

# Hierarchiczne i rozproszone sterowanie dystrybucją energii cieplnej

Wojciech Kreft

W artykule przedstawiono dwie struktury układów sterowania złożonym układem dystrybucji energii cieplnej: sterowanie hierarchiczne oraz sterowanie rozproszone. Sterowanie hierarchiczne pokazano na przykładzie systemu grzewczego kompleksu budynków AGH w Krakowie, a sterowanie rozproszone na przykładzie systemu ciepłowniczego działającego w Szwecji. Przedstawiono wady i zalety obu podejść.

**Słowa kluczowe:** HVAC, centralne ogrzewanie, energia cieplna, systemy agentowe, sterowanie hierarchiczne, sterowanie rozproszone

W złożonych systemach technicznych, wyposażonych w odpowiednią infrastrukturę informatyczną, zazwyczaj można wyróżnić podprocesy i tworzyć systemy decyzyjne (sterujące) obejmujące jedynie lokalne obszary. Gdy chcemy podejmować decyzje obejmujące bardziej złożony układ, np. system dystrybucji energii cieplnej dla całego miasta, musimy spojrzeć na zagadnienie w sposób systemowy.

Tradycyjne podejście do sterowania takimi systemami polegało na przekazaniu wszystkich danych z podprocesów do jednostki centralnej, która realizuje odpowiednie obliczenia. Doświadczenia wykazują, że może to prowadzić do takich niedoskonałości systemu, jak: długi czas obliczeń, wrażliwość na awarie, mała dokładność, brak możliwości rekonfiguracji, rozbudowy i adaptacji. Głównym jednak problemem w sterowaniu dystrybucją energii cieplnej jest to, że systemy ciepłownicze są często bardzo złożone, obejmują tysiące konsumentów, czasami wielu producentów, a infrastruktura informatyczna jest zazwyczaj słabo rozbudowana.

Aby poradzić sobie z dużą złożonością oraz niedokładnościami podejścia klasycznego, alternatywnym podejściem jest specjalizacja i częściowa decentralizacja zadań. Główna idea to „dziel i rządź”, np. podzielenie złożonego problemu na kilka mniejszych podproblemów, które mogą być rozwiązane w sposób niezależny, a ich poszczególne rozwiązania współpracują tworząc rozwiązanie oryginalnego problemu. Określona liczba oddziałujących między sobą ośrodków decyzyjnych zastępuje jeden zcentralizowany ośrodek decyzyjny.

Wiele lat temu ugruntował się pogląd [2], że najodpowiedniejszą w takim przypadku strukturą układu sterowania jest struktura wielowarstwowa. Charakteryzuje się ona rozdzieleniem funkcji układu sterowania pomiędzy warstwy podsystemu, różniące się stopniem szczegółowości opisu procesu oraz częstotliwością generowania sterowań.

Decyzje podejmowane w warstwach wyższych takiej struktury są wielkościami wejściowymi dla warstw podporządkowanych. Zróżnicowany jest przestrzenny zasięg oddziaływania poszczególnych warstw. O ile dla warstw wyższych dziedziną sterowania będzie znany obszar sieci ciepłowniczej, o tyle dla warstw podporządkowanych sterowanie może dotyczyć pojedynczych budynków lub grup budynków. Powstaje w ten sposób struktura hierarchiczna, w której nadrzędne elementy decyzyjne ustalają optymalne, z globalnego punktu widzenia, parametry dla podsystemów.

W ostatnich latach rozwinięto koncepcje nowego typu układów decyzyjnych, dopuszczających modele o znacznie większym stopniu rozproszenia. Polega to na zastosowaniu tzw. systemów wieloagentowych w sterowaniu [7].

Dla rozważanego procesu produkcji i dystrybucji energii cieplnej pod pojęciem agenta można rozumieć wydzieloną część oprogramowania odpowiedzialną za realizację sterowania dla danego fragmentu sieci ciepłowniczej lub grupy odbiorców energii. Innymi słowy, taki agent „dba” o interes określonego podsystemu. Na przykład może to być agent dbający o interes konsumenta energii cieplnej (zapewnienie komfortu cieplnego, oszczędność energii) lub producenta (produktowanie energii cieplnej w sposób wydajny, przesył w sposób oszczędny). Zadanie agenta musi być realizowane w oparciu o odpowiednią strukturę sprzętową (sterowniki PLC, mikrokontrolery), programową i telekomunikacyjną (interfejsy agenta do przewodowej lub bezprzewodowej sieci transmisji danych).

Można modelować takie agenty jako układy dynamiczne wyposażone w wejścia oraz wyjścia. Wejściami będą czujniki, na podstawie których będą zbierane informacje zarówno obecne, jak i historyczne o pracy danej jednostki, a wyjściami będą postulaty przekazywane dalej i określające jakie należałoby podjąć działanie, aby efekty były zgodne z „interese” danej jednostki. Tak więc następuje rozproszenie modułów przetwarzających informację po całej sieci, gdzie każdy z nich realizuje swoje autonomiczne zadania, informacje są przekazywane pomiędzy nimi, a niektóre docierają do centrali. W takim systemie nie ma globalnego sterowania rozumianego w sensie klasycznym. Sterowanie globalne (zarządzanie) jest realizowane jako kompromis między postulatami wielu lokalnych jednostek. Tak więc w strategii działania systemu jako całości brane są pod uwagę w miarę możliwości interesy wszystkich jednostek, bez niczyjej dyskryminacji. Takie funkcjonowanie systemu ma o tyle sens, że dość łatwo jest zdefiniować interes producenta i konsumenta, a trudno jest powiedzieć, co jest „interese” sieci jako całości.

Systemy wieloagentowe mogą tworzyć struktury hierarchiczne bądź w pełni zdecentralizowane. W tym pierwszym przypadku układ sterowania upodabnia się do wspomnianej na wstępie klasycznej struktury hierarchicznej.

