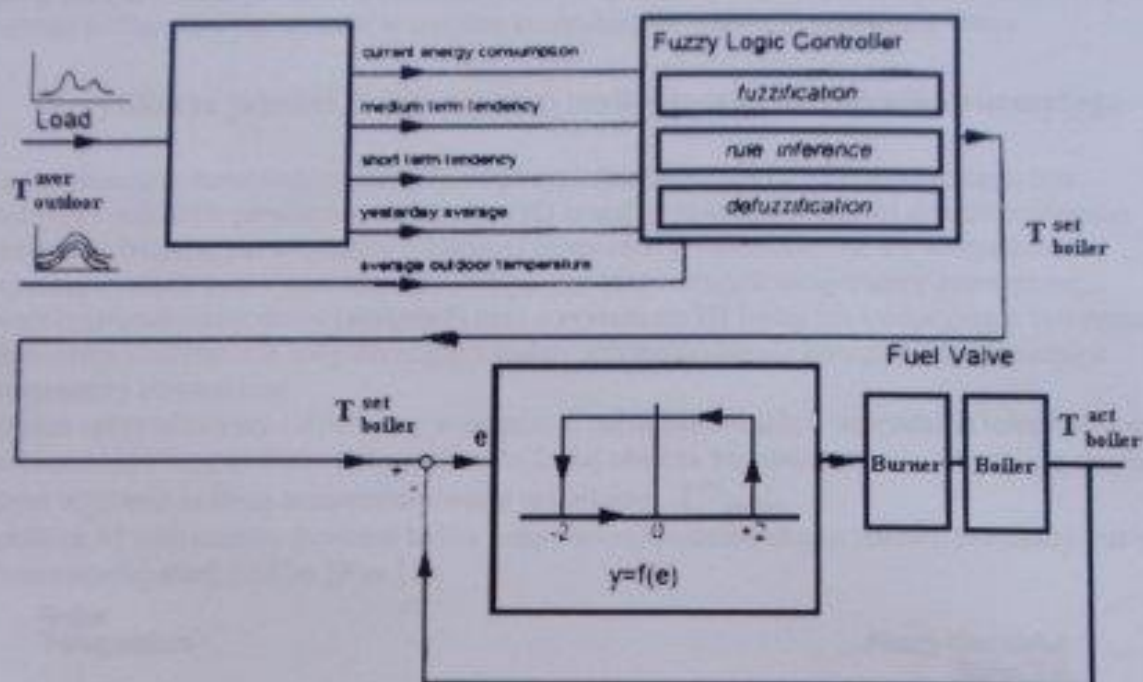
Defuzyfikacja - Center of Max

Wielkości wejściowe i wielkości wyjściowe sterownika rozmytego pokazane są na [Rys.10]



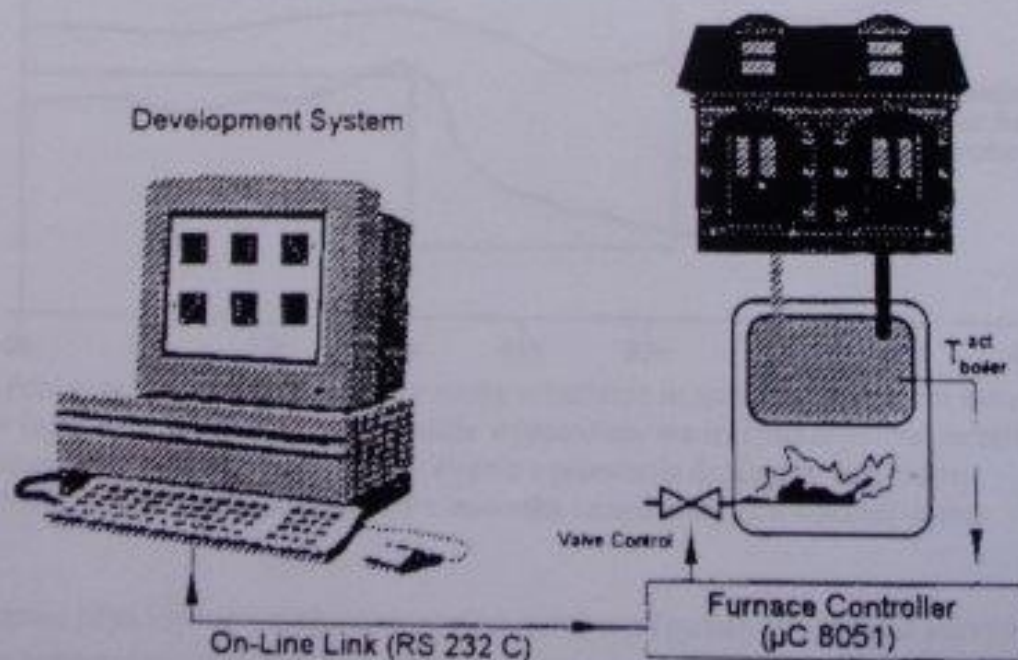
Rys.10. Ekran programowy z wielkościami wejściowymi i wielkościami wyjściowymi rozmytego sterownika optymalizującego system grzewczy domu.

