

Zbigniew SIWOŃ, Wojciech CIEŻAK,  
Jan CIEŻAK

*Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska  
Politechnika Wroclawska*

## MODELE NEURONOWE SZEREGÓW CZASOWYCH KRÓTKOTRWAŁEGO ZUŻYCIA WODY W OSIEDLACH MIESZKANIOWYCH

NEURAL NETWORK MODELS OF SHORT TERM WATER DEMAND  
TIME SERIES IN HOUSING AREAS

*Artificial neural network models verification are presented on the example for a separate water supply subsystems in Wrocław and Kłodzko. The paper describes also the rules of determining and forecasting the water demand histograms during the day for the specific consumers groups. It's pointed out that artificial neural networks are useful in the calibration and verification of the hydraulic models, as well as in modelling of flows in water supply systems.*

### 1. Wprowadzenie

Stochastyczne modele szeregów czasowych krótkotrwałego zużycia wody w obszarach jej konsumpcji (miastach i aglomeracjach miejsko-przemysłowych oraz wydzielonych ich rejonach, regionach wiejskich) oraz przez określone grupy odbiorców wody, są wykorzystywane [6,7,10]:

- w procesach kalibracji modeli przepływów w systemach dystrybucji wody oraz w komputerowych badaniach symulacyjnych, których celem są wszechstronne analizy działania systemu zaopatrzenia w wodę, szczególnie w warunkach kolejno pojawiających się prognozowanych stanów rozbioru wody. Wyniki tych analiz, dokonywanych przy wykorzystaniu modeli opisujących przepływy i ciśnienia w badanych systemach, są niezwykle użyteczne zarówno w projektowaniu modernizacji i rozbudowy systemów już eksploatowanych, jak i w ich bieżącej eksploatacji, w tym wykrywaniu stanów awaryjnych,
- w optymalnym sterowaniu dystrybucją i procesami oczyszczania wody dla zadanego horyzontu optymalizacji, przy zachowaniu m. innymi wymagań ilościowych dotyczących przewidywanego zapotrzebowania na wodę,

- do wyznaczania optymalnych poleceń operacyjnych w procesach produkcji, oczyszczania i dystrybucji wody. W systemach automatycznego sterowania procesem oczyszczania wody i jej dystrybucją układ regulacji odbiera zmiany poboru wody lub zapotrzebowania na nią jako zakłócenia, które powinny być kompensowane zmianami wielkości sterującej.

W sterowaniu dystrybucją wody konieczne jest między innymi dysponowanie skalibrowanym modelem hydraulicznym, a także modelem prognostycznym zapotrzebowania na wodę. Należy zauważyć, że jak dotychczas przeważająca większość prac z zakresu metodologii bieżącego i krótkoterminowego prognozowania poboru wody dotyczy szeregów czasowych poboru dobowego, a nie godzinowego lub uśrednianego w krótszym przedziale czasu.

W komputerowych modelach symulacyjnych bardzo złożonym zadaniem, zarówno w procesach kalibracji i weryfikacji modeli, jak i w ich praktycznym użytkowaniu, jest określenie dobowych profili węzłowych rozbiórów wody, traktowanych jako wymuszenia systemu. Rozwiązanie tego problemu jest bardzo trudne, przede wszystkim z następujących powodów [7]:

- złożonego, deterministyczno – losowego, charakteru procesu zużycia wody wodociągowej,
- nierównomierności rozbioru wody zarówno w czasie, jak i w przestrzeni,
- wpływu na rozbiór wody warunków ciśnieniowych w przewodach rozdzielczych i w instalacjach wewnętrznych.

W praktyce, szczególnie w warunkach obserwowanego w Polsce trendu spadkowego produkcji i poboru wody, niewłaściwe określenie dobowych profili węzłowych rozbiórów wody staje się jedną z najpoważniejszych przyczyn błędów, zarówno w procesach kalibracji modeli, jak i w rezultatach symulacji działania systemu dystrybucji wody [7]. Z tego względu pomiary poboru wody przez wybranych jej odbiorców i ich grup oraz właściwa analiza wyników owych pomiarów umożliwiająca wyznaczenie oddzielnych histogramów chwilowych (najczęściej uśrednianych w przedziałach 15, 30 lub 60 minutowych) rozbiórów wody w czasie doby przez określone grupy jej odbiorców, stanowią jeden z zasadniczych elementów zarówno procesów kalibracji i weryfikacji modelu, jak i dynamicznego modelowania przepływów w systemach dystrybucji wody dla potrzeb bieżącej eksploatacji systemów oraz programowania ich modernizacji i rozbudowy. Do modelowania i prognozowania owych dobowych histogramów chwilowych poborów wody przez wszystkich jej odbiorców oraz przez określone ich grupy powinny być wykorzystywane stochastyczne modele procesu poboru wody z miejskich sieci wodociągowych, bazujące na statystycznych szeregach czasowych.