W pracy zostaną pokazane przykłady realizacji układów sterowania systemami ciepłowniczymi z wykorzystaniem jednego i drugiego podejścia, a także efekty działania obiektu ste-

rowania współpracującego zarówno z systemem agentowym, jak i z klasycznym (wielowarstwowym).

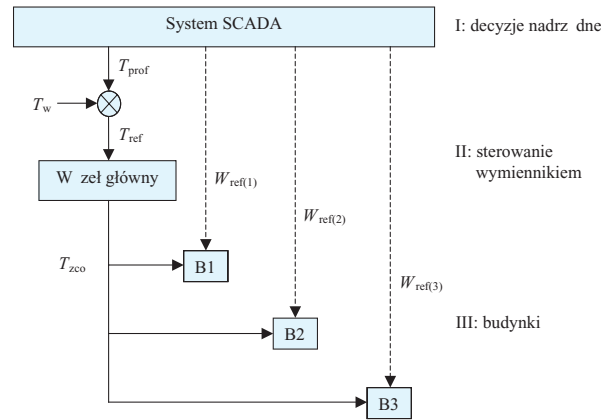
Systemy ciepłownicze mają dwie podstawowe zmienne sterujące, tj. temperatura zasilającego medium oraz przepływ, przy określonej ilości zasobów żądanych przez klientów. Wysoka temperatura zasilania powoduje wzrost strat ciepła w czasie dystrybucji oraz redukuje rezerwy w urządzeniach produkcyjnych. Z drugiej strony, duży przepływ medium powoduje wysokie koszty eksploatacji pomp oraz problemy sterowania urządzeniami produkcyjnymi. Zasoby w systemie są głównie konsekwencją popytu klientów na ogrzewanie budynków. Ograniczenie zasobów (np. limity mocy chwilowej) są podstawowym problemem systemów grzewczych.

Większość funkcjonujących systemów sterowania dystrybucją energii cieplnej bazuje na prostej zależności temperatury zasilania od temperatury zewnętrznej (tzw. krzywe grzewcze). Ponieważ występują straty ciepła w układach przesyłowych, tendencją jest taka, że aby zaspokoić popyt produkuje się więcej energii niż potrzeba.

Bardziej zaawansowanym podejściem do określenia temperatury zasilania mogłoby być użycie modelu optymalizacyjnego. W ogólnym takim modelu sieć jawi się jako zbiór ograniczeń, gdzie konsumenci mają niezmienny i zaspokojony popyt, a funkcją celu jest koszt produkcji.

### Przykład: sterowanie w strukturze hierarchicznej

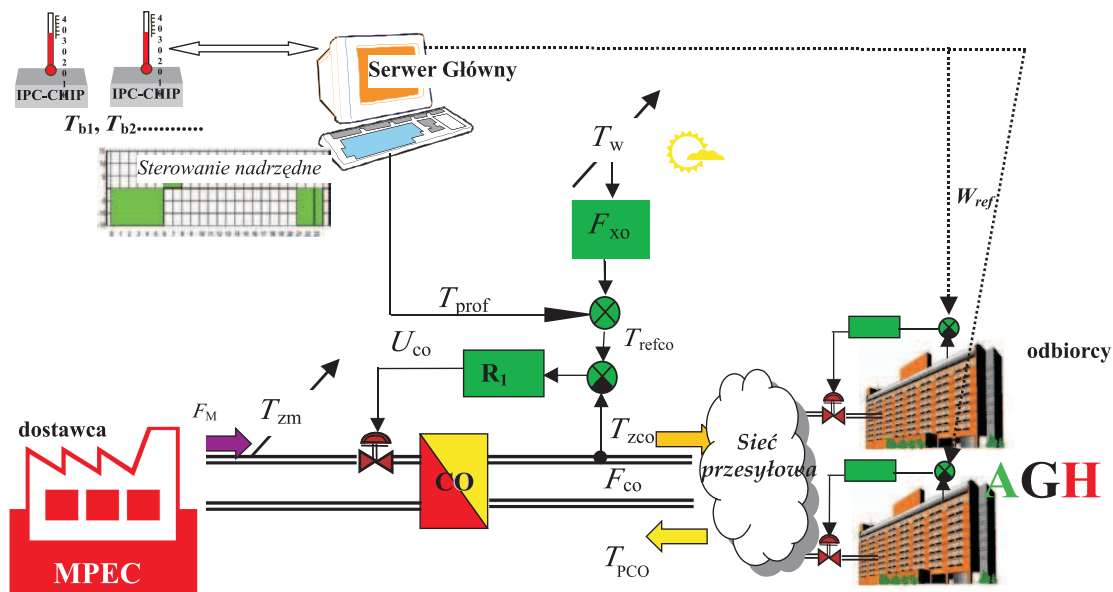
Przykładem wielowarstwowej struktury sterowania dystrybucją energii cieplnej jest system sterowania znajdujący się w budynkach Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (rys. 1). Kompleks ten jest ogrzewany z centralnego źródła wody grzewczej [1, 3, 4]. Za pośrednictwem głównego wymiennika ciepła dostarczana jest energia cieplna do wszystkich budynków (rys. 2). Maksymalna moc pracy wymiennika wynosi 6,28 MW.



