

## PRAKTYCZNA REALIZACJA STEROWANIA I ANALIZA PRACY WĘZŁA CIEPLNEGO Z WYKORZYSTANIEM SIECI NEURONOWYCH

KRZYSZTOF KOLEK, WOJCIECH MITKOWSKI

### *APPLICATION OF NEURAL NETWORKS TO PRACTICAL IMPLEMENTATION OF CONTROL AND ANALYSIS OF ENERGETIC NODE*

#### *Abstract*

*Two examples of application of artificial neural networks in real control systems are described in the paper. The first application transforms data monitored during extended period of exploitation of the object, which is a complex of buildings at Akademia Górniczo-Hutnicza. In consequence, synthetic information regarding the power requirements in these buildings was obtained. The characteristic, which shows relation between the power requirement and the temperature of the heating water and the surrounding temperature, is presented. In the second application the artificial neural network is used for direct control of the power supply from the city energetic system. Practical implementation of the neural network confirmed its applicability as regulator, which stabilizes the temperature in buildings heated by large energetic installations.*

## 1. WPROWADZENIE

W rzeczywistych układach sterowania często spotykamy się z sytuacją, w której podstawowym problemem utrudniającym określenie algorytmu sterowania jest brak pełnej informacji o modelu matematycznym obiektu. Złożoność rzeczywistości w pewnych jej fragmentach, przynajmniej w chwili obecnej, uniemożliwia dokładny jej opis za pomocą języka matematyki i rozpoznanych dotychczas praw fizyki. Często dysponujemy dużą liczbą pomiarów z obiektu rzeczywistego, z których można uzyskać niepewny model matematyczny, stosując np. metody statystyczne lub metody nierozpoznane do końca matematycznie wykorzystu-

jące np. sieci neuronowe, ale dobrze oprogramowane i przyjazne nawet dla użytkownika niezbyt dobrze przygotowanego matematycznie i niezbyt dobrze rozumiejącego podstawy fizyczne działania układu.

## 2. GŁÓWNY WĘZŁ CIEPLNY AGH JAKO OBIEKT REGULACJI

Główny węzeł ciepły Akademii Górniczo-Hutniczej służy do zasilania w energię ciepłą instalacji ciepłej wody użytkowej (CWU) oraz centralnego ogrzewania (CO) kompleksu budynków uczelni ulokowanych między al. Mickiewicza, ul. Reymonta, ul. Akademicką oraz ul. Czarnowiejską w Krakowie. Zapotrzebowanie ciepłe tego liczącego kilkanaście

budynków kompleksu dochodzi do 25 GJ/h. Energia odbierana jest z zarządzanej przez Miejskie Przedsiębiorstwo Energetyki Ciepłej (MPEC) miejskiej wodnej sieci grzewczej za pomocą pojedynczego węzła grzewczego (rysunek 1).

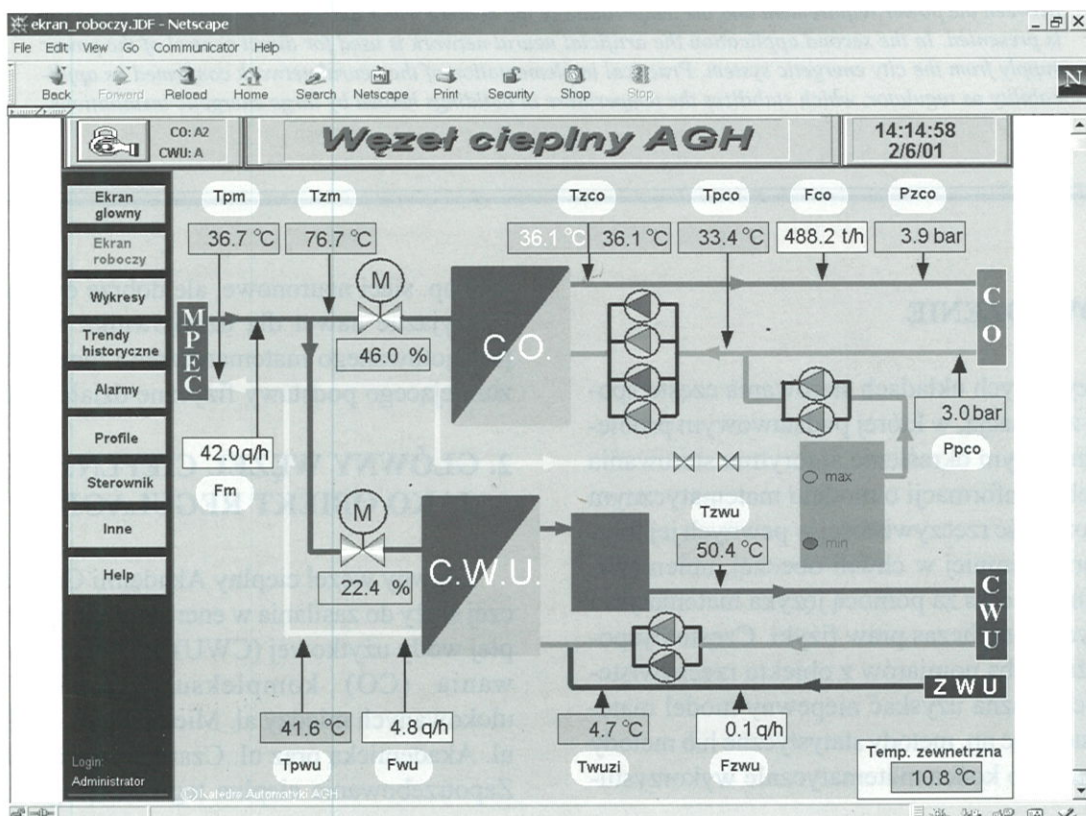
Woda w sieci miejskiej posiada temperaturę  $T_{zm}$ . Po przejściu przez układ wymienników CO oraz CWU do sieci miejskiej zwracana jest woda o temperaturze  $T_{pm}$ . Pobór wody z sieci miejskiej określa parametr  $F_m$  i jego maksymalna wartość może wynosić około  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  (aktualna wartość na rysunku 1 wynosi  $42 \text{ q/h}$ ). Sumaryczny przepływ wody z sieci miejskiej sterowany jest za pomocą zaworów regulujących przepływ wody zarówno przez wymienniki instalacji CO jak i wymienniki instalacji CWU. Na rysunku zawory oznaczono literą M. Zawory posiadają liniową charakterystykę przepływu od stopnia otwarcia ale jednocześnie nieliniową charakterystykę przepływu od ciśnienia wody w sieci miejskiej. Stopień otwarcia zaworów określony jest w procentach. Temperatura wody zasilającej wymiennik CWU jest identyczna z temperaturą wody zasilającej wymiennik CO. Temperatura wody powrotnej z wymiennika CWU wynosi  $T_{pwu}$ , a przepływ wody przez wymiennik jest równy  $F_{wu}$ .