W aktualnie stosowanych w praktyce modelach stochastycznych danymi wyjściowymi do analiz i prognoz są wyłącznie zbiory chronologicznie uszeregowanych obserwacji poboru wody (w całym systemie wodociągowym, w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej lub przez grupę określonych odbiorców wody, np. w osiedlach mieszkaniowych) w przeszłości oraz obserwacja bieżąca stanowiąca predyktor, zatem nie są potrzebne informacje dotyczące zmiennych zewnętrznych. Modele bazujące na analizie statystycznych szeregów czasowych różnią się między sobą m. innymi liczbą ujmowanych komponent oraz sposobem ich matematycznego opisu, a także sposobami szacowania trendu i komponenty okresowej, natomiast łączy je wspólne założenie, że bieżące lub przyszłe wartości procesu są wyrażane wyłącznie, lub niekiedy między innymi, za pomocą jego przeszłych obserwacji.

Do opisu i bieżącego prognozowania wielkości i zmienności w czasie poboru wody z sieci wodociągowych są obecnie najczęściej stosowane modele klasy ARIMA (Autore-

gressive Integrated Moving Average Modell - scałkowany model autoregresji i średniej ruchomej) oraz metody wykładniczego wygładzania szeregów czasowych. Aktualną alternatywą dla tych metod są sztuczne sieci neuronowe [3,11]. Wyniki praktycznej weryfikacji owych trzech grup metod wykazały [1,2,4,5,6,8,9], że w modelowaniu i prognozowaniu szybkozmiennych szeregów czasowych krótkotrwałych (uśrednianych w przedziałach czasu równych lub krótszych, niż 1 godzina) poborów wody przydatność metod wykładniczego wygładzania szeregów czasowych jest nader ograniczona, dlatego w praktyce w dynamicznym modelowaniu przepływów w systemach dystrybucji wody mogą być wykorzystywane modele ARIMA i sztuczne sieci neuronowe.

Sztuczne sieci neuronowe są stosunkowo nowym narzędziem, które może być wykorzystane do opisu i prognozowania szeregów czasowych poboru wody. Rozwój teorii owych sieci i związanych z nimi zastosowań jest obserwowany na świecie w ostatnich 10 latach, tj. od czasu, gdy została opracowana metoda uczenia sieci wielowarstwowej, określana jako metoda wstecznej propagacji błędu. Model neuronowy jest strukturą zbudowaną z połączonych ze sobą elementów obliczeniowych nazywanych neuronami. Pojedynczy neuron przyjmuje sygnały wejściowe (wartości procesu) i przetwarza je w jeden sygnał wyjściowy. Wagi połączeń z wejściami powinny przyjąć takie wartości, aby odpowiedź neuronu różniła się od rzeczywistej wartości zmiennej opisywanej o mniej, niż zadany błąd. Ta sama zasada leży u podstaw działania sieci neuronowych. Wagi wszystkich połączeń w całej strukturze neuronów ulegają dostosowaniu tak, aby sieć reagowała na bodźce wejściowe odpowiedzią na najbliższą wartość zmiennej opisywanej. Proces dostosowywania wag połączeń w sieci neuronowej do danych zawartych w zbiorze uczącym jest nazywany uczeniem. Odpowiednikiem tego procesu w metodach statystycznych jest estymacja parametrów modelu.

Sieci neuronowe posiadają szereg cech, dzięki którym mogą stanowić przydatne narzędzie do analizy i prognozowania szeregów czasowych. Ich atrakcyjność wynika przede wszystkim z możliwości aproksymacji dowolnych nieliniowości oraz dostrajania przetyjonej struktury na podstawie danych eksperymentalnych. Co więcej, proces budowy modelu neuronowego polega na eksploracji dostępnych zbiorów danych i prowadzi do całkowicie automatycznego oszacowania na tej podstawie modelu opisującego stwierdzone prawidłowości i współzależności. Stosowanie modeli neuronowych nie wymaga w związku z tym znajomości postaci funkcji opisującej istniejącą prawidłowość. W efekcie modele neuronowe mogą znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie nie jest znane dokładne prawo opisujące kształtowanie się badanych zależności.

Dodatkową zaletą sieci neuronowych jest łatwość ich adaptacji do zmiennych warunków środowiska. Cecha ta predestynuje je do opisu zależności i systemów zmieniających się w czasie. Nieustanna ewolucja zmian dynamiki procesu poboru wody oraz wpływ warunków zewnętrznych znacząco utrudniają stosowanie wszelkich metod obliczeniowych opartych na koncepcji modelu stacjonarnego. Tymczasem dla sieci neuronowej zmiany zachodzące w modelowanym obiekcie nie stanowią zwykle przeszkody. W chwili pojawienia się nowych danych przeprowadzony może zostać zawsze proces douczenia sieci (lub uczenia od nowa), co umożliwia uwzględnienie w tworzonym modelu informacji zawartych także w najnowszych obserwacjach.

Znanych jest wiele typów i rodzajów sieci neuronowych, różniących się między sobą strukturą i działaniem. Obecnie najpopularniejszym i najlepiej opisanym teoretycznie jest perceptron wielowarstwowy, składający się z trzech lub więcej warstw (wejściowej, ukrytych i wyjściowej) oraz zawartych w nich neuronów. W sieci perceptronowej każdy z neuronów oblicza ważoną sumę swoich wejść, a wyznaczony w ten sposób poziom pobudzenia staje się argumentem funkcji aktywacji (najczęściej jest to funkcja liniowa