Rys. 2. Trójwarstwowa struktura sterowania  
Fig. 2. Three-layer control structure

W systemie sterowania dystrybucją energii cieplnej istnieją rezerwy „proste”, możliwe do wykorzystania poprzez:

- regulację nadążną zapewniającą precyzyjne śledzenie za zmianami zewnętrznych warunków atmosferycznych, wraz z predykcją zapotrzebowania na energię
  - zastosowanie nocnych i sezonowych obniżen temperatury w sieci i związanych z nimi ograniczen pracy pomp CO i CWU (Ciepłej Wody Użytkowej).
- Istnieją także rezerwy „złożone”, które można wykorzystać przez:
- zastosowanie lokalnych algorytmów sterowania dopływem mocy do budynków, tak aby nie powstawały okresowe prze-regulowania poboru energii, składające się na deficyt energii dla całego systemu grzewczego
  - zastosowanie odpowiedniego harmonogramowania dostaw energii do poszczególnych obiektów, z uwzględnieniem występujących opóźnień transportowych sieci
  - predykcję zapotrzebowania na energię (określenie optymalnych sekwencji obniżen i podwyższen temperatury wody



Rys. 1. Sterowanie bezpośrednie i nadrzędne przepływem energii centralnego ogrzewania (CO),  $T_{ZCO}$  – temperatura wody zasilającej instalację,  $T_{PCO}$  – temperatura wody powrotnej z instalacji,  $T_W$  – temperatura zewnętrzna,  $T_{zm}$  – temperatura wody w sieci miejskiej,  $T_{prof}$  – profil temperatury sterowania nadrzędnego,  $W_{ref}$  – profil mocy sterowania nadrzędnego [5]

Fig. 1. Supervisory and direct control of central heating energy (CO),  $T_{ZCO}$  – temperature of supplying water of installation,  $T_{PCO}$  – temperature of return water of installation,  $T_W$  – external temperature,  $T_{zm}$  – temperature of water in MPEC,  $T_{prof}$  – temperature profile of supervisory control,  $W_{ref}$  – power profile of supervisory control [5]

– z uwzględnieniem parametrów dostarczanej wody grzewczej i przewidywanych zmian temperatury zewnętrznej).

Sterowanie systemem grzewczym AGH polega na zmianie bieżącej wydajności centralnego źródła (źródeł) energii cieplnej i ustawień (trajektorii) zaworów sterujących dla poszczególnych obiektów systemu oraz na bieżącym nadzorze pracy całego systemu i obiektów wchodzących w jego skład. Wymaga to także ustalania bieżącego i predykcji przyszłego zapotrzebowania na energię, na podstawie odpowiednich modeli.

W stanach normalnych trajektorie zaworów w budynku powinny być tak wyznaczone, by system w każdej chwili pokrywał ilościowe zapotrzebowanie na energię, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów dostawy energii z centralnych źródeł i przestrzeganiu przy tym wszystkich ograniczeń technicznych i ekonomicznych.

Zmienne zapotrzebowanie odbiorców energii (budynki) tworzy zapotrzebowania dla źródeł, które to zapotrzebowania mogą być spełnione lub nie (ograniczona wydajność źródeł ciepła). Niepełnienie zapotrzebowania przez centralne źródła energii skutkuje zmniejszeniem się komfortu termicznego w budynkach, a także przekroczeniami tzw. mocy zamówionej i dodatkowymi opłatami za energię.

Tak więc aktualna moc głównego wymiennika musi uwzględniać zapotrzebowanie energetyczne wszystkich budynków. Z kolei zapotrzebowanie energetyczne wszystkich budynków jest realizowane przez zadawanie odpowiedniej temperatury zasilającej  $T_{zco}$  na wyjściu z centralnego wymiennika ciepła (rys. 2). Temperatura  $T_{zco}$  jest ustalana przez sterowanie nadrzędne, natomiast przepływ po wtórnej stronie wymiennika jest stały i jest zadawany pompą cyrkulacyjną [6]. Tak więc jedynym sposobem zmiany ilości dostarczanej energii jest zmiana temperatury  $T_{zco}$ . Jest to regulacja bardzo zgrubna, uśredniająca zapotrzebowanie całego kompleksu. Można jednak sterować przepływami medium grzewczego w poszczególnych budynkach, gdyż każdy z nich jest wyposażony we własny lokalny sterownik i zawór regulacyjny. Wartością zadaną dla i-tego budynku staje się wtedy ilość dostarczonej energii, określona przez pożądany profil mocy dostarczanej  $W_{ref(i)}$ .

Powyższe zadania sterowania rozdzielono w strukturze trójwarstwowej pomiędzy warstwę nadrzędną, warstwę sterowania wymiennikiem (węzłem) głównym i układy lokalnego sterowania w budynkach. W pierwszym okresie eksperymentów zastosowano wyłącznie strukturę dwuwarstwową, nie przesyłając sterowań referencyjnych  $W_{ref(i)}$ .

Celem sterowania nadrzędne jest koordynacja działania układów sterowania węzłem głównym i układów sterujących lokalnych w budynkach. Koordynacja ta ma na celu jak najlepsze zbilansowanie dostępnych zasobów energii, tzn. rozdzielanie jej pomiędzy poszczególne budynki, tak aby zapotrzebowanie na energię było jak najlepiej pokryte.

Celem układu sterowania warstwy II jest zapewnienie określonej temperatury  $T_{zco}$  na zasilaniu po wtórnej stronie wymiennika ciepła w węzle głównym. Chodzi o to, aby ta temperatura miała taką wartość, aby dla określonej konfiguracji zaworów regulacyjnych w poszczególnych budynkach (kryzowanie), zapew-

nić odpowiednią temperaturę we wszystkich budynkach. Zazwyczaj za temperaturę komfortową uważa się 20°C [5], jednak w celu oszczędności energii w godzinach nocnych i podczas świąt stosuje się obniżki wartości temperatury według zadanego profilu  $T_{prof}$ . Tak więc, realizując odpowiednią temperaturę w pomieszczeniach ( $T_{pom}$ ), należy zadać odpowiednią wartość  $T_{zco}$ . Wartość zadana  $T_{zco}$  będzie więc uzależniona od pożądanej wartości  $T_{pom}$ , ale także od wartości temperatury zewnętrznej  $T_w$  [6] lub od predykcji tej temperatury.