Sterowanie otwarciem zaworów pozwala określić energię doprowadzaną do wymienników CO oraz CWU. Stopień otwarcia zaworów stanowi jedyne istotne sterowanie w systemie. Inne wielkości sterujące,

jak na przykład wybór zespołu pomp wymuszających cyrkulację wody w instalacji CO, mają znaczenie pomocnicze i nie wpływają na parametry temperaturowe.

Po stronie wtórnej wymiennika CO znajduje się instalacja grzewcza AGH. Temperatura wody zasilającej instalację CO Akademii wynosi  $T_{zco}$ . Temperatura wody powrotnej z instalacji jest równa  $T_{pco}$ . Przepływ wody w instalacji CO, wymuszony za pomocą zespołu pomp, określony jest przez wartość  $F_{co}$ . Ciśnienie wody wlotowej ma wartość  $P_{zco}$ , a ciśnienie wody powrotnej jest równe  $P_{pco}$ . Pożądany stan układu zależy od temperatury zewnętrznej. W dalszej części temperatura zewnętrzna oznaczanej jest jako  $T_w$ .

Układ sterowania zrealizowano w oparciu o sterowniki serii OCS firmy GE/Horner. Wykorzystano przemysłową sieć typu CAN, z której pomocą zrealizowano komunikację między sterownikiem OCS oraz komputerem IBM PC. Komputer PC wykonuje aplikację utworzoną w programie typu SCADA o nazwie iFIX. Program ten realizuje funkcje monitorujące pracę systemu oraz udostępnia dane w Internecie [w chwili obecnej: <http://wg.agh.edu.pl> oraz <http://wg.ia.agh.edu.pl>]. Wszystkie pomiary, wartości sterowań oraz parametry określające pracę sterowników są przez system sterowania zapisywane w komputerowej bazie danych. Sterowania dla instalacji CO obliczane są co 5 minut, a dla instalacji CWU co 2 minuty. Są to jednocześnie czasy określające okresy zapisu



Rysunek 1. Schemat głównego węzła cieplnego AGH.

danych do baz odpowiadających instalacjom CO oraz CWU.

Temperatura ciepłej wody zasilającej instalację CWU wynosi  $T_{zWU}$ . Temperatura zimnej wody w instalacji CWU wynosi  $T_{wZU}$ . Jest to jednocześnie temperatura wody dopompowywanej do obiegu wody ciepłej w wyniku bieżącego użytkowania. Przepływ wody dopompowywanej wynosi  $F_{zWU}$ .

### 3. ZADANIE STEROWANIA

Zadaniem systemu sterowania jest:

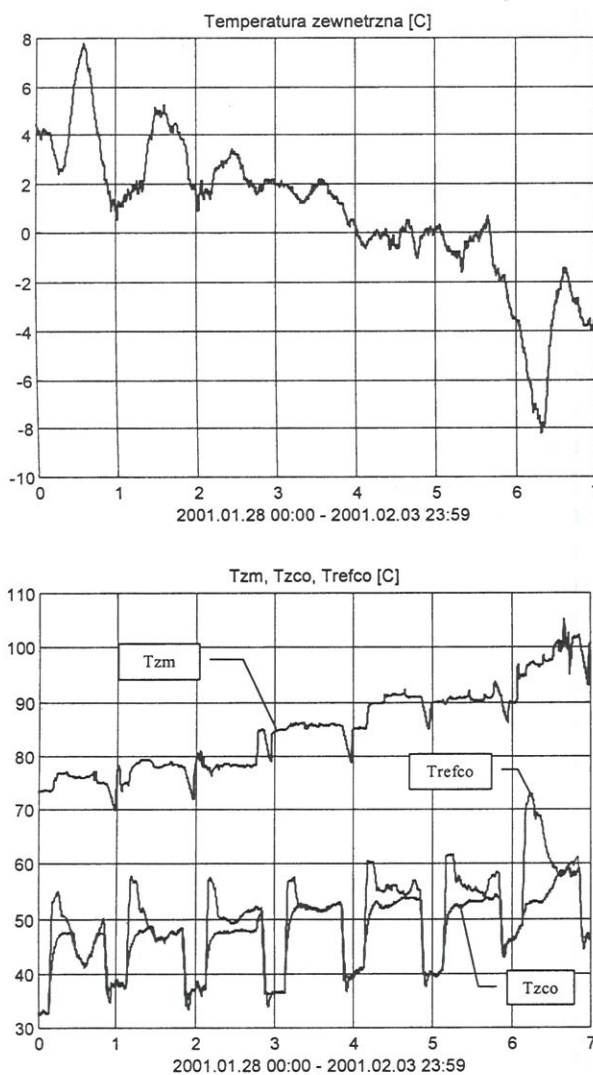
- utrzymanie temperatury ciepłej wody użytkowej na poziomie  $50^{\circ}\text{C}$  niezależnie od temperatury wody zimnej, od wartości poboru wody ciepłej oraz od temperatury i ciśnienia zasilającego sieci miejskiej,
- utrzymanie temperatury zasilającej w instalacji CO na poziomie zależnym od aktualnej temperatury zewnętrznej niezależnie od temperatury i ciśnienia zasilającego sieci miejskiej.