Na [Rys.11] pokazano sposób podłączenia sterownika rozmytego do istniejącej instalacji grzewczej z dwustanowa regulacją temperatury wody w boilerze.



Rys.11. Schemat podłączenia sterownika rozmytego do optymalizowanego systemu grzewczego domu.

Przed podłączeniem sterownika rozmytego do instalacji grzewczej konkretnego domu najpierw łączy się z tą instalacją komputer z bazą reguł sterownika rozmytego [Rys.13]



Rys.12. Układ adaptacji reguł sterownika do specyfiki systemu grzewczego konkretnego domu.



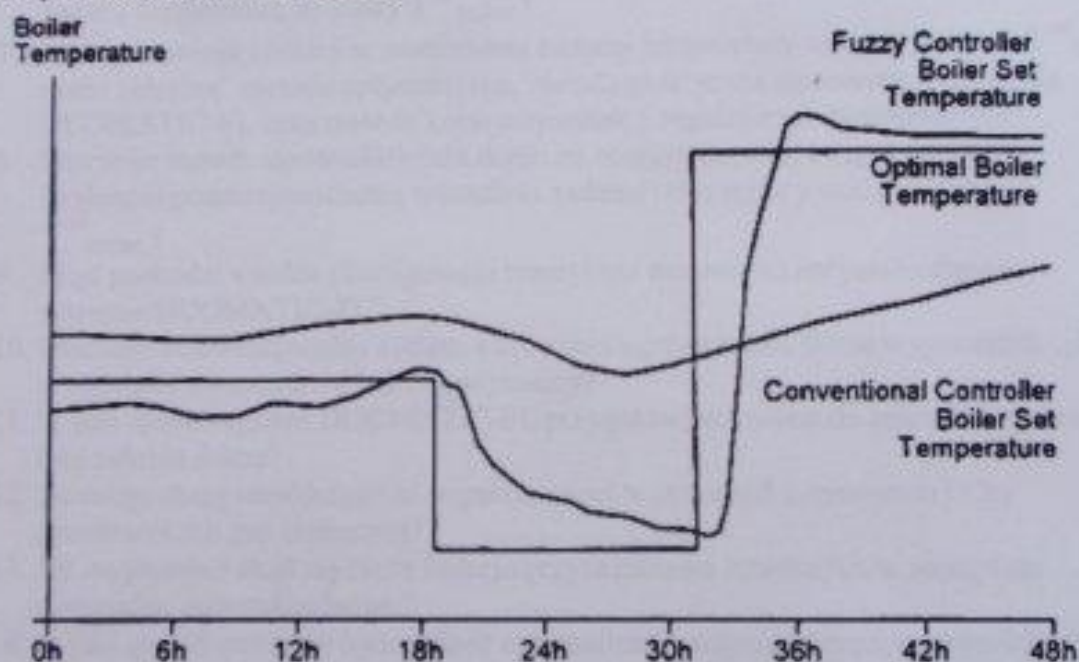
Specjalista w okresie kilku dni rejestruje charakterystykę zapotrzebowania na energię danego domu w ciągu całej doby, wprowadza do komputera roczną charakterystykę temperaturową miejscowości w której stoi dom, dostraja współczynniki wsparcia regul. Następnie gotowy program sterowania przenosi z komputera (development system) do mikroprocesora, który zostaje podłączony już na stałe w miejsce komputera do instalacji grzewczej domu.

### Weryfikacja jakości działania optymalizującego sterownika rozmytego

Optymalizujący sterownik rozmyty taniego systemu DUOMATIC-FL działającego bez żadnych czujników pomiarowych (**system II**) został porównany z bardzo drogim systemem sterownia działającym w oparciu o czujniki temperatury zainstalowane we wszystkich pomieszczeniach testowego domu posiadającego także czujnik temperatury zewnętrznej i model matematyczny domu (**system I**) oraz z **systemem III** będącym tradycyjnym systemem sterowania boilerem nie wyposażonym z żaden optymalizator ale korzystający z miernika temperatury zewnętrznej.