Podstawowym problemem, jaki pojawia się przy takiej konfiguracji układu sterowania może być deficyt mocy objawiający się w przypadku skokowych zmian zadanej nadrzędnie temperatury  $T_{prof}$  któremu można przeciwdziałać stosując właściwe algorytmy lokalne (w budynkach) i właściwe profile  $W_{ref(i)}$  dostarczone przez warstwę sterowania nadrzędne.

Ważnym elementem składowym systemu jest struktura teleinformatyczna umożliwiająca komunikację między lokalnymi sterownikami odpowiedzialnymi za sterowanie lokalne wybranymi budynkami oraz dwoma sterownikami sterowania nadrzędne. System jest wyposażony również w centralny komputer, który umożliwia monitorowanie i sterowanie elementami systemu ciepłowniczego, gdzie zainstalowano przemysłowy system monitorująco-sterujący iFIX – firm GE Fanuc i Intellution. Jednak mimo to system można uważać za zdecentralizowany, gdyż poszczególne sterowniki są autonomiczne w działaniu i sterowniki nadrzędne nie mogą przejąć kontroli nad sterownikami lokalnymi bez uaktywnienia opcji w tych ostatnich.

Ostatecznie cały system jest monitorowany przez główny serwer, na którym jest zainstalowany system monitorujący, jednak ten serwer nie decyduje o sterowaniu całego systemu dystrybucji energii cieplnej.

Wyniki eksperymentów prowadzonych w sezonie grzewczym 2002/03 dla kompleksu 10 budynków podano w tab. 1. Zastosowanie nadrzędne algorytmu sterowania suboptymalnego dla systemu dystrybucji energii cieplnej o mocy szczytowej ok. 5 MW dało w efekcie oszczędności w postaci zmniejszenia zużycia energii średnio o ok. 10 %, przy zachowaniu komfortu cieplnego w budynkach.

**Tab. 1.** Przykładowe wyniki zastosowania suboptymalnego algorytmu sterowania nadrzędne [4]. Początek danych 1 października 2002 r., koniec sezonu 17 kwietnia 2003 r.

**Tab. 1.** Examples of results of suboptimal application of supervisory control algorithm [4]. Data begin 1. October 2002, end of season 17. April 2003

Okres	Średnia $T_w$ (°C)	Średnia $T_{zco}$ (°C)	Zużycie energii (GJ)	Liczba dni sterowania	Szacowana oszczędność (GJ)
X	8,67	35,28	5938	23	819
XI	7,60	37,39	5028	29	1283
XII	-3,46	51,44	11916	21	908
I	-0,46	49,35	11806	10	620
II	-2,36	55,17	10975	0	0
III	4,42	42,62	7092	27	926
IV	8,97	32,64	3759	3	62
<b>SUMA:</b>			56515		4618

$T_w$  – temperatura zewnętrzna,  $T_{zco}$  – temperatura zasilania  
 $T_w$  – external temperature,  $T_{zco}$  – supply temperature



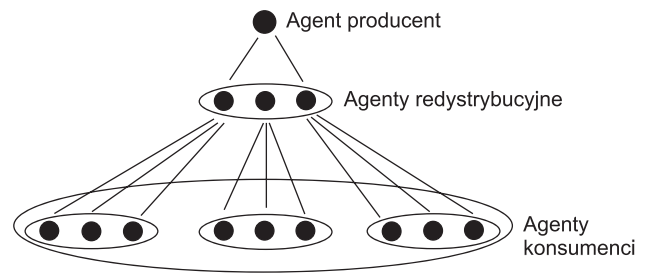
## Model agentowy w sterowaniu systemem ciepłowniczym

Jak wspomniano, ciągle poszukuje się nowych pomysłów i modeli abstrakcyjnych, które mają ułatwić sterowanie w złożonych systemach technicznych. Jednym z pomysłów jest model agentowy [8].

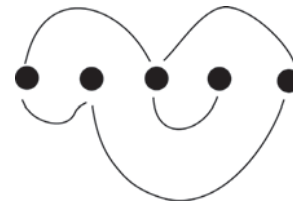
Agenty mają możliwość pobierania danych z czujników, przetwarzania ich i przesyłania innym agentom oraz wysyłania sterowania do elementów wykonawczych. Dla omawianego przykładu sterowania siecią dystrybucji energii cieplnej można rozważyć trzy rodzaje agentów:

- **Agenty konsumenci** (po jednym dla każdego konsumenta). Dokonują ciągłej predykcji przyszłej konsumpcji energii dla swojego konsumenta, monitorują na bieżąco konsumpcję oraz przesyłają informacje do agenta redystrybucyjnego, który odpowiada za „klaster”, do którego jest przypisany dany konsument.
- **Agenty redystrybucyjne** (po jednym dla każdego klastra konsumentów). Dokonują ciągłej predykcji przyszłej konsumpcji całego klastra, bazując na predykcjach konsumpcji poszczególnych producentów wchodzących w skład klastra. Monitorują na bieżąco konsumpcję oraz przesyłają dane do agenta producenta. Jeśli jakiś konsument zużywa więcej energii niż było to przewidziane, agent redystrybucyjny odpowiednio rozdziela energię, tak aby każdy dostał tyle ile potrzebuje. Jeśli jednak zasobami, jakie otrzymał agent redystrybucyjny od agentów producentów, nie da się zadowolić wszystkich konsumentów, agent redystrybucyjny rozdziela zasoby między konsumentów według określonych reguł, biorąc na przykład określone priorytety konsumentów (np. szpital ma wyższy priorytet niż uniwersytet). Jeśli jednak rzeczywiste zużycie energii dla całego klastra okazało się mniejsze niż przewidziane wcześniej i następnie zamówione od producenta, jest możliwość ewentualnego magazynowania niewielkich nadwyżek. Z kolei w sytuacji niedoboru energii można wykorzystać te rezerwy, jeśli oczywiście w danym momencie istnieją.
- **Agenty producenci** (jeden dla każdego producenta, jednak w omawianym przykładzie występuje jedynie jeden producent). Otrzymuje on predykcje konsumpcji energii od konsumentów i monitoruje na bieżąco całkowitą konsumpcję. Trzeba dodać, że producent widzi jedynie klastry jako całości, bo to od nich jedynie otrzymuje informacje. Tak więc producenta interesują jedynie dane dotyczące klastra jako całości. Jeżeli zaistnieje taka sytuacja, że producent nie będzie w stanie wyprodukować takiej ilości zasobów jaką potrzebuje cały klaster, to wysłał on do niego stosowny komunikat, a następnie agent redystrybucyjny może wysłać stosowny komunikat do wszystkich swoich agentów konsumentów.