lub hiperboliczna), za pomocą której jest obliczana wartość wyjściowa neuronu. Następnie w każdej warstwie należy dobrać wartości wag i wartości progowe (bias) wszystkich neuronów. Proces ten jest realizowany za pomocą algorytmu uczenia. Najczęściej stosowanymi algorytmami uczenia są: wsteczna propagacja błędów, gradienty sprzężone, Quasi-Newtona (BFGS), Levenberga-Marquardta, Delta-bar-delta. Proces uczenia (doboru wag dla poszczególnych neuronów) jest ważnym zadaniem, ponieważ od niego zależy w znacznej mierze czy wyznaczony model będzie dobrze opisywał wartości przyszłe (nie znane dla modelu). Jak wspomniano wcześniej, na obecnym etapie rozwoju teorii sztucznych sieci neuronowych, proces ten nie jest sformalizowany, bowiem nie ma jednoznacznej metody optymalnego doboru zarówno ilości warstw, neuronów, jak i wag oraz progów w taki sposób, aby zapewnić minimalizację błędów działania sieci. Należy przeprowadzić szereg eksperymentów, uwzględniając różne wielkości parametrów i wybrać na ich podstawie model optymalny.

Sieci perceptronowe zostały wykorzystane w analizach zaprezentowanych w dalszej części artykułu.

## 2. Budowa modeli i wyniki analiz

Do zilustrowania metodyki modelowania i prognozowania dobowych histogramów chwilowych poborów wody przez określone grupy jej odbiorców przy użyciu sieci neuronowych wykorzystano zbiory wyników pomiarów zużycia wody przez jej odbiorców w osiedlach mieszkaniowych, zaopatrywanych w wodę z wydzielonych rejonów sieci wodociągowych we Wrocławiu i w Kłodzku. Osiedla charakteryzują się zasadniczo odmiennymi ilościami mieszkańców.

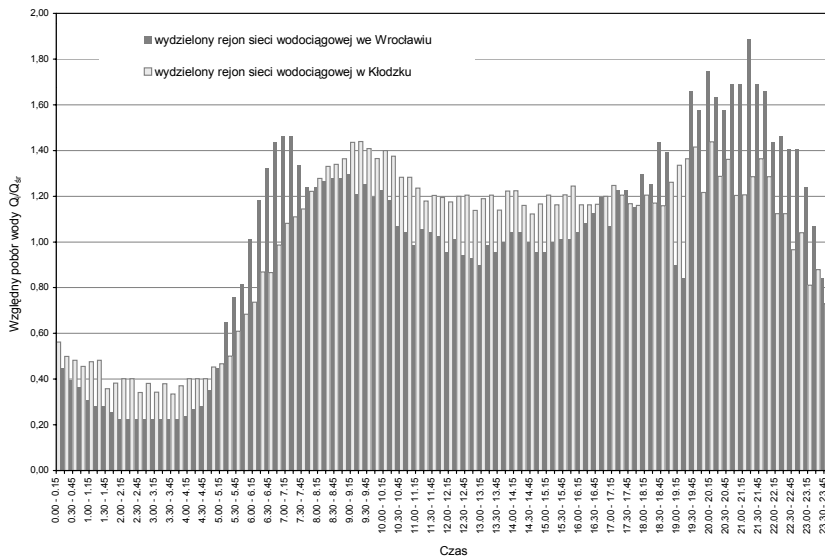
Wydzielona strefa sieci wodociągowej we Wrocławiu, z której zaopatrywanych jest w wodę ok. 100.000 mieszkańców osiedli: Nowy Dwór, Kozańów, Gądów i Muchobór Mały (w przeważającej większości z budynkami 11-kondygnacyjnymi) z kompletem usług, jest zasilana z jednego źródła (pompowni strefowej przy ul. Bystrzyckiej), a woda jest tłoczona dwoma rurociągami, na których są zamontowane przepływomierze elektromagnetyczne z ciągłą rejestracją wskazań.

Wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku obejmuje osiedle im. Leona Kruczkowskiego o zabudowie wielorodzinnej z budynkami 5 i 11 kondygnacyjnymi oraz osiedle z zabudową 1-rodzinną w rejonie ulic: Św. Wojciecha, Korytowskiej, Zajęczej, Noworudzkiej, Kromera, Długosza i Objazdowej, zwyczajowo nazywane „osiedlem Św. Wojciecha”. Łączna liczba mieszkańców osiedli wynosi ok. 10.000. Źródłem zasilania sieci jest pompownia przy ul. Dusznickiej. Pomiar globalnego poboru wody przez wszystkich jej odbiorców na terenie wymienionych osiedli są dokonywane za pomocą przepływomierza elektromagnetycznego oraz wodomierza, z ciągłymi rejestracjami wskazań.

W analizach ilustrujących metodykę modelowania i prognozowania dobowych histogramów chwilowych rozborów wody wykorzystano chronologicznie uszeregowane wyniki pomiarów godzinowego (uśrednionego w przedziałach 60 minutowych) zużycia wody w wydzielonych rejonach sieci wodociągowych w okresach: od 25.04.2001 do 15.10.2001 we Wrocławiu i od 01.06.2006 do 11.02.2007 w Kłodzku. Każdy analizowany szereg czasowy poddano analizom mającym na celu wyeliminowanie „błędów grubych” spowodowanych awariami w systemie dystrybucji wody oraz w układach pomiarowych.