Utrzymanie temperatur zasilających instalacji CO oraz CWU nie jest zadaniem trywialnym. Regulacja zakłócana jest przez wahającą się temperaturę zasilania oraz wahające się ciśnienie w sieci miejskiej. Powoduje to znaczące wahania poboru mocy przy stałym otwarciu zaworu wymiennika CWU. Sam wymiennik oraz zapotrzebowanie Akademii na energię są silnie nieliniowymi funkcjami zależnymi od temperatury zewnętrznej. Powoduje to komplikacje podczas strojenia klasycznych regulatorów takich jak regulatory PID.

Dodatkowo system sterowania przeprowadza okresowe obniżenia parametrów temperaturowych instalacji CO oraz CWU. Obniżenia przeprowadzane są w okresach nocnych oraz w dni wolne od pracy. Obniżanie temperatury musi być przeprowadzane ostrożnie bowiem z jednej strony doprowadza do obniżenia poboru energii z sieci miejskiej, ale jednocześnie nie może powodować spadku komfortu cieplnego pomieszczeń. Zapewnienie komfortu cieplnego osiągnięte jest poprzez krótkie okresy podwyższenia temperatury zadanej w stosunku do temperatury zadanej wynikającej z aktualnej temperatury zewnętrznej.

Zdecydowana większość zapotrzebowania AGH na energię ciepłą pochodzi od instalacji CO i dlatego w dalszych rozważaniach ograniczymy się tylko do niej. Rysunek 2 przedstawia przykładowy tydzień pracy instalacji w okresie od 28 stycznia 2001 do godziny 00:00 do 3 lutego 2001 do godziny 23:59. Przedstawiono temperaturę zewnętrzną, temperaturę zasilania sieci miejskiej  $T_{zm}$ , temperaturę zadaną zasilania instalacji CO oznaczoną jako  $T_{refCO}$  oraz temperaturę zasilania CO oznaczoną jako  $T_{zCO}$ . W przedstawionym okresie zanotowano ochłodzenie, co skutkuje stopniowym wzrostem temperatur sieci miejskiej oraz

temperatury zasilania instalacji CO. Wykresy przedstawiają również nocne obniżania temperatury zasilania CO wykonywane w celu zaoszczędzenia energii w okresach gdy w budynkach nie ma pracujących ludzi.



Rysunek 2. Przykładowy okres pracy instalacji CO.

### 4. ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH

W systemie sterowania poborem mocy zastosowano sztuczne sieci neuronowe do realizacji dwóch zadań. Pierwsze polegało na szacowaniu zysków energii (czyli w rzeczywistości zysków ekonomicznych) wynikających z okresowego obniżania temperatury zasilającej instalacji CO. Drugie zadanie polegało na obliczeniu sterowania poborem wody z sieci miejskiej doprowadzanej do wymiennika CO w celu utrzymania temperatury zasilającej CO na zadanej wartości.

Tematyka wykorzystująca sieci neuronowe do przetwarzania danych oraz w układach sterowania nie jest



nowa. Literatura obejmująca tę tematykę jest bardzo bogata, np. Kempa i inni (1997), Kołek i inni (1993), Żurada i inni (1996), Korbicz i inni (1994), Tadeusiewicz (1993), Kołek (1996), Kołek i Mitkowski (2001). W tym artykule przedstawiono opis zastosowania sztucznych sieci neuronowych do analizy danych oraz sterowania rzeczywistym obiektem dystrybuującym energię rzędu kilkudziesięciu GJ/h w warunkach gdzie jakość pracy układu sterowania determinuje komfort kilku tysięcy pracujących ludzi.

#### 4.1. Szacowanie zysków z okresowych obniżek temperatury

Szacowanie zysków okresowych obniżek temperatury jest przeprowadzane w celu wykazania racjonalności poniesienia przez Akademię Górniczo-Hutniczą kosztów instalacji automatycznego sterowania węzłem. Mowa jest o szacowaniu, bowiem wobec niezajomości dokładnego modelu matematycznego obiektu (obejmującego wymienniki, system rur i grzejników oraz modele cieplne budynków) nie są możliwe do przeprowadzenia dokładne obliczenia.

Rysunek 3 przedstawia zależność poboru mocy przez instalację CO Akademii w funkcji temperatury zasilającej instalację CO  $T_{zco}$  oraz w funkcji temperatury zewnętrznej  $T_w$  uzyskane w sezonie grzewczym 2000/2001. Moc obliczana jest jako:

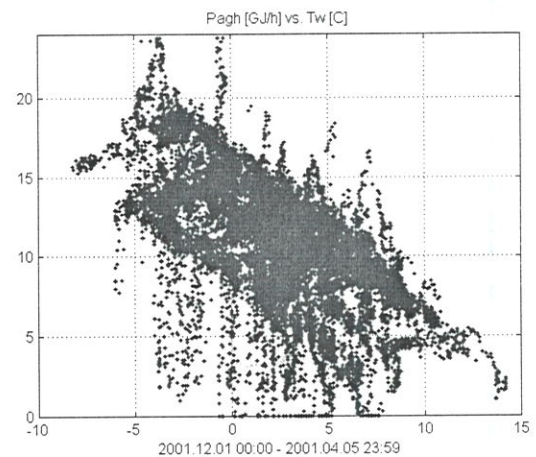
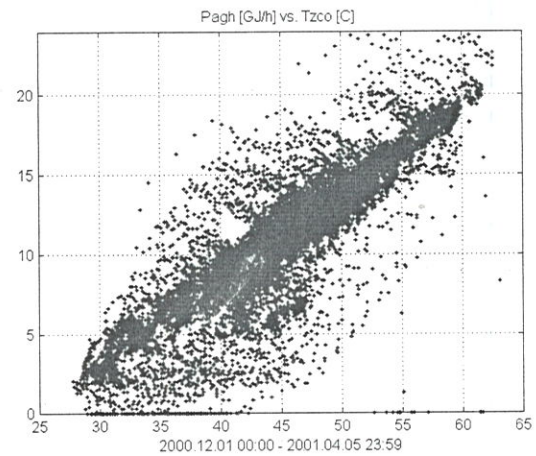
$$W_{CO} = F_{CO} * (T_{ZCO} - T_{PCO})$$

czyli jako iloczyn przepływu wody przez wymiennik CO (oznaczonej jako  $F_{CO}$ ) oraz różnicy temperatur między wejściem oraz wyjściem wymiennika (oznaczonej jako  $T_{ZCO} - T_{PCO}$ ). Obliczanie mocy wykonywane jest co 5 minut.

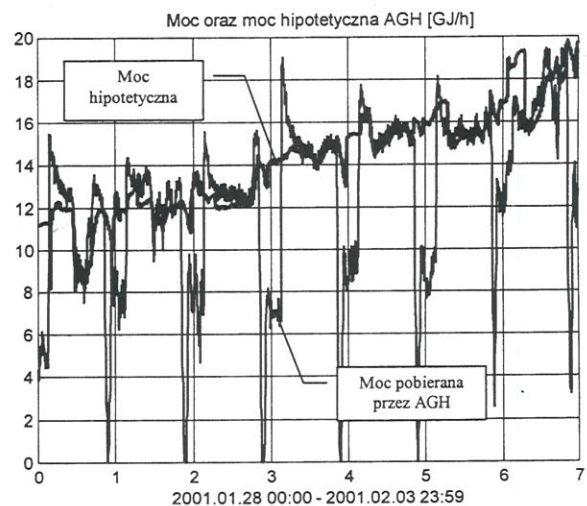
Z rysunków 3 widoczne są pewne tendencje, to jednak trudno mówić o dokładnych zależnościach.

Rozwiązaniem może być opracowanie wielomianowych zależności o charakterze statystycznym opisujących poszczególne elementy obiektu (metoda ta została szczegółowo opisana w pracy Grega i Kołek 2001). Po złożeniu takich wielomianów możliwe jest oszacowanie jaki byłby hipotetyczny pobór energii gdyby nie nastąpiło obniżenie temperatury instalacji CO. Chwilowy pobór mocy w omawianym przykładowym okresie czasu oraz hipotetyczną moc oszacowaną za pomocą przybliżenia wielomianowego przedstawia rysunek 4. Różnica obu wartości wyznacza zaoszczędzoną moc.

Inne podejście wykorzystuje sztuczne sieci neuronowe. Struktura wykorzystanej sieci przedstawiona została na rysunku 5. Rysunek 5a przedstawia trzy warstwy sieci, a rysunek 5b strukturę pojedynczej warstwy. Do nauczania sieci neuronowej wykorzystano



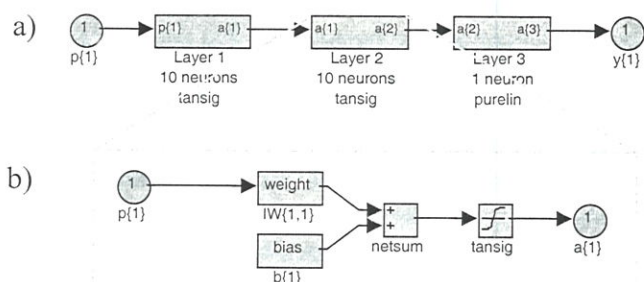
Rysunek 3. Pobór mocy w funkcji  $T_{zco}$  oraz  $T_w$ .



Rysunek 4. Moc hipotetyczna oraz moc chwilowa pobierana przez AGH.

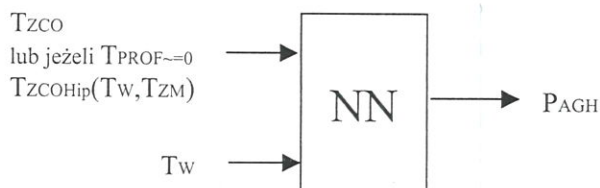
program MATLAB wraz z przybornikiem „Neural Networks Toolbox”, Users Guide, ver.4, The Mathworks Inc. 2000. W trakcie nauczania metodą wstecznej propagacji jako ciągów uczących użyto sekwencji zawierających informację o temperaturze zasilania CO  $T_{zco}$ , temperaturze zasilania wody z sieci miejskiej  $T_{zm}$

oraz o temperaturze zewnętrznej  $T_w$ . Nauczano sieć odwrotzenia poboru mocy. W trakcie nauczania wykorzystano informacje o pracy instalacji z okresu od 1 grudnia 2000 do 27 stycznia 2001 (a więc z okresu czasu poprzedzającego rozpatrywany zakres dat).