Agenty mogą być zorganizowane w strukturze hierarchicznej lub zdecentralizowanej. Obie struktury są zbiorem agentów współpracujących ze sobą w celu wypracowania wspólnych lub indywidualnych korzyści (choć mogą między sobą rywalizować). Problem polega na tym jak utrzymać globalny porządek, czyli dobre działanie systemu bez jawnego globalnego zarządzania. Aby to zrobić, z pomocą przychodzi odpowiednia struktura organizacyjna agentów. W strukturze hierarchicznej



Rys. 3. Hierarchiczna struktura agentów w systemie  
Fig. 3. Hierarchical structure of agents in system



Rys. 4. Zdecentralizowany system wieloagentowy  
Fig. 4. Decentralized multi-agent system

(rys. 3) pewne agenty są zaprojektowane do wykrywania i organizowania zależności pomiędzy działaniami innych agentów. Te agenty mogą pełnić kontrolę nad innymi agentami.

Struktura ta kontrastuje ze strukturą całkowicie zdecentralizowaną widoczną na rys. 4, gdzie nie istnieją agenty kierujące działaniami innych agentów w takim sensie, jak w strukturze hierarchicznej. Zamiast tego występują interakcje poziome pomiędzy agentami, tzn. negocjacje. Te dwie architektury systemów wieloagentowych są rozważane w tej pracy, tj. hierarchiczna struktura, gdzie redystrybucyjny agent zarządza konsumpcją dla zbioru agentów konsumpcyjnych i struktura zdecentralizowana, gdzie poszczególne agenty konsumpcyjne lokalnie podejmują decyzje bez pomocy agenta redystrybucyjnego. Agenty konsumpcyjne mają zasadniczo dwa cele: działanie w imieniu konsumenta oraz współpraca z innymi agentami w celu realizacji automatycznego bilansowania mocy.

## Architektura modelu wieloagentowego dla koordynacji chwilowej produkcji i dystrybucji energii cieplnej

Ogólny problem chwilowej produkcji, dystrybucji i konsumpcji energii może być scharakteryzowany następująco:

- istnieje zbiór producentów i konsumentów zasobów
- da się sterować ilością produkowanych zasobów energii w określonym przedziale czasu
- da się sterować potrzebami konsumentów
- nie jest znane z góry dokładnie ile zasobów konkretny klient potrzebuje w określonym czasie
- czas produkcji  $T_p$  i czas dystrybucji  $T_D$  (pomiędzy producentem i konsumentem) jest stosunkowo długi
- zasoby produkowane muszą być konsumowane względnie szybko, gdyż starzej się szybko, są drogie w magazynowaniu oraz występują ograniczenia w pojemności magazynu
- możliwa jest redystrybucja zasobów między konsumentami, którzy są blisko (w sensie szybkiego i taniego przesyłu medium energetycznego)
- ogólnie czas dystrybucji może być różny dla różnych par producent-konsument i zasoby mogą być różnego rodzaju.

Klasykne podejście polega na przewidywaniu popytu klienta na bazie jego aktualnego i przeszłego popytu. Bardziej złożoną metodę stosuje się, kiedy klient informuje producenta o swoim przyszłym popycie. Dzięki temu lokalna predykcja jest lepiej znana niż globalna. Agenty klientów przesyłają predykcję producentowi za pomocą agentów redystrybucyjnych.

Predykcja musi się zakończyć przynajmniej na czas  $T_p + T_D$  przed planowanym dostarczeniem.

Optymalna strategia działania nie może jedynie uwzględniać wszystkich zakłóceń (np. zmiany temperatury zewnętrznej). Aby jednak usatysfakcjonować każdego klienta, trzeba na wszelki wypadek więcej produkować. Istnieją bufora gromadzące energię wewnątrz klastra węzłów.

Cykl interakcji (rys. 5) – tj. czas potrzebny na produkcję i dystrybucję zasobów, aby mogły one dotrzeć w chwili  $t_0$  do  $i$ -tej podstacji – rozpoczyna się, kiedy agenty–konsumenty zaczynają tworzyć i przysyłać informacje o predykcji do swojego agenta redystrybucyjnego w chwili  $t_0 - (T_p + T_D)$ . Podstacja jest to najniższego poziomu element sieci ciepłowniczej, związany z indywidualnym odbiorcą. Podstacę można powiązać z agentem konsumentem. Kiedy redystrybucyjny agent otrzyma predykcje od wszystkich konsumentów klastra, przetwarza ją w ten sposób, że tworzy i przysyła wiadomość o predykcji całego klastra do agenta produkcji. Agent produkcyjny zbiera predykcje wszystkich agentów redystrybucji oraz informuje źródło produkcyjne o zapotrzebowaniu i o czasie, w jakim zasoby mają być dostarczone do klastra. Źródło produkcyjne odpowiada ilością wyprodukowaną i w zależności od ilości agent redystrybucyjny oblicza potencjalne przyszłe ograniczenia i informuje o tym agenta–konsumenta, a on przekazuje informacje do podstacji. W chwili  $t_0$  wszystkie agenty konsumpcyjne rozpoczynają interwał konsumpcji, będąc poinformowani przez swoich konsumentów (podstacje). Agent konsument informuje agenta redystrybucji o konsumpcji. Po skompletowaniu informacji o konsumpcji, agent redystrybucji wysyła informację o konsumpcji całego klastra do agenta pro-