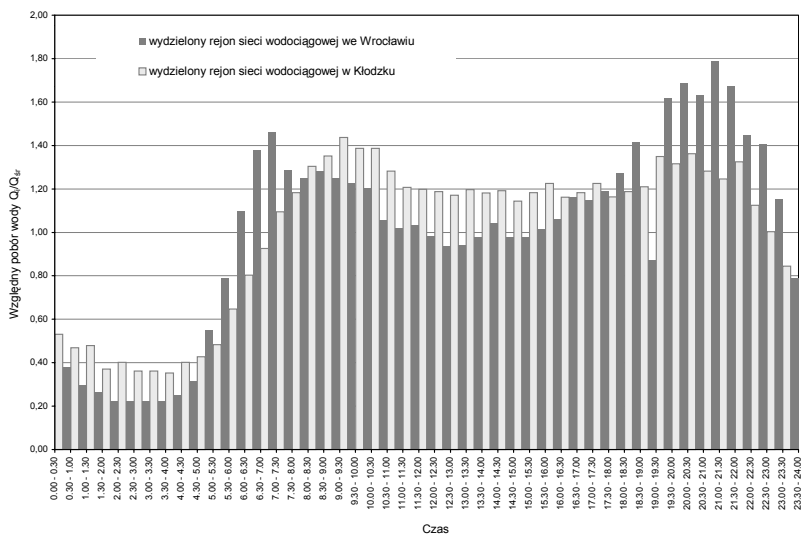
Na rysunkach 1, 2 i 3 zaprezentowano przykładowe histogramy względnych wartości chwilowych (uśrednianych w przedziałach 15-, 30- i 60- minutowych) rozbiórów wody w obu analizowanych rejonach sieci wodociągowych.

Zbiory wyników pomiarów godzinowego rozbioru wody podzielono na szeregi czasowe zawierające odpowiednio zbiory obserwacji w dniach roboczych, sobotach oraz dniach wolnych od pracy (niedzielach i świątach) w okresie od 25 kwietnia do 16 września 2001 roku (wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu) oraz od 01.06.2006 do 31.12.2006 r.(wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku). Okresy od 17.09 do 15.10.2001 r. (wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu) oraz od 01.01.2007 r. do 11.02.2007 r. (wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku) zostały wyodrębnione w celu sprawdzenia jakości prognoz generowanych przez wybrane optymalne modele prognostyczne.



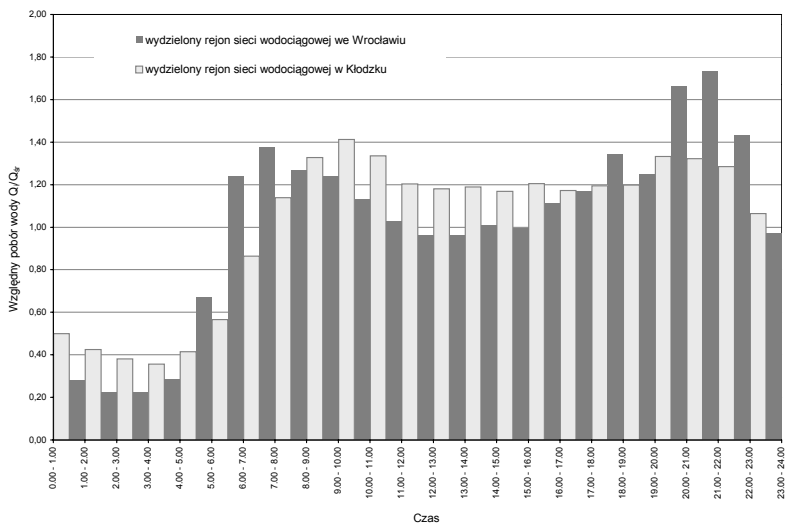
Rys. 1. *Dobowe histogramy piętnastominutowych rozbiórów wody z wydzielonych rejonów sieci wodociągowych we Wrocławiu i w Kłodzku.*

Fig. 1. *Daily quarter-hourly water demand histograms of the selected water supply system areas in the cities of Wrocław and Kłodzko.*



Rys.2. *Dobowe histogramy półgodzinnych rozborów wody z wydzielonych rejonów sieci wodociągowej we Wrocławiu i w Kłodzku.*

Fig.2. *Daily half-hourly water demand histograms of the selected water supply system areas in the cities of Wrocław and Kłodzko.*



Rys.3. *Dobowe histogramy godzinowych rozborów wody z wydzielonych rejonów sieci wodociągowej we Wrocławiu i w Kłodzku.*

Fig.3. *Daily hourly water demand histograms of the selected water supply system areas in the cities of Wrocław and Kłodzko.*

## 2.1. Wyniki analiz szeregów czasowych godzinowego poboru wody z wydzielonego rejonu sieci wodociągowej we Wrocławiu

W analizach wyników pomiarów krótkotrwałego poboru wody z sieci wodociągowej we Wrocławiu dla każdego z trzech szeregów czasowych przeprowadzono badania mające na celu wstępne określenie:

- wielkości opóźnienia (5, 10 i 15 dni),
- ilości warstw ukrytych (1 lub 2 warstwy),
- ilości neuronów w poszczególnych warstwach ukrytych (1–25 neuronów).