System optymalizujący I działający w oparciu o pełną informację o wszystkich temperaturach pomieszczeń i temperaturze zewnętrznej najlepiej oblicza zapotrzebowanie na energię cieplną domu w formie zadanej temperatury wody w boilerze  $T_{boiler}^{set}$ .

Przebieg tej temperatury (optimal boiler temperature) podczas eksperymentu pokazany jest w formie prostokątnej linii na [Rys. 13].



Rys. 13. Porównanie zadanej temperatury wody w boilerze nastawionej przez tani sterownik rozmyty (system I), drogi system sterowania wyposażony we wszystkie potrzebne mierniki temperatury (system II), oraz tradycyjny system ogrzewania działający bez żadnej optymalizacji (system III), korzystający z miernika temperatury zewnętrznej domu.

Jak pokazuje [Rys. 13] konwencjonalny system sterownia (system III) chociaż korzysta z miernika temperatury zewnętrznej nastawia zadaną temperaturę boileru  $T_{boiler}^{set}$  z dużym błędem w stosunku do systemu „idealnego” (system II) wyposażonego we wszystkie czujniki. Natomiast tani sterownik rozmyty (system I) mimo, że nie korzysta z żadnych mierników oblicza i nastawia zadaną temperaturę wody w boilerze w bardzo podobny sposób jak

„idealny (system II). Fakt ten świadczy o tym, że wprowadzanie ludzkiej wiedzy o sterowaniu do sterowników w formie rozmytych reguł logicznych pozwala na znaczne obniżenie kosztów sterowników i zapewnić wysokiej jakości sterownia nawet bardzo trudnymi obiektami jak system grzewczy domu.

### Sprawdź czy zrozumiałeś !

1. Jaki jest cel działania optymalizującego rozmytego sterownika DUOMATIC-FL?
2. Jaka wielkość wejściowa decyduje o nastawionej wartości zadanej  $T_{boiler}^{set}$  w tradycyjnym systemie sterownia ogrzewaniem domu? Czego system ten nie uwzględnia?
3. Jakie wielkości wejściowe (czynniki, zmienne) uwzględnia rozmyty system optymalizujący DUOMATIC-FL i dlaczego?
4. W jaki sposób dwustanowy regulator konwencjonalny steruje temperaturą wody w boilerze systemu ogrzewania domu? Dlaczego regulator ten posiada strefę histerezy?
5. Jakie wady wynikają ze stosowania różnego typu czujników w systemie ogrzewania domu?
6. Na czym polega różnica między aktualną temperaturą wody w boilerze  $T_{boiler}^{act}$  i zadaną temperaturą tej wody  $T_{boiler}^{set}$  ?
7. Na czym polega różnica w nastawianiu zadanej temperatury wody w boilerze  $T_{boiler}^{set}$  przez „idealną” metodę optymalizacji, metodą praktyczną stosowaną w systemie DUOMATIC-FL oraz metodą konwencjonalną z regulatorem dwustanowym?
8. Dlaczego wzrost zapotrzebowania domu na energię cieplną równoważny jest (wymaga) proporcjonalnemu wzrostowi zadanej temperatury wody w boilerze  $T_{boiler}^{set}$  ?
9. Skąd pochodzi wiedza (inteligencja) rozmytego sterownika optymalizującego w systemie DUOMATIC-FL?
10. Dlaczego konwencjonalny system sterowania ogrzewaniem domu wyposażony tylko w regulator dwustanowy jest nieoptymalny?
11. W jaki sposób system DUOMATIC-FL przygotowywany jest do zainstalowania w konkretnym domu?
12. Do czego służą współczynniki wsparcia reguł w sterowniku rozmytym? Czy stosowanie ich jest konieczne?
13. Jak wyglądają i skąd się biorą funkcje przynależności zmiennych w rozmytym sterowniku optymalizującym?
14. W jaki sposób porównywano jakość optymalizacji zużycia energii systemu idealnego, systemu DUOMATIC-FL oraz konwencjonalnego systemu sterowania boilerem? Dlaczego stosowanie systemu konwencjonalnego jest niezbyt opłacalne?
15. Co jest wadą „idealnego” sterownika systemu sterowania ogrzewaniem domu?
16. Dlaczego DUOMATIC-FL optymalizuje ogrzewanie domu nieco słabiej niż system idealny?