ducenta i obliczane jest zapotrzebowanie na dodatkową ilość energii, w zależności od popytu w stosunku do wcześniejszego efektu produkcji. Jeżeli istnieje dodatkowe zapotrzebowanie, to źródło produkcyjne odpowiada w postaci dodatkowej produkcji. Kiedy agent redystrybucji otrzymuje informacje o dodatkowej dostępnej ilości zasobów, oblicza ograniczenia i informuje o tym agenta producenta.

## Rozproszone bilansowanie zasobów systemu grzewczego

### Przykład eksperymentu małej skali

Eksperyment opisany w pracy pokazuje, że możliwe jest automatyczne bilansowanie mocy w małej sieci ciepłowniczej przy użyciu metody agentowej, tj. realizacja automatycznego „obcinania” pików mocy i przesunięcia zasobów.

W systemach ciepłowniczych powszechnie konfiguracją stosowaną jest zestaw podstacji (wymienników ciepła), gdzie lokalny regulator steruje przepływem po stronie pierwotnej, tj. pierwotny przepływ jest redukowany podczas użytkowania ciepłej wody (CWU).

Celem serii eksperymentów było potwierdzenie użyteczności kilku rozwiązań automatycznej redukcji efektów zmniejszenia przepływu pierwotnego odpowiedzialnego za CO w czasie użytkowania CWU.

W serii eksperymentów agenty konsumentów miały dwa podstawowe zadania, tj. działanie w imieniu swojego klienta oraz współpraca z innymi agentami w celu zrealizowania automatycznego bilansowania zasobów. Zakłada się, że zużycie CWU zmienia się w sposób przypadkowy. Można popatrzeć na to jako na proces stochastyczny, który mógłby być opisywany określonymi parametrami. Jednak nie powinno być ograniczenia zużycia ciepłej wody, gdyż prowadziłoby to do utraty komfortu użytkowników. Tak więc nie powinno się ograniczać przepływu na pierwotnej stronie wymiennika odpowiedzialnego za CWU. Jednak biorąc pod uwagę, że proces ogrzewania

budynków jest procesem o wolnej dynamice, można wprowadzać czasowe redukcje przepływu pierwotnego CO bez znaczącego pogorszenia komfortu użytkowników. Przeprowadzone eksperymenty (budynek B1 AGH), pokazały, że spadek temperatury wewnętrznej pomieszczeń o 2 °C (po wyłączeniu centralnego ogrzewania) następuje po około 1,5 godziny (przy temperaturze zewnętrznej -12 °C).

Agenty konsumpcyjne nakładają ograniczenia na ogrzewanie, gdy poziomy konsumpcji będą przekraczać pewne limity. Każdy budynek powinien mieć określoną indywidualną charakterystykę nagrzewania, a także zdefiniowany priorytet (np. w szpitalu nie można dopuścić do spadku temperatury w pomieszczeniach większego niż 1 °C).

W omawianym eksperymencie brały udział dwa systemy wymienników ciepła (podstacji) A i B odpowiednio po 600 kW i 400 kW i jedna jednostka produkcyjna. Obie podstacje A i B są ustawione na stałe

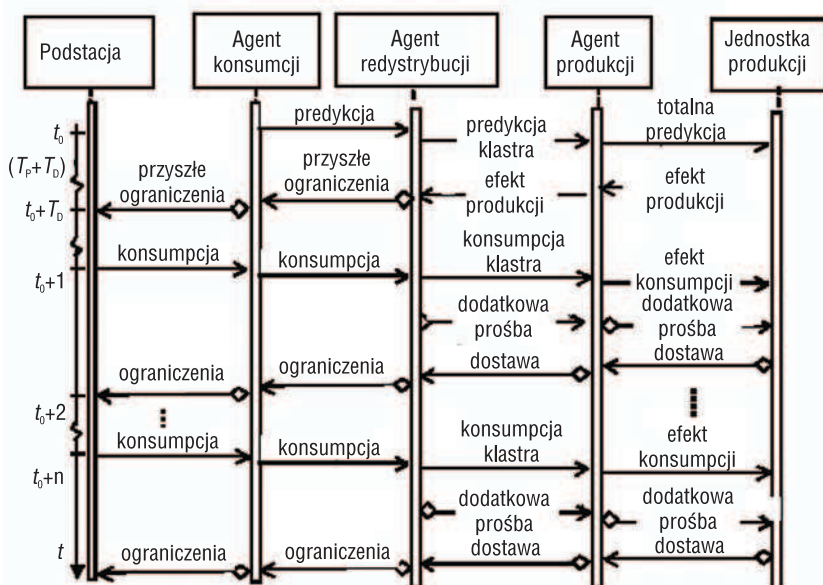
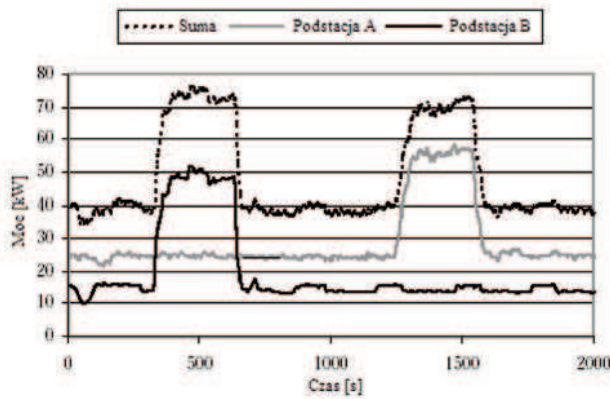
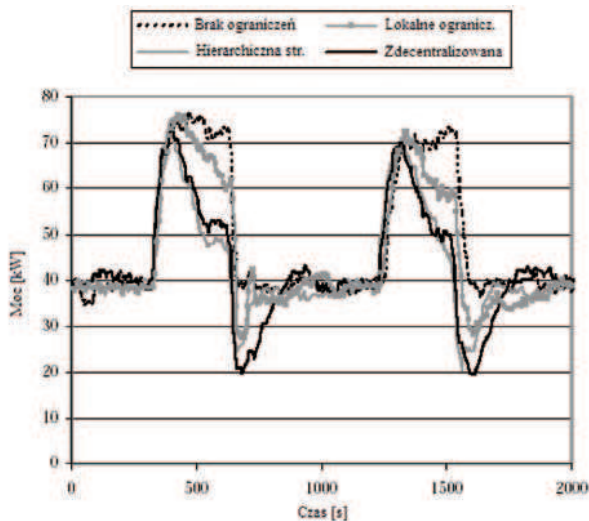