W owych analizach wykorzystano jedno- lub dwuetapowy proces uczenia (wsteczną propagację błędów i gradienty sprzężone) oraz zastosowano funkcje aktywacji: w warstwie wejściowej i wyjściowej – liniową, w warstwach ukrytych – hiperboliczną, natomiast wybór zbiorów: uczącego (50% ogólnej ilości obserwacji), walidacyjnego i testowego (odpowiednio po 25% ilości obserwacji), został przeprowadzony w taki sposób, aby zapewnić w każdym z nich dane z całego zakresu analizowanego szeregu czasowego poboru wody. Przed podaniem na wejście sieci, zmienne zostały przekonwertowane za pomocą metody „minimax”: wartości przeskalowano liniowo tak, że najmniejsza wartość ze zbioru uczącego przyjęła wartość 0, a największa 1.

Po przeprowadzeniu analiz dla każdego szeregu wybrano po jednej strukturze sieci perceptronowej, wykazującej wstępnie najmniejsze względne średnio-kwadratowe błędy modelu. Modele charakteryzujące się najmniejszymi względnymi średnio-kwadratowymi błędami poddano dokładnej analizie, aby zminimalizować błędy prognoz. W tym celu zastosowano:

- jedno- lub dwuetapowy proces uczenia z zastosowaniem różnych metod uczenia, m. in.: wsteczną propagację błędów, gradienty sprzężone, Quasi-Newtona (BFGS),
- redukcję wag metodą Weigenda w celu uniknięcia przeuczenia sieci,
- różną liczbę epok (od 50 do 2000) oraz powtórnie przeanalizowano wielkości opóźnień czasowych,
- funkcję aktywacji: w warstwie wejściowej i wyjściowej – liniową, w warstwie ukrytej – hiperboliczną.

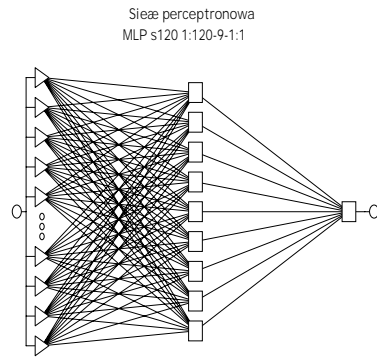
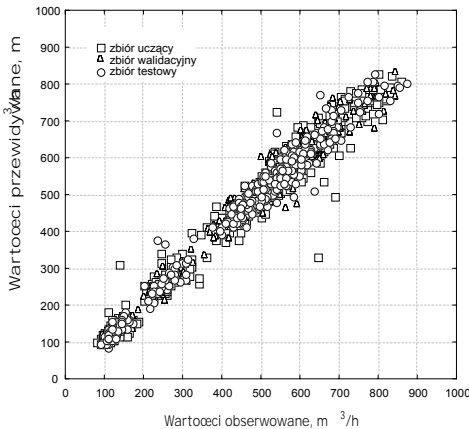
Rezultatem owych analiz było uzyskanie struktur sieci perceptronowych wykazujących najmniejsze średnio-kwadratowe błędy w modelowaniu i prognozowaniu dobowych profili godzinowych rozbiórów wody. W tabeli 1 zestawiono przykładowe struktury optymalnych sieci, a także metody ich uczenia i błędy średnio-kwadratowe, a przykładowy schemat optymalnej sieci neuronowej oraz analizę jakościową modelu prognozy pokazano na rysunku 4.

Przykładem praktycznej efektywności prognozowania przy wykorzystaniu wielowarstwowych perceptronowych sieci neuronowych są wyniki analiz zamieszczone w tabeli 2 oraz na rysunku 5.

Tab. 1. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci perceptronowych dla szeregu czasowego godzinowych rozbiórów wody, przyjętych do generowania prognoz. Wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu.

Tab. 1. Results of the analysis regarding the choice of optimal perceptron network structures for the 1-hour water demand time series used in the forecasts. Selected area of the water supply system in Wrocław.

Typ dnia	Struktura modelu	Średni rozbiór wody [m <sup>3</sup> /h]	Bezwzględny średniokwadratowy błąd modelu [m <sup>3</sup> /h]	Względny średniokwadratowy błąd modelu [%]	Współczynnik korelacji
robocze	MLP s120 1:120-9-1:1	447,59	25,68	5,74	0,9896
	metoda uczenia: I etap - Quasi-Newtona, 700 epok, II etap gradienty sprzężone, 700 epok				
soboty	MLP s60 1:60-6-1:1	505,03	25,59	5,07	0,9933
	metoda uczenia: Quasi-Newtona, 600 epok				
niedziele wraz z dniami świątecznymi	MLP s120 1:120-9-1:1	463,30	33,03	7,13	0,9893
	metoda uczenia: Quasi-Newtona, 700 epok				



Rys. 4. Struktura optymalnej sieci perceptronowej wraz z analizą jakościową modelu prognostycznego. Godzinowe rozbiory wody w dniach roboczych w okresie od 25.04 do 16.09.2001 roku. Wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu.