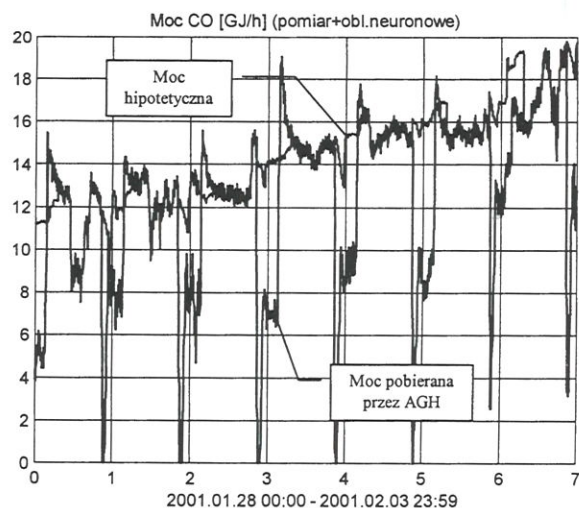
Rysunek 5. Struktura sieci neuronowej (a) oraz struktura pojedynczej warstwy (b).

Po fazie nauczania sieć została wykorzystana do odtworzenia mocy pobieranej przez AGH lub do odtworzenia mocy hipotetycznej. W przypadku utrzymywania zadanego profilu temperaturowego sieć odwzorowała moc pobieraną przez Akademię (w celu weryfikacji moc taka może być obliczona na podstawie aktualnych pomiarów). W przypadku odejścia temperatury zadanej od wartości wynikającej z aktualnej temperatury zewnętrznej obliczana jest moc hipotetyczna, estymująca pobór mocy Akademii w przypadku braku okresowych obniżenia temperatury zasilania instalacji CO (rysunek 6).



Rysunek 6. Obliczanie poboru mocy aktualnej oraz hipotetycznej.

Porównanie rzeczywistego oraz hipotetycznego poboru mocy przedstawia rysunek 7. Wydaje się że jest to lepsze przybliżenie niż wyniki otrzymane z obliczeń wykonanych za pomocą wielomianów (porównaj rysunek 4 oraz rysunek 7). Z porównania rysunków wynika, iż obliczenia wykonane za pomocą sieci neuronowej lepiej oddają rzeczywisty przebieg mocy w godzinach dziennych. Porównanie w godzinach dziennych jest istotne, ponieważ tylko wówczas sieć odwzorowała warunki rzeczywiste. W godzinach nocnego obniżenia oraz porannego przewyższenia temperatury sieć oblicza wyłącznie moc hipotetyczną. Wydaje się jednak, iż uzasadnionym jest domniemanie poprawnego odwzorowania mocy hipotetycznej w sytuacji gdy moc rzeczywista odwzorowana jest poprawnie.



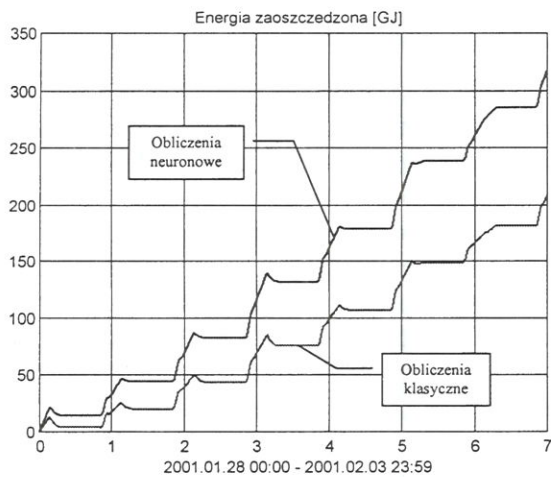
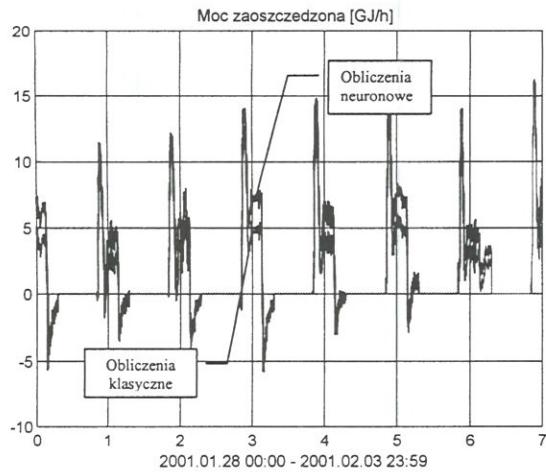
Rysunek 7. Moc rzeczywista oraz hipotetyczna.

Rysunek 8 przedstawia porównanie klasycznych obliczeń wykonanych za pomocą przybliżeń wielomianowych oraz obliczeń neuronowych. Przedstawiono wykresy zaoszczędzonej mocy oraz zaoszczędzonej w ciągu jednego tygodnia energii. Obliczenia neuronowe, które wydają się lepiej przybliżać rzeczywistość, wskazują iż w ciągu tylko jednego tygodnia pracy zaoszczędzono około 300 GJ energii! Analogiczne obliczenia wykonane za okres całego sezonu grzewczego pozwalają stwierdzić, iż wartość oszczędności finansowych przewyższyła koszt instalacji systemu automatycznego sterowania po około 4 miesiącach.

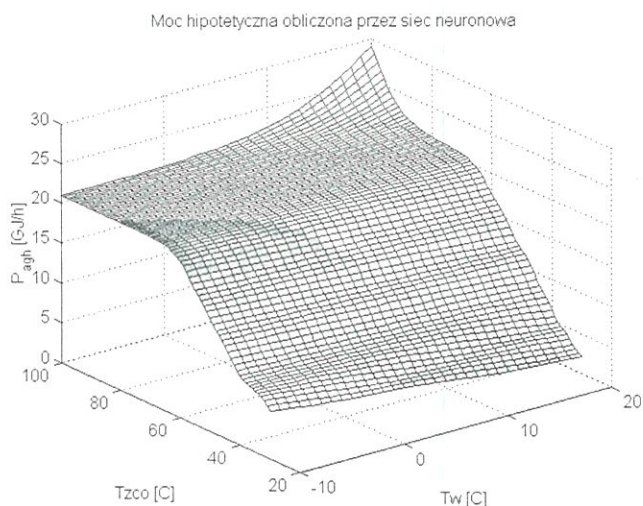
Utworzona sieć neuronowa może zostać wykorzystana do prezentacji ogólnej zależności mocy pobieranej przez AGH w funkcji temperatury zasilania CO oraz temperatury zewnętrznej. Zależność taką przedstawiono na rysunku 9. Obejmuje ona pełen zaobserwowany zakres zmienności temperatury zasilania CO oraz temperatury zewnętrznej. Sieć neuronowa w sposób rozsądny odwzorowała moc w zakresach, które wystąpiły podczas rzeczywistej pracy instalacji (ciemny pas wykresu). Poza tym obszarem wyniki wydają się być nieadekwatne, ale jest to zakres wartości, który nie mógł się znaleźć w ciągu uczącym.