Fig. 5. Schemat przepływu sekwencji informacji dla interakcji pomiędzy elementami systemu.  $T_p$  – czas produkcji,  $T_D$  – czas dystrybucji oraz  $t_0$  – początek bieżącego interwału konsumpcji

Fig. 5. Data sequence flow scheme for interaction between system elements.  $T_p$  – production time,  $T_D$  – distribution time,  $t_0$  – begin of current consumption interval



Rys. 6. Całkowite pobory mocy podstacji A i B [7]  
 Fig. 6. Total power levy of A&B substation [7]



Rys. 7. Całkowity pobór mocy dla czterech różnych strategii sterowania [7]. Zamierzona globalna konsumpcja wynosi 50 kW  
 Fig. 7. Total power levy for four different strategies of control [7]; measured global consumption is 50 kW

zużycie ciepła jeśli chodzi o CO. I tak, podstacja A ma ustaloną temperaturę wody grzewczej na 48 °C (w przybliżeniu moc chwilowa 25 kW), a podstacja B na 51 °C (w przybliżeniu 15 kW). Początkowo systemowi pozwala się osiągnąć stan ustalony po 5 minutach. Następnie podstacja B zaczyna zużywać CWU w tempie 0,2 kg/s przez 5 minut. Następnie system ma 10 minut na ustabilizowanie się, a później podstacja

Tab. 2. Strategie sterowania [7]  
 Tab. 2. Control strategies [7]

1.	Brak ograniczeń	Podstacje mogą bez przeszkód konsumować zgłoszoną ilość
2.	Lokalne ograniczenia (kryzowanie)	Agenci konsumenci indywidualnie wymuszają redukcje, jeśli konsumpcja osiąga określony limit. Limit dla podstacji A wynosi 30 kW, a dla podstacji B wynosi 20 kW.
3.	Hierarchiczna struktura systemu wieloagentowego (obecność agenta redystrybucji)	Agent redystrybucyjny posługuje się zagregowanym limitem dla obu podstacji, tj. 50 kW, jako limit globalny. Agent redystrybucyjny zwraca się o redukcje mocy do obu podstacji z chwilą, gdy konsumpcja osiąga globalny limit.
4.	Rozproszona (zdecentralizowana) struktura systemu wieloagentowego	Agenci konsumenci indywidualnie wymuszają redukcje mocy, jeśli konsumpcja osiąga określony limit. Dodatkowo agent konsument, kiedy wymusza redukcję u swojego konsumenta, również zwraca się o redukcje do drugiej podstacji.

A zaczyna zużywać CWU też w tempie 0,2 kg/s, także przez 5 minut. Na końcu system się stabilizuje. Schemat poboru mocy podczas eksperymentu przedstawiono na rys. 6.

Eksperyment był przeprowadzany dla czterech różnych strategii sterowania (tab. 2).

Na rys. 7 pokazany jest całkowity pobór mocy dla czterech różnych strategii sterowania. Widać, że strategia posługująca się lokalnymi ograniczeniami wyraźnie redukuje „piki” (preregulowania) konsumpcji oraz że strategię bazującą na agentach lepiej redukuje „piki” zużycia energii. Jednak strategię oparte na agentach wymagają więcej czasu na „uspokojenie” systemu po redukcjach. Należy także zwrócić uwagę, że gdy zużycie wody trwało 5 minut, to strategia lokalnych ograniczeń nie była w stanie osiągnąć limitu 50 kW.

## Podsumowanie

Autor analizował system dystrybucji energii cieplnej kompleksu budynków na terenie Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Składa się on z jednego głównego wymiennika ciepła, oraz budynków-odbiorców ciepła. Zasilanie systemu ciepłowniczego następuje z miejskiej sieci MPEC. Dla takiego systemu byłby zdefiniowany jeden agent produkcyjny (związany z siecią MPEC), jeden agent redystrybucyjny (związany z wymiennikiem ciepła) oraz kilkanaście agentów konsumpcyjnych (każdy związany z jednym budynkiem). Zastosowanie takiego podejścia jest możliwe, gdyż wszystkie budynki znajdują się blisko wymiennika ciepła, a zatem możliwe jest „zamówienie” odpowiedniej ilości ciepła przez agenta redystrybucyjnego oraz szybkie przesłanie tego medium do poszczególnych odbiorców. Gdyby te odległości były większe, wówczas nie można by tylko wymiennikowi przypisać agenta redystrybucyjnego, ale trzeba by jeszcze dodatkowo wyposażać bardziej odległe budynki w tego typu agenta.