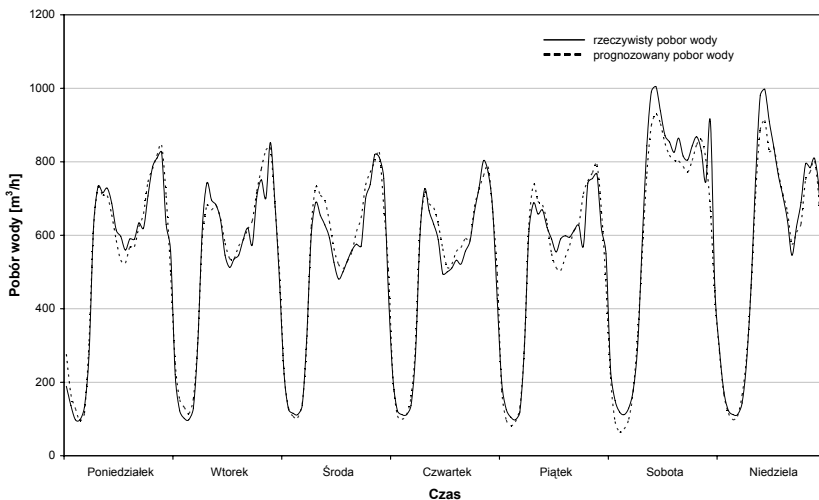
Fig. 4. Optimal structure of the perceptron network, together with quality analysis of the forecast model. 1-hour water demands on workdays in the time span of 25 April to 16 September 2001. Selected area of the water supply system in Wrocław.



Tab. 2. Analiza jakości prognozy wg optymalnej sieci perceptronowej. Wydzielony rejon sieci wodociągowej we Wrocławiu. Horyzont prognozy równy jednej dobie.

Tab. 2. Analysis of forecast quality according to optimal perceptron network. Selected area of the water supply system in Wrocław. Forecast horizon: 24 h.

Dzień tygodnia	Data	Średni rozbiór wody	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy	Względny średniokwadratowy błąd prognozy [%]
Poniedziałek	2001-10-08	539,06	37,01	6,86
Wtorek	2001-10-09	519,17	37,84	7,29
Środa	2001-10-10	509,10	37,90	7,44
Czwartek	2001-10-11	498,31	29,93	6,01
Piątek	2001-10-12	514,94	46,48	9,03
Sobota	2001-10-13	636,64	66,17	10,39
Niedziela	2001-10-14	569,41	37,65	6,61



Rys.5. Rzeczywiste i prognozowane wg optymalnej sieci perceptronowej godzinowe rozbiory wody w czasie od 08.10.2001 do 14.10. 2001 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej we Wrocławiu. Horyzont prognozy równy 1 dobie.

Fig.5. Real and forecast (according to the optimal perceptron networks) hourly water demands in the time span of 8 to 14 October 2001 in the selected area of the water supply system in Wrocław. Forecast horizon: 24 h.

Wyniki analiz wskazują na relatywnie dobrą jakość predykcji, porównywalną lub lepszą od jakości predykcji wg modeli klasy ARIMA i metod wykładniczego wygładzania szeregów czasowych, omówionych w [5,6,9]. Dowodzą także, że w procedurach doboru optymalnych sieci perceptronowych można ograniczyć:

- opóźnienie: do 5 dni tego samego typu (robocze, soboty lub niedziele wraz z dniami świątecznymi),
- ilość warstw ukrytych: do 1,
- ilości neuronów w warstwie ukrytej: do 15.

Wniosek ten został uwzględniony w analizach zaprezentowanych w dalszej części artykułu.

## 2.2. Wyniki analiz szeregów czasowych godzinowego poboru wody z wydzielonego rejonu sieci wodociągowej w Kłodzku

W badaniach wykorzystano jednoetapowy proces uczenia (Quasi-Newtona - BFGS) oraz zastosowano różne funkcje aktywacji w warstwie wejściowej i wyjściowej (liniową, logistyczną, tg hip, wykładniczą i sinusoidalną). Zbiory: uczący, testowy i walidacyjny obejmowały odpowiednio 50 %, 25% i 25 % ogólnej ilości obserwacji. Przed podaniem na wejście sieci, zmienne zostały przekonwertowane za pomocą metody „minimax”.

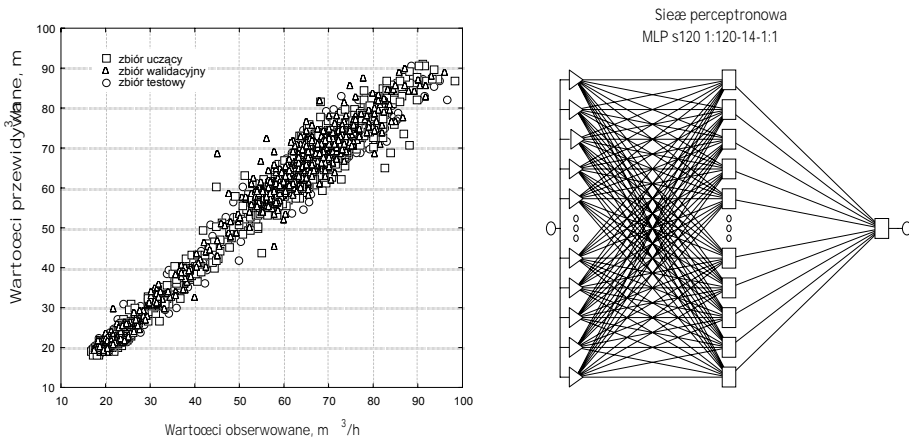
Po przeprowadzeniu analiz dla każdego szeregu uzyskano struktury sieci perceptronowych wykazujące najmniejsze średnio-kwadratowe błędy w modelowaniu i prognozowaniu. W tabeli 3 zestawiono przykładowe struktury optymalnych sieci, a także metody ich uczenia i błędy średnio-kwadratowe, a przykładowy schemat optymalnej sieci neuronowej oraz analizę jakościową modelu prognostycznego pokazano na rysunku 6.