Uzyskana płaszczyzna zależności mocy pobieranej przez AGH od temperatury zasilania CO oraz od temperatury zewnętrznej może okazać się bardzo pomocna w celach sterowania. Znajomość charakterystyki zapotrzebowania na moc pozwala z jednej strony racjonalnie projektować oraz przebudowywać węzeł główny, a z drugiej strony pozwala wyznaczyć zapotrzebowanie na moc bieżącą. Zapotrzebowanie na moc bieżącą ułatwia wyliczenie stopnia otwarcia zaworu pobierającego wodę z miejskiej sieci grzewczej.

Charakterystyka obejmuje zakres temperatur zewnętrznych do temperatury  $-10^{\circ}\text{C}$ . Zima sezonu grzewczego 2000/2001, który był pierwszym sezonem



Rysunek 8. Porównanie zaoszczędzonej mocy oraz energii obliczonych przez klasyczne przybliżenie wielomianowe oraz przez sieć neuronową.



Rysunek 9. Zależność mocy pobieranej przez AGH od temperatury zasilania CO oraz od temperatury zewnętrznej.

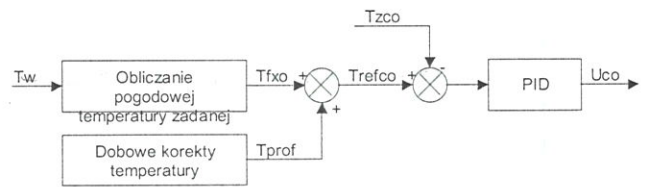
pracy instalacji, była stosunkowo ciepła i minimalna temperatura zanotowana wynosiła właśnie około  $-10^{\circ}\text{C}$ . Należy mieć nadzieję (choć oczywiście tylko od strony badawczej), że kolejne sezony grzewcze

okażą się bardziej „łaskawe” i umożliwią opracowanie krzywej dla spotykanych w Polsce zimowych temperatur dochodzących do  $-25^{\circ}\text{C}$ .

## 4.2. Sterowanie temperaturą zasilania CO

Na rysunku 10 przedstawiono schemat regulatora instalacji centralnego ogrzewania. Na podstawie temperatury zewnętrznej  $T_w$  wyznaczana jest pogodowa temperatura zadana  $T_{fxo}$ . Do niej dodawane są dobowe korekty temperatury w postaci nocnych obniżen oraz porannych podwyższeń tworząc zadaną temperaturę wody  $T_{refco}$  w instalacji CO. Temperatura  $T_{refco}$  porównywana jest z aktualną temperaturą wody w instalacji  $T_{zco}$  tworząc błąd regulacji. Na podstawie błędu regulator PID wylicza sterowanie zaworem doprowadzającym wodę z sieci miejskiej do wymiennika ciepła instalacji CO.

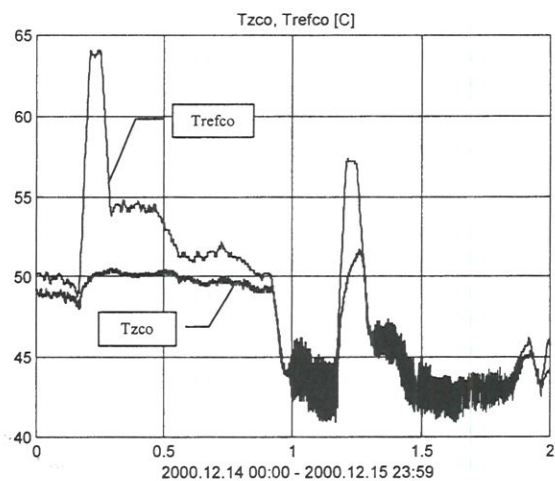
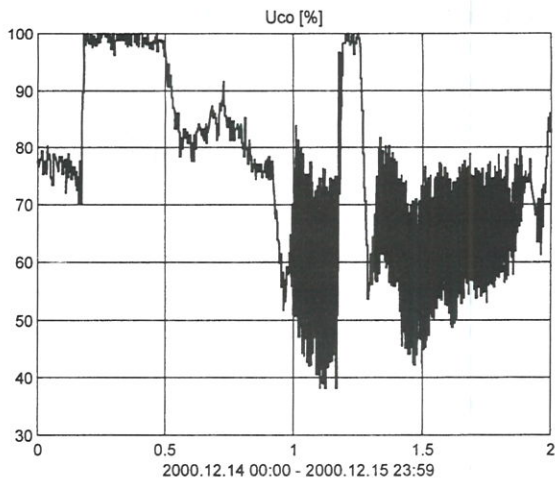
Na skutek silnych nieliniowych zależności występujących w sterowanym obiekcie nastrojenie klasycznych regulatorów PID było zadaniem kłopotliwym. Ryzyko wykorzystania tego typu regulatorów ujawniło się 15 grudnia 2000 roku, gdy na skutek przejścia



Rysunek 10. Schemat regulacji PID w instalacji CO.

niło się 15 grudnia 2000 roku, gdy na skutek przejścia obiektu do nowego punktu pracy wystąpiły oscylacje (rysunek 11). Wobec braku matematycznego modelu obiektu przewidzenie wystąpienia oscylacji nie jest możliwe. Szczęśliwie w omawianym obiekcie oscylacje nie mają charakteru niszczącego (być może w dłuższym okresie czasu mogą spowodować przedwczesne zużycie zaworu regulacyjnego) i skutkują tylko wysyłaniem do instalacji grzewczej CO wody o temperaturze oscylującej o kilka stopni. Pomieszczenia, do których doprowadzane jest ciepło, zachowują się jak obiekty całkujące i wygładzają takie fale zapewniając prawidłowy komfort cieplny. Oscylacje są niepożądane i ich uniknięcie jest konieczne. Eksperymentalna zmiana nastaw regulatora pozwoliła wyeliminować oscylacyjne przebiegi w czasie pozostałego okresu sezonu grzewczego 2000/2001, ale jednocześnie zrodził się pomysł wykorzystania do sterowania sieci neuronowych.

Sterowania instalacją CO ma charakter dyskretny. Co 5 minut wyliczany jest stopień otwarcia zaworu, który steruje ilością ciepłej wody dostarczanej do wymiennika CO. O ile stała czasowa AGH jako obiekt



Rysunek 11. Oscylacyjna praca regulatora PID.

tu grzania jest względnie długa i wynosi około 40 minut to stała czasowa wymiennika wynosi poniżej 5 minut. Umożliwia to osiągnięcie stanu wymiennika bliskiego stanowi ustalonemu na końcu każdego okresu próbkowania. Oznacza to, że jeżeli w danym okresie próbkowania znamy stopień otwarcia zaworu  $U_{co}(n)$  (czyli znamy przepływ wody z sieci miejskiej  $F_M(n)$ ), znamy temperaturę zasilającą sieci miejskiej  $T_{ZM}(n)$  oraz temperaturę powrotną z instalacji CO AGH  $T_{PCO}(n)$  to wówczas potrafimy określić temperaturę zasilającą instalację CO na początku następnego okresu próbkowania  $T_{ZCO}(n+1)$ , wykorzystując następujące zależności określone pewnymi funkcjami  $f_1$  i  $f_2$ :

$$T_{ZCO}(n+1) = f_1(U_{CO}(n), T_{ZM}(n), T_{PCO}(n))$$

lub

$$T_{ZCO}(n+1) = f_2(F_M(n), T_{ZM}(n), T_{PCO}(n))$$

Z powyższej zależności można uzyskać funkcję „odwrotną” do  $f_2$  względem argumentu  $F_M(n)$  określoną przez funkcję  $f_3$ :

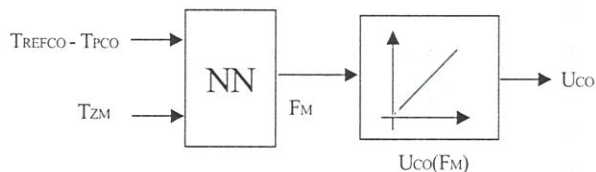
$$F_M(n) = f_3(T_{ZCO}(n+1), T_{ZM}(n), T_{PCO}(n))$$

Znajomość funkcji  $f_3$  oznacza, że na podstawie temperatury zasilania instalacji w kolejnym okresie próbkowania  $T_{ZCO}(n+1)$ , temperatury zasilania  $T_{ZM}(n)$  i temperatury powrotnej  $T_{PCO}(n)$  wewnętrznej instalacji CO w aktualnym okresie próbkowania można wyznaczyć pobór wody z sieci miejskiej  $F_M(n)$ , który doprowadzi do zadanej temperatury zasilającej w następnym kroku. Temperatura zasilania w kolejnym okresie próbkowania  $T_{ZCO}(n+1)$  powinna w układzie sterowania być równa wartości temperatury referencyjnej  $T_{REFCO}(n)$ . Innymi słowy mamy

$$F_M(n) = f_5(T_{REFCO}(n), T_{ZM}(n), T_{PCO}(n))$$

Funkcja  $f_5$  nie jest znana. Do jej wyznaczenia zastosowano sieć neuronową o strukturze identycznej z siecią wykorzystaną do szacowania zapotrzebowania na moc (rysunek 5). Na podstawie danych historycznych z pracy obiektu stworzono ciągi uczące i nauczono sieć odtwarzania zależności  $f_5$ . Dane do ciągów uczących utworzono na podstawie kilkumiesięcznej pracy instalacji sterującej węzłem cieplnym AGH. Nauczona sieć odtwarza zapotrzebowanie na pobór wody z sieci miejskiej dla potrzeb ogrzewania instalacji CO. Struktura regulatora neuronowego przedstawiona została na rysunku 12.

Sieć neuronowa wyznacza żądany przepływ wody z miejskiej sieci grzewczej  $F_M$ . Zmienną sterującą w systemie jest stopień otwarcia zaworu. Ze względu na



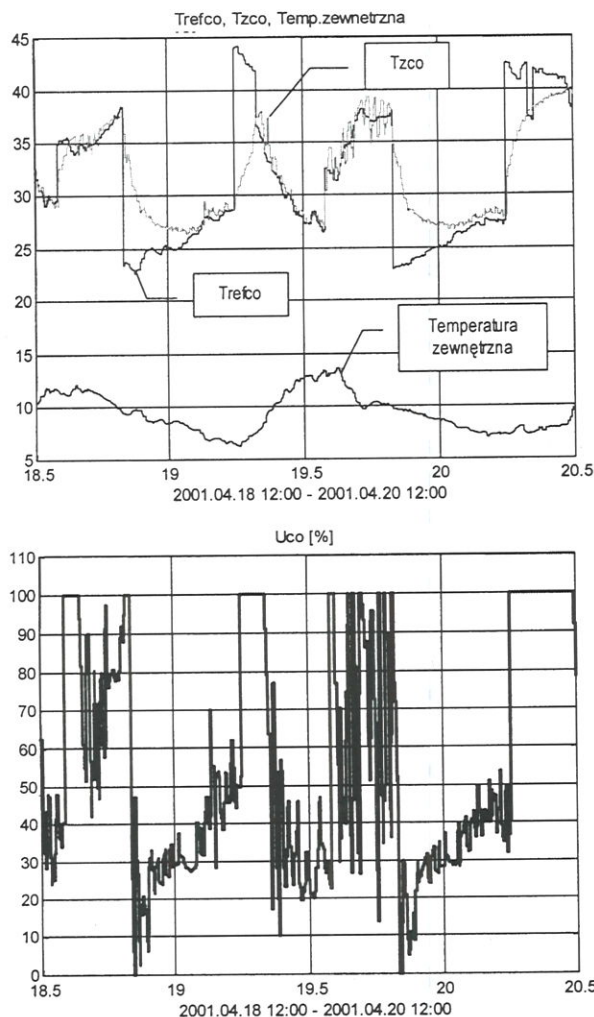
Rysunek 12. Struktura neuronowego regulatora CO.

silne wahania ciśnienia wody w sieci miejskiej przepływ może osiągać różne wartości przy stałym współczynniku otwarcia zaworu sterującego. W celu wyeliminowania tego zjawiska wprowadzono adaptacyjny blok  $U_{CO}(FM)$ , który na podstawie aktualnych zależności między stopniem otwarcia zaworu oraz wartością przepływu wyznacza takie otwarcie zaworu, które powoduje powstanie zadanego przepływu. Blok  $U_{CO}(FM)$  w sposób adaptacyjny wyznacza współczynnik proporcjonalności między stopniem otwarcia zaworu a przepływem.

Przykładowe wyniki sterowania neuronowego przedstawia rysunek 13. Temperatura zasilania CO nie odbiega więcej niż około 2°C od temperatury referencyjnej i w zadawalający sposób podąża za jej



zmianami. Wyjątkiem są okresy nocnych obniżen temperatury. Na skutek stosunkowo wysokiej temperatury zewnętrznej instalacja CO ma kilkugodzinną stałą czasową wychładzania. Nocne wychłodzenie powinno spowodować obniżenie temperatury do około 23°C. Jest to temperatura porównywalna z temperaturą murów, w których znajdują się rury instalacji CO. Również poranne podwyższenie temperatury nie jest w pełni osiągnięte w związku ze zbyt niską temperaturą wody w sieci miejskiej. Można również zauważyć oscylacyjne wahania temperatury  $T_{zco}$ . Mają one jednak niewielką częstotliwość i nie wpływają negatywnie na pracę zaworu.



Rysunek 13. Temperatura referencyjna CO  $T_{refco}$ , temperatura zasilania CO  $T_{zco}$  oraz sterowanie instalacji CO  $U_{co}$  w przypadku zastosowania sterownika neuronowego.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono dwa przykłady zastosowania sztucznych sieci neuronowych w rzeczywistym systemie sterowania. Pierwsze zastosowanie polega na przetworzeniu danych historycznych z pracy obiektu w celu uzyskania syntetycznych informacji dotyczących charakterystyki zapotrzebowania na

moc kompleksu budynków Akademii Górniczo-Hutniczej. Uzyskana charakterystyka (rysunek 9) przedstawia zależność zapotrzebowania na moc cieplną w zależności od temperatury zasilania CO oraz od temperatury zewnętrznej. W drugim przypadku (rysunek 12) wykorzystano sieć neuronową do bezpośredniego sterowania zaworem odpowiadającym za pobór mocy z miejskiej sieci grzewczej. Praktyczne zaimplementowanie sieci neuronowej potwierdziło jej przydatność w roli regulatora stabilizującego temperaturę w przypadku dużych instalacji CO.

Numeryczne obliczenia wykonano wykorzystując pakiet programowy Matlab. Prezentowana praca z niewielkimi zmianami była prezentowana 19 kwietnia 2001 roku na AGH w Krakowie na Konferencji Neuromet'2001. W części dotyczącej sieci neuronowych praca był wykonywana w ramach projektu KBN 7T08B06220.

## LITERATURA

- Grego, W., Kołek, K., 2001, Sterowanie nadrzędne węzłem cieplnym, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 7/8, 18-24.
- Kempa, A., Kołek, K., Korytowski, A., Tabakowski, P., Turnau, A., 1997, Neural Time-Optimal Real-Time Crane Controller, *Proceedings of the 16th IASTED International Conference: Modelling, Identification and Control*, Innsbruck, Austria, 214-219.
- Kołek, K., 1996, Systemy operacyjne w sterowaniu systemami dynamicznymi w czasie rzeczywistym, *Praca doktorska, Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków*.
- Kołek, K., Mitkowski, W., 2001, Dobór struktury sieci neuronowych w układach sterowania czasu rzeczywistego, *Informatyka w Technologii Materiałów*, nr1, tom 1, 23-34.
- Kołek, K., Tabakowski, P., Turnau, A., 1993, Control of a Nonlinear System: Simulation, Real-Time Control, Application of Neural Networks, *Proceedings of the IASTED Conference*, Innsbruck, February 14-17, Austria.
- Korbicz, J., Obuchowicz, A., Uciński, D., 1994, Sztuczne sieci neuronowe. Podstawy i zastosowania, *Akademicka Oficyna Wydawnicza PLJ, Warszawa*.
- Tadeusiewicz, R., 1993, Sieci neuronowe, *Akademicka Oficyna Wydawnicza, Warszawa*.
- Żurada, J., Barski, M., Jędruch, W., 1996, Sztuczne sieci neuronowe, *PWN, Warszawa*.