W pracy omówione zostały dwa podejścia do problemu sterowania złożonym układem dystrybucji energii cieplnej: struktura hierarchiczna i rozproszona. Zaletą podejścia hierarchicznego jest opisanie za pomocą modelu całości obiektu sterowania. Wadą jest jednak to, że w praktyce bardzo rzadko się to w pełni udaje, bo realne obiekty są bardzo złożone i stworzenie dla nich dostatecznie dokładnego modelu jest wręcz niemożliwe. W związku z tym sterowanie zcentralizowane w takich przypadkach kończyłoby się niepowodzeniem. Z kolei zaletą sterowania rozproszonego jest jego prostota, gdyż nie trzeba tworzyć globalnego modelu. Wadą natomiast jest to, że sterowanie rozproszone prawdopodobnie nie będzie ściśle optymalne z matematycznego punktu widzenia, a jedynie do niego zbliżone. Jako przykład porównania obu podejść może służyć zagadnienie sterowania gospodarki krajowej. Jest to system wielki i niezwykle złożony, więc stworzenie modelu globalnego byłoby karłowate. Zresztą praktyka pokazuje, że wszystkie próby stworzenia gospodarki centralnie sterowanej kończyły się fiaskiem oraz kata-





strofą, a gospodarka wolnorynkowa zazwyczaj się sprawdzała. Gospodarka wolnorynkowa jest właśnie przykładem sterowania rozproszonego, gdzie każda jednostka, ewentualnie podmiot gospodarczy, jakim może być np. firma, dba o swoje interesy i w związku z tym optymalizuje problem lokalnie. Tak więc każdy taki obiekt stanowi swego rodzaju podsystem z przypisanym mu agentem. W przypadku wolnego rynku mamy właśnie do czynienia z rywalizacją i zawieraniem swoistych porozumień (transakcji) między stronami. W wyniku tego również gospodarka całego kraju rozwija się bardzo dobrze.

## Bibliografia

1. Bania P., Grega W. (2004): *Nonlinear Model Predictive Controller for Heating System*, 10<sup>th</sup> IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Międzyzdroje, Poland, 2004, 511-516.
2. Findeisen W., Bailey F.N., Brdyś M., Malinowski K., Tadjewski P. i Woźniak A. (1980): *Control and Coordination in Hierarchical Systems*, New York.
3. Grega W. (2002): *Współczesne metody automatyki w sterowaniu i monitorowaniu systemów energetycznych*, Energetyka Ciepła i Zawodowa, nr 1/2002, s. 31-35.
4. Grega W., Kołek K. (2001): *Sterowanie nadrzędne węzłem cieplnym*, Pomiary Automatyka Robotyka, nr 7/2001, s. 18-24.
5. Grega W., Kołek K., Bania P. (2002): *Optymalne sterowanie węzłem ciepłowniczym*. XIV KKA, Zielona Góra 24-27 czerwca 2002.
6. Kreft W. (2005): *Model zużycia energii cieplnej przez budynek dla różnych strategii sterowania*, Automatyka AGH, t. 9 z. 3.
7. Wernstedt F. (2003): *Multi-agent systems for district heating management*, Karlskrona Sweden (thesis).
8. Wooldridge M. (2002): *An introduction to Multi-Agent Systems*, Wiley. ■

## Hierarchical and distributed control of heating energy distribution

In paper one presented two structures of control systems of heating energy distribution complex system: hierarchical control and distributed control. One presented hierarchical control on example of buildings complex heating system in AGH in Cracow, whereas distributed control on example of heating system working in Sweden. One described advantages and disadvantages both methods.

**Keywords:** HVAC, central heating, heating energy, multi-agent systems, hierarchical control, distributed control



**mgr inż. Wojciech Kreft**, asystent w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie na wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki w Katedrze Automatyki. Zajmuje się sterowaniem systemami dystrybucji energii cieplnej.

**Kontakt:** [wkreft@agh.edu.pl](mailto:wkreft@agh.edu.pl)

REKLAMA

# XIII KONGRES

# SUR

19,20-21,22 października 2010  
Hotel Angelo, Katowice

19 października 2010

I Dzień Specjalny – Warsztaty:  
Wprowadzenie do TPM

22 października 2010

II Dzień Specjalny – Warsztaty:  
Bezpieczeństwo Pracy Działów SUR

**Praktyka UR**  
zwiedzanie zakładu  
General Motors  
w Gliwicach

W programie XIII Kongresu SUR:

- Nowe technologie w diagnostyce wibroakustycznej przedstawi **prof. Len Gelman** z UK
- O systemach elektronicznych powie Gość Honorowy z USA, **prof. Michael Pecht**
- TPM – jakie problemy mogą pojawić się przy wdrażaniu i jak sobie z nimi radzić
- Rola UR w optymalizacji procesów na przykładzie metodyki wdrażania 5S, Kaizen i SMED – case study przedstawi Lider UR w THULE
- Jan Czech z SGL Carbon powie o metodzie generowania zysków i oszczędności – SIX SIGMA
- Optymalizacja kosztów w praktyce m.in. takich firm jak: Cadbury, Swedwood, Kosmepol (L'Oreal)
- Praktyka utrzymania ruchu w General Motors – **zwiedzanie fabryki**
- Praktycy m.in. z: Gedeon Richter Polska, Saint-Gobain Construction Products, SMP Poland powiedzą o **optymalizacji procesów**

WYSTAWCY:

**EFAFLEX**  
bramy szybkie



PATRONAT MEDIALNY:

FORNAR – AUTOMATYKA – ROBOTYKA  
**PAR**

[www.iir.pl/SUR](http://www.iir.pl/SUR)

Aneta Woś - kierownik projektu  
[aneta.wos@iir.pl](mailto:aneta.wos@iir.pl), tel.: 22 420 55 30, faks: 22 420 55 01