Praktyczną efektywność modelowania i prognozowania przy wykorzystaniu perceptronowych sieci neuronowych ilustrują wyniki analiz zamieszczone w tabelach 4 i 5 oraz na rysunku 7.

Tab. 3. Wyniki analiz dotyczących wyboru optymalnych struktur sieci perceptronowych dla szeregu czasowego godzinowych rozbiórów wody, przyjętych do generowania prognoz. Wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku.

Tab. 3. Analysis of the choice of optimal perceptron network structures for the time series of 1-hour water demands, adopted for the generation of the forecasts. Selected area of the water supply system in Kłodzko.

Typ dnia	Struktura modelu	Średni pobór wody [m <sup>3</sup> /h]	Bezwzględny średnio-kwadratowy błąd modelu [m <sup>3</sup> /h]	Względny średnio-kwadratowy błąd modelu [%]	Współczynnik korelacji
robocze	MLP s120 1:120-14-1:1	55,08	2,91	5,29	0,9888
	metoda uczenia: Quasi-Newtona (BFGS), 37 epok				
soboty	MLP s60 1:60-13-1:1	58,73	3,04	5,18	0,9907
	metoda uczenia: Quasi-Newtona (BFGS), 54 epoki				
niedziele wraz z dniami świątecznymi	MLP s120 1:120-11-1:1	51,86	3,53	6,80	0,9854
	metoda uczenia: Quasi-Newtona (BFGS), 38 epok				



Rys. 6. Struktura optymalnej sieci perceptronowej wraz z analizą jakościową modelu prognostycznego. Godzinowe rozbiory wody w dniach roboczych w okresie od 01.06 do 31.12.2006 roku. Wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku.

Fig. 6. Optimal structure of the perceptron network, together with quality analysis of the forecast model. 1-hour water demands on workdays in the time span of 1 June to 31 December 2006. Selected area of the water supply system in Kłodzko.

Tab. 4. Statystyki wartości godzinowych rozborów wody dla analizowanych sieci i zbiorów danych.

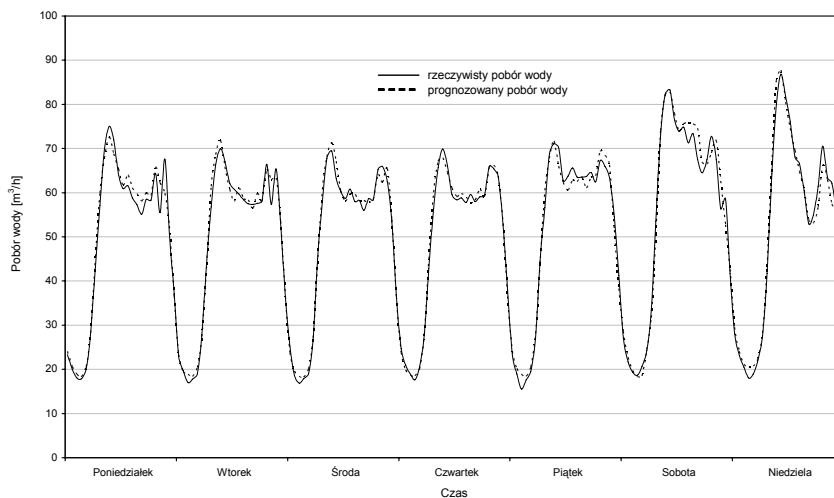
Tab. 4. Statistics of hourly water consumption values for analyzed networks and datasets.

Podzbiór danych	Dni robocze – MLP s120 1:120-14-1:1			
	Uczenie	Walidacja	Test	Wszystkie
Średnia	55,03	54,71	55,24	55,00
Odchylenie std.	19,81	19,93	20,05	19,90
Wsp. korelacji	0,9909	0,9868	0,9886	0,9888
Podzbiór danych	Soboty – MLP s60 1:60-13-1:1			
	Uczenie	Walidacja	Test	Wszystkie
Średnia	58,51	57,87	59,35	58,54
Odchylenie std.	23,06	22,64	24,06	23,16
Wsp. korelacji	0,9931	0,9893	0,9898	0,9907
Podzbiór danych	Niedziele wraz z dniami świątecznymi – MLP s120 1:120-11-1:1			
	Uczenie	Walidacja	Test	Wszystkie
Średnia	52,64	51,97	51,44	52,20
Odchylenie std.	21,45	21,36	21,10	21,33
Wsp. korelacji	0,9899	0,9800	0,9863	0,9854

Tab. 5. Analiza jakości prognozy wg optymalnej sieci perceptronowej. Wydzielony rejon sieci wodociągowej w Kłodzku. Horyzont prognozy równy jednej dobie.

Tab. 5. Analysis of forecast quality according to optimal perceptron network. Selected area of the water supply system in Kłodzko. Forecast horizon: 24 h.

Dzień tygodnia	Data	Średni rozbiór wody	Bezwzględny średniokwadratowy błąd prognozy	Względny średniokwadratowy błąd prognozy [%]
Poniedziałek	2007-02-05	49,77	2,72	5,47
Wtorek	2007-02-06	49,10	1,97	4,02
Środa	2007-02-07	49,19	1,67	3,40
Czwartek	2007-02-08	49,47	1,37	2,77
Piątek	2007-02-09	51,47	2,20	4,28
Sobota	2007-02-10	55,15	2,97	5,39
Niedziela	2007-02-11	51,55	2,48	4,82



Rys.7. Rzeczywiste i prognozowane wg optymalnej sieci perceptronowej godzinowe rozbiory wody w czasie od 05.02.2007 do 11.02. 2007 w wydzielonym rejonie sieci wodociągowej w Kłodzku. Horyzont prognozy równy 1 dobie.

Fig.7. Real and forecasted (according to the optimal perceptron networks) hourly water demands in the time span of 5 to 11 February 2007 in the selected area of the water supply system in Kłodzko. Forecast horizon: 24 h.

### 3. Podsumowanie

Zaprezentowana w artykule analiza efektywności sztucznych sieci neuronowych w bieżącym prognozowaniu dobowych profili godzinowych rozbiórów wody w osiedlach mieszkaniowych wskazuje na relatywnie dobrą jakość predykcji, porównywalną lub lepszą od jakości predykcji wg modeli klasy ARIMA i metod wykładniczego wygładzania szeregów czasowych. Optymalne struktury sieci perceptronowych nie są skomplikowane, przez co proces ich douczania lub uczenia od nowa nie wymaga długotrwałych obliczeń. W procedurach doboru owych struktur można ograniczyć:

- opóźnienie: do 5 dni tego samego typu (robocze, soboty oraz niedziele wraz z dniami świątecznymi),
- ilość warstw ukrytych: do 1,
- ilości neuronów w warstwie ukrytej: do 15.

Sieci neuronowe mogą być wykorzystywane między innymi w procesach kalibracji modeli przepływów w systemach dystrybucji wody oraz w komputerowych badaniach symulacyjnych działania owych systemów. Doboru optymalnych struktur sieci można dokonać w oparciu o pakiety „Sieci neuronowe” programów STATISTICA 6 do STATISTICA 8.

### Bibliografia

- [1] Cieżak, W., Malinowski, P., Siwoń, Z. Metodologia budowy neuronowego modelu prognostycznego godzinowego rozbioru wody. *GWITS*, 2005, nr 9, s. 9-12
- [2] Cieżak, W., Siwoń, Z., Cieżak, J. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do prognozowania szeregów czasowych krótkotrwałego poboru wody w wybranych systemach wodociągowych. *Ochrona Środowiska*, 2006, nr 1, s.39 – 44
- [3] Jain, A., Ormsbee, L. Evaluation of Short-Term Water Demand Forecast Modeling Techniques: Conventional Methods versus. *Journal AWWA*, 2002, No. 94 (7), s. 64 -72
- [4] Licznar, P., Łomotowski, J. Prognozowanie dobowych rozbiórów wody przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych. *VI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”*. Poznań, 2004, s. 175-183
- [5] Siwoń, Z., Stanisławski, J. Modelowanie i prognozowanie szeregów czasowych godzinowego poboru wody w miastach i regionach wiejskich. *PAN, Instytut Budownictwa Wodnego. Rozprawy Hydrotechniczne*, 1993, zeszyt 56, s. 3-32
- [6] Siwoń, Z. Problemy krótkoterminowego prognozowania poboru wody w miejskich systemach wodociągowych. *Konferencja Naukowo-Techniczna „Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody”*. Szczyrk, 2003, s. 323-332
- [7] Siwoń, Z. Symulacyjne modele przepływów w systemach dystrybucji wody – problemy kalibracji i weryfikacji modeli. *Eksploatacja wodociągów i kanalizacji Nr 7. Konferencja „GIS, modelowanie i monitoring w zarządzaniu systemami wodociągowymi i kanalizacyjnymi”*. Warszawa, 2005, s. 157-183

- [8] Siwoń, Z., Cieżak, W., Cieżak, J. Bieżące prognozowanie godzinowego poboru wody z miejskich sieci wodociągowych. *XIII Ogólnopolska konferencja naukowo-techniczna z cyklu „Problemy gospodarki wodno-ściekowej w regionach rolniczo-przemysłowych”*. Białowieża, 2005, Monografie Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, 2005, Nr 30, s. 15-33
- [9] Siwoń, Z., Cieżak, W., Cieżak, J. Użytkowe metody bieżącego prognozowania krótkotrwałego poboru wody w systemach wodociągowych. *VII Międzynarodowa Konferencja „Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód”*. Poznań – Zakopane, 2006, t. I, s.119 –155
- [10] Siwoń, Z., Cieżak, W. Wybrane problemy kalibracji modeli przepływów w systemach dystrybucji wody. *Instal*, 2008, Wydanie Specjalne, s.79-85
- [11] Słomiński, T., Duzinkiewicz, K., Kiesielewicz, M., Trawicki, D. Analiza możliwości zastosowania sztucznych sieci neuronowych do prognozowania zapotrzebowania na wodę w miejskich sieciach wodociągowych. *Konferencja „Technologia i Automatyzacja Systemów Wodociągowych i Kanalizacyjnych TiASWiK'99”*. Stawiska, 1999, s. 